

На правах рукописи



**Мальковский Сергей Иванович**

**Алгоритмическое обеспечение систем  
мониторинга и анализа распространения  
пепловых облаков от вулканов Камчатки и  
Курил**

Специальность 05.13.01 —  
“Системный анализ, управление и обработка информации  
(технические системы)”

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Хабаровск — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: **Смагин Сергей Иванович**,  
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор,  
научный руководитель Вычислительного центра ДВО РАН

Официальные оппоненты: **Потапов Вадим Петрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
заместитель директора Института вычислительных технологий СО РАН

**Макаренков Александр Алексеевич**,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник НИИ “Фотон” Рязанского государственного радиотехнического университета

Ведущая организация: Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино Московской области

Защита состоится 03 июня 2020 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 при ФГБОУ ВО “Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина” по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО “Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина” и на сайте <http://www.rsreu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.211.01.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2020 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.211.01,  
д-р техн. наук



Прузиков Александр Викторович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Пепловые облака и шлейфы, возникающие при эксплозивных извержениях вулканов Курило-Камчатского региона Дальнего Востока России, представляют большую опасность для населения и народного хозяйства. Выпадающий из них пепел может приводить к респираторным заболеваниям населения, затруднять движение транспорта и работу аэропортов, вызывать обрушения крыш строений. Облака, состоящие из частиц пепла размером менее 0,1 мм, могут оставаться в атмосфере продолжительное время, а на больших высотах переноситься ветром на тысячи километров от вулканов. Прохождение самолета через пепловое облако может приводить к отказу двигателей, абразивному истиранию стекол иллюминаторов и аэродинамических поверхностей, засорению и перегреву электроники и т. д. С дальнейшим активным ростом объемов воздушных перевозок риск встреч самолетов с пепловыми облаками будет только возрастать. В связи с этим актуальной является задача совершенствования существующих алгоритмов обработки и анализа данных для комплексного изучения процессов переноса вулканического пепла в атмосфере и разработка на их основе современных компьютерных систем мониторинга с целью проведения соответствующих фундаментальных научных исследований и оперативного управленческого реагирования на возникающие опасные природные явления.

Снижение вулканической опасности для авиaperевозок в указанном регионе требует оперативного прогнозирования перемещения пепловых облаков в атмосфере. Для решения этой задачи применяется численное моделирование. Исходные данные, используемые для инициализации моделей распространения пепла, как правило, формируются на основе результатов обработки данных специализированного мониторинга. Из-за удаленности большинства вулканов Камчатки и Курил от населенных районов и слабой развитости сети наземных наблюдений их источником является информация, полученная в основном дистанционными методами. С развитием спутниковых систем наблюдения за земной поверхностью, первое место среди них занимают методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Следует отметить, что существует ряд факторов, влияющих на точность прогноза положения и характеристик пепловых облаков: погрешности в прогностических метеорологических данных; погрешности, возникающие при определении начальных параметров пеплового облака; упрощенное описание эксплозивного процесса, а также процессов, происходящих в пепловом облаке при его распространении, заложенное в модели и т. д. Одним из способов повышения точности моделирования является проведение совместного анализа данных наблюдений и результатов прогноза распространения пепловых облаков для уточнения начальных параметров эксплозивных событий. Использование

такого подхода требует совершенствования существующего алгоритмического обеспечения.

Таким образом, анализ распространения пепловых облаков и шлейфов является сложной комплексной научной задачей, требующей использования различных видов данных, соответствующих алгоритмов и технологий для их обработки и анализа. Её решение связано со сбором и обработкой спутниковой и метеорологической информации, проведением численных расчетов, созданием специальных программных средств и интерфейсов для анализа разнородной информации, что крайне затруднительно реализовать в рамках одной информационной системы (ИС). Уникальность вулканов, обусловленная особенностями их географического расположения и геологического строения, а также имеющиеся средства и технологии инструментального мониторинга, требуют применения индивидуального подхода в реализации указанных решений. Важность изучения и оперативного мониторинга вулканической активности на Камчатке и Курилах, в частности, распространения пепловых облаков от вулканов, и практическая сложность решения перечисленных задач служит обоснованием актуальности настоящей работы.

**Степень разработанности темы.** Развитию математического обеспечения для моделирования распространения вулканического пепла в атмосфере посвящены статьи Т. Iwasaki, С. Searcy, К. Dean, В. Sič, А. F. Stein, А. Costa, R. D'Amours и др. В становление и развитие методов анализа спутниковых данных с целью детектирования и определения характеристик пепловых облаков и шлейфов внесли существенный вклад работы А. J. Prata, S. Wen, W. I. Rose, I. F. Grant, Т. Yu, С. Spinetti, М. J. Pavolonis, L. Merucci и др.

Вопросам разработки алгоритмов для обработки и анализа научных данных, создания компьютерных систем и технологий для исследования вулканической активности посвящены труды следующих отечественных и зарубежных ученых: О. А. Гириной, Е. А. Лупяна, А. А. Сорокина, И. М. Романовой, А. N. Bear-Crozier, G. Rolph, P. W. Webley, R. Potts, R. Peterson и др.

Несмотря на значительный научный задел по отдельным направлениям, вопросы создания современных инструментов для моделирования распространения пепловых облаков от вулканов еще далеки от своего решения. Актуальные задачи оперативного мониторинга вулканической активности выставляют высокие требования к скорости обработки и анализа разнородных научных данных, а также верификации полученных результатов. Существующие численные модели не всегда могут обеспечить необходимый уровень производительности, а также, в большинстве своем, не адаптированы к технологическим особенностям мониторинга исследуемых вулканов на отдельных территориях, например, на Камчатке и Курилах. Помимо этого, отдельного внимания заслуживают вопросы разработки методов и алгоритмов уточнения параметров моделирования на основе ассимиляции данных спутникового мониторинга в численные модели распространения вулканического пепла в атмосфере.

**Целью** диссертации являлось совершенствование алгоритмического обеспечения, а также разработка на его основе эффективной компьютерной системы мониторинга и анализа распространения пепловых облаков с целью изучения вулканической активности Камчатки и Курил. Достижение поставленной цели потребовало решения следующих **задач**:

1. Выполнить анализ численных моделей распространения вулканического пепла в атмосфере, позволяющих определять качественные и количественные характеристики пепловых облаков и шлейфов.
2. Повысить эффективность работы алгоритмического обеспечения для прогнозирования перемещения пепловых облаков в режиме оперативных наблюдений, а также провести его адаптацию с учетом особенностей вулканов Камчатки и Курил.
3. Разработать комплексную компьютерную систему моделирования распространения пепловых облаков, обеспечивающую решение задач, связанных с численными расчетами, визуализацией полученных результатов, взаимодействием с внешними тематическими информационными системами.
4. Создать инструменты для проведения сравнительного анализа результатов моделирования с фактическими данными, полученными методами дистанционного зондирования, позволяющие восстанавливать характеристики взрывных событий.
5. Проанализировать эффективность разработанных решений на примере отдельных взрывных событий вулканов Камчатки.

**Научная новизна:** разработаны алгоритмы организации вычислений на основе математических моделей распространения пепла в атмосфере, позволяющие повысить точность и оперативность определения количественных характеристик пепловых облаков; созданы алгоритмическое обеспечение и компьютерная система, предназначенные для моделирования и визуализации распространения пепловых облаков, возникающих при взрывных извержениях вулканов Камчатки и Курил, а также инструменты совместного анализа полученных результатов с данными ДЗЗ.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в том, что полученные результаты позволили повысить точность и оперативность прогноза распространения пепловых облаков и шлейфов, возникающих при взрывных извержениях вулканов Камчатки и Курил.

Усовершенствованное алгоритмическое обеспечение, а также разработанная компьютерная система применяются с 2016 г. в оперативной работе Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT — Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), выполняющей функции Вулканологической обсерватории России. Кроме этого, они были использованы при выполнении научно-исследовательских работ

в рамках проектов Российского научного фонда (№ 16-17-00042), Российского фонда фундаментальных исследований (№ 18-29-03100), Дальневосточного отделения Российской академии наук (№ 18-5-091) и государственного задания Вычислительного центра Дальневосточного отделения РАН (с 2013 по 2019 гг.).

**Методология и методы исследования.** Теоретико-методологической основой работы являются труды отечественных и зарубежных авторов, посвященные проблемам моделирования распространения вулканических пепловых облаков в атмосфере, визуализации и системного анализа информации, а также создания человеко-машинных проблемно-ориентированных интерфейсов и распределенных ИС.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.01 — “Системный анализ, управление и обработка информации” в части:

- п. 5 “Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации”;
- п. 9 “Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов”;
- п. 12 “Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации”;
- п. 13 “Методы получения, анализа и обработки экспертной информации”.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритмы организации вычислений на основе математических моделей распространения пепла в атмосфере PUFF и FALL3D, позволяющие повысить точность и оперативность определения количественных характеристик пепловых облаков.
2. Алгоритмы функционирования компьютерной системы мониторинга, основанные на взаимодействии различных тематических ИС, позволяющие выполнять оперативное прогнозирование и визуализацию распространения вулканического пепла.
3. Компьютерная система для моделирования и визуализации распространения вулканического пепла, а также проведения совместного анализа полученных результатов со спутниковой информацией с целью восстановления параметров взрывных событий.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается проведенными численными экспериментами по моделированию распространения пепловых облаков и шлейфов, возникших при взрывных извержениях вулканов Камчатки, которые находятся в хорошем соответствии с данными инструментальных наблюдений, полученных, в том числе, с использованием методов ДЗЗ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях. Всего сделано более 20 докладов: на международной конференции 6th International Workshop on Computer Science and Engineering, WCSE 2016 (г. Токио, Япония, 2016); IV–V Всероссийских научно-практических конференциях “Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления” (г. Хабаровск, 2017, 2019); IV Всероссийской научно-технической конференции “Суперкомпьютерные технологии” (г. Геленджик, 2016); XIV–XVII Всероссийских конференциях “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” (г. Москва, Россия, 2016–2019); международной конференции 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes, JKASP-2018 (г. Петропавловск-Камчатский, Россия, 2018) и др.

За достигнутые научные результаты, полученные при работе над диссертацией, автор был удостоен стипендии Хабаровского края имени Н. Н. Муравьева-Амурского за 2018 год.

**Личный вклад.** Автор провел адаптацию и совершенствование работы численных моделей распространения вулканического пепла в атмосфере. Выполнил работы по созданию алгоритмического обеспечения и компьютерной системы, предназначенных для моделирования и визуализации распространения пепловых облаков, а также инструментов совместного анализа полученных результатов с данными ДЗЗ. Провел серию численных экспериментов по моделированию распространения облаков вулканического пепла в атмосфере на примере отдельных извержений вулканов Камчатки.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 26 научных работах, 6 из которых изданы в периодических научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 2 — в журналах, рекомендованных ВАК, 18 — в материалах конференций. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для электронных вычислительных машин (ЭВМ). Опубликовано одна коллективная монография.

**Внедрение результатов работы.** Диссертация выполнена в Вычислительном центре Дальневосточного отделения Российской академии наук (ВЦ ДВО РАН). Научные результаты исследований и созданные на их основе компьютерные системы внедрены:

- в Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Петропавловск-Камчатский) для оперативного прогнозирования распространения пепловых облаков, возникающих при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Курил;
- в Институте космических исследований Российской академии наук (г. Москва) для совместного анализа результатов моделирования распространения пепловых облаков и спутниковой информации при комплексном мониторинге вулканов Камчатки и Курил.

Указанные внедрения подтверждены соответствующими актами.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и шести приложений. Полный объем диссертации составляет 143 страницы, включая 34 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 116 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследования, приводится обзор существующего научного задела по рассматриваемой тематике, формулируется цель и ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость диссертации.

**Первая глава** посвящена изложению основных задач, методов, подходов и технологий исследования распространения вулканического пепла в атмосфере.

Рассмотрены физические принципы и существующие технологии спутникового мониторинга процессов распространения облаков вулканического пепла в атмосфере. Представлен обзор способов детектирования пепловых облаков и шлейфов, а также методов и подходов, используемых для определения их основных характеристик.

Приведены классификация и примеры моделей распространения пепла в атмосфере. Проанализированы основные источники метеорологических данных, используемых при моделировании распространения пепла. Сделаны выводы о необходимости использования различных классов моделей для решения задач оперативного прогнозирования распространения пепловых облаков. Обоснована целесообразность адаптации существующих программных реализаций моделей распространения пепла к особенностям вулканов Камчатки и Курил.

Проанализированы существующие в мире ИС и технологии, применяющиеся для мониторинга и анализа распространения вулканических пепловых облаков. Сделаны выводы о необходимости разработки специализированной компьютерной системы, учитывающей особенности вулканов, расположенных в Дальневосточном регионе России, которая позволяет выполнять не только моделирование распространения пепла, возникающего при эксплозивных извержениях, но и проводить анализ полученных результатов с данными ДЗЗ. Сделан вывод о необходимости организации информационного взаимодействия различных тематических ИС и разработке методов и алгоритмов для совместного анализа разнородной информации о вулканической активности.

Во **второй главе** представлено описание численных моделей, обеспечивающих получение качественных и количественных характеристик пепловых облаков и шлейфов. Приведены результаты проведенных исследований по



повышению эффективности алгоритмического обеспечения и адаптации программных реализаций моделей с учетом особенностей вулканов Камчатки и Курил. Рассмотрен алгоритм организации вычислений на основе представленных моделей, позволяющий повысить оперативность определения количественных характеристик пепловых облаков.

В качестве численной модели для оперативного прогнозирования направления, скорости и высоты распространения пепла в атмосфере, выбрана модель PUFF, предложенная Н. Л. Такака. Она основана на трехмерном лагранжевом описании дисперсии загрязняющего агента, турбулентная диффузия которого рассчитывается с использованием метода случайного блуждания. Модель характеризуется относительно небольшим набором начальных параметров (минимальная и максимальная высота облака пепла, дата и время начала извержения и т. д.) и низкими требованиями к вычислительным ресурсам.

На основе начальных параметров облака модель PUFF инициализирует набор модельных частиц, дальнейшее перемещение которых вычисляется по формуле

$$\mathbf{R}_i(t + \Delta t) = \mathbf{R}_i(t) + (\mathbf{W}(t) + \mathbf{Z}(t) + \mathbf{V}_{si}(t))\Delta t, i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{R}_i(t)$  — вектор положения частицы  $i$  в момент времени  $t$ ;  $\Delta t$  — шаг по времени;  $\mathbf{W}(t)$  — локальная скорость ветра;  $\mathbf{Z}(t)$  — вектор турбулентной диффузии;  $N$  — число частиц;  $\mathbf{V}_{si}(t) = (0, 0, -s_i)$  — терминальная скорость частицы  $i$ , зависящая от её размера. Значения  $s_i$  вычисляются по закону Стокса. Компонентами вектора турбулентной диффузии  $\mathbf{Z}(t)$  являются три нормально распределенных случайных величины  $(z_h, z_h, z_v)$  с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическими отклонениями  $(c_h, c_h, c_v)$ , задающие скорость турбулентной диффузии в горизонтальном и вертикальном направлениях. Значения  $c_h$  и  $c_v$  определяются по следующим формулам:

$$c_h = \sqrt{2K_h/\Delta t}, \quad c_v = \sqrt{2K_v/\Delta t}, \quad (2)$$

где  $K_h$  и  $K_v$  — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно.

Исследование программной реализации модели PUFF, проведенное на серии произошедших эксплозивных извержений вулканов Камчатки, показало наличие в ней ряда ограничений, затрудняющих её использование в оперативном режиме. Они заключаются в получении не всегда корректных результатов расчетов при использовании современных форматов метеорологических данных, подготовленных актуальными средствами обработки прогностической продукции мировых метеорологических центров. Так, например, оригинальная версия не может использовать содержащуюся в них информацию о геопотенциальной высоте. Это приводит к необходимости применения устаревшего программного обеспечения, что в итоге увеличивает общее время, затрачиваемое на проведение расчетов, и не позволяет использовать обновленные версии

продукции численных моделей прогноза погоды с повышенным пространственным разрешением. По результатам исследований проведена модификация алгоритма функционирования программной реализации модели PUFF, позволяющая ускорить процесс моделирования за счет сокращения в 3 раза (до 17,4 сек) времени обработки метеоданных и уменьшить объемы используемого для этого дискового пространства на 21% (все оценки производительности, представленные в диссертации, выполнялись на вычислительной системе с двумя процессорами Intel Xeon E5-2680 2,7 ГГц, 112 ГБ оперативной памяти и системой хранения данных IBM DS3500). Примеры результатов моделирования, выполненного оригинальной и модифицированной версиями программного обеспечения, представлены на рис. 1. Оценка близости  $M$  приведенных результатов расчетов с наблюдаемым положением пеплового облака определялась по формуле

$$M(U_m, U_o) = |U_m \cap U_o| / \sqrt{|U_m| |U_o|}, \quad (3)$$

где  $U_m$  — область, ограниченная альфа-формой набора модельных пепловых частиц,  $U_o$  — оконтуренная специалистами KVERT область на спутниковом снимке, содержащая пепел,  $|\cdot|$  — площадь соответствующей области. Для результатов, полученных оригинальной реализацией PUFF,  $M = 0,12$ , модифицированной — 0,65. Значительное повышение точности моделирования показывает корректность внесенных в программу изменений.

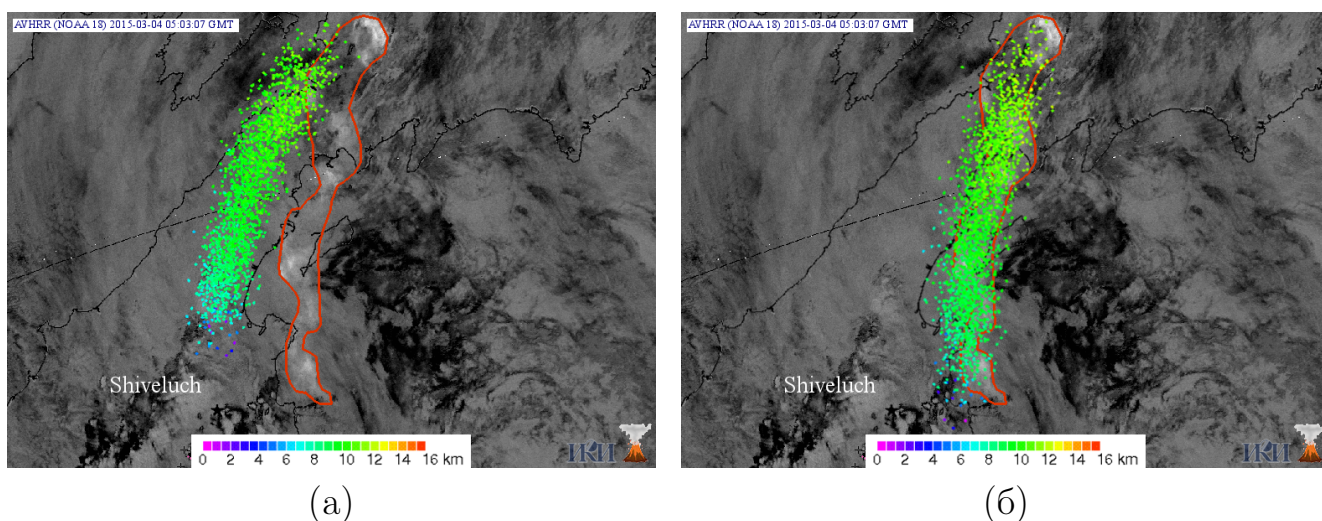


Рис. 1 — Визуализация результатов моделирования распространения пепла по состоянию на 4 марта 2015 г. 05:03 UTC, полученных оригинальной (а) и модифицированной (б) программной реализацией модели PUFF; красным обозначен контур пеплового облака от исследуемого взрывного события на вулкане Шивелуч, произошедшего 3 марта 2015 г. в 22:50 UTC

Для оперативного прогнозирования количественных характеристик пепловых облаков и шлейфов (концентрация пепла на эшелонах полетов самолетов, объем выпавшего на поверхность земли пепла и т. д.) взята модель FALL3D, предложенная А. Costa, G. Macedonio и А. Folch. Указанная эйлерова модель

основывается на следующем уравнении неразрывности:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla((\mathbf{V} - \mathbf{V}_s)C) + \nabla(\rho_*\mathbf{K}\nabla(C/\rho_*)) + S_*. \quad (4)$$

Здесь  $C$  — концентрация некоторого класса пепловых частиц;  $t$  — время;  $\mathbf{V}$  — вектор скорости ветра;  $\mathbf{V}_s$  — скорость осаждения частиц;  $\mathbf{K}$  — тензор (матрица коэффициентов) турбулентной диффузии;  $\rho_*$  — плотность воздуха;  $S_*$  — функция источника;  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ .

При решении начально-краевой задачи для уравнения (4) применяется явный метод конечных разностей. Она решается независимо для каждого класса частиц пепла, то есть взаимодействие частиц пепла разных классов в процессе переноса отсутствует. При этом массовый расход вещества для каждого из классов частиц определяется на основе информации о начальном гранулометрическом составе пепла, а также об общем массовом расходе вещества, который может вычисляться по эмпирическим формулам из работ L. G. Mastin 2009 г., W. Degruyter 2012 г. или M. J. Woodhouse 2013 г.

Для вычисления в оперативном режиме количественных характеристик пепловых облаков для численной модели FALL3D разработан алгоритм автоматического задания параметров начального гранулометрического состава пепла, имеющего билогнормальное распределение размеров частиц. При нахождении параметров распределения, которые неизвестны во время извержения, предложено использовать эмпирические формулы, полученные в 2016 г. A. Costa.

Проведенный анализ алгоритмического обеспечения FALL3D показал, что оно не позволяет проводить моделирование распространения пепловых облаков, пересекающих 180-й меридиан. Данное ограничение является принципиальным, так как оно препятствует прогнозированию распространения пепла в северном регионе Тихого океана. Для решения указанной проблемы была проведена модификация алгоритмического обеспечения модели, обеспечившая учет региональных особенностей распространения пепла, возникающего при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Курил. Примеры результатов моделирования, выполненных оригинальной и модифицированной версиями FALL3D, представлены на рис. 2.

Предложен алгоритм расчета количественных характеристик пепловых облаков, позволяющий повысить оперативность их определения (рис. 3). Он основан на задании области моделирования модели FALL3D на основе анализа результатов, полученных моделью PUFF. Использование указанного алгоритма сокращает время расчетов количественных характеристик пепловых облаков в 4–5 раз (до 10–12 минут).

**В третьей главе** представлено описание разработанной на основе усовершенствованного алгоритмического обеспечения компьютерной системы мониторинга и анализа распространения пепловых облаков от вулканов Камчатки и Курил. Помимо этого, рассмотрены алгоритмы функционирования специализированных компьютерных сервисов, предназначенных для решения задач

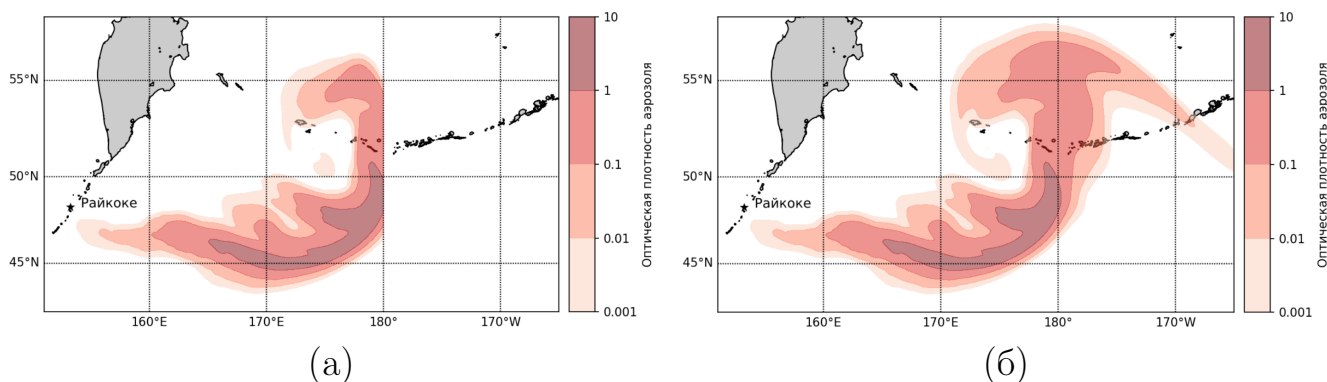


Рис. 2 — Визуализация результатов моделирования распространения пепла, возникшего при эксплозивном извержении вулкана Райкоке, по состоянию на 05:04 UTC 23 июня 2019 г., полученных оригинальной (а) и модифицированной (б) версиями программного пакета FALL3D

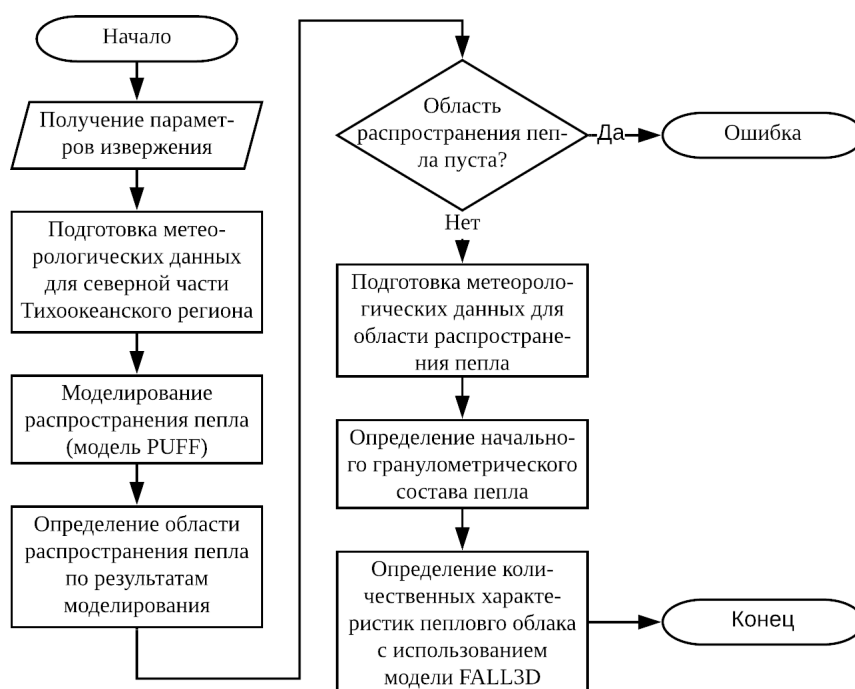


Рис. 3 — Алгоритм определения количественных характеристик пепловых облаков

по информационному взаимодействию основных действующих в России тематических ИС в области вулканологии, визуализации и совместного анализа результатов моделирования, спутниковых и метеорологических данных, а также управления процессами их обработки (рис. 4). В отличие от уже существующих компьютерных систем, разработанное решение, основанное на использовании двух независимых численных моделей, позволяет в автоматическом режиме получать как качественные, так и количественные характеристики пепловых облаков с учетом особенностей исследуемых природных объектов, а также выполнять анализ полученных результатов совместно с различными наблюдательными данными по вулканам Курило-Камчатского региона России.

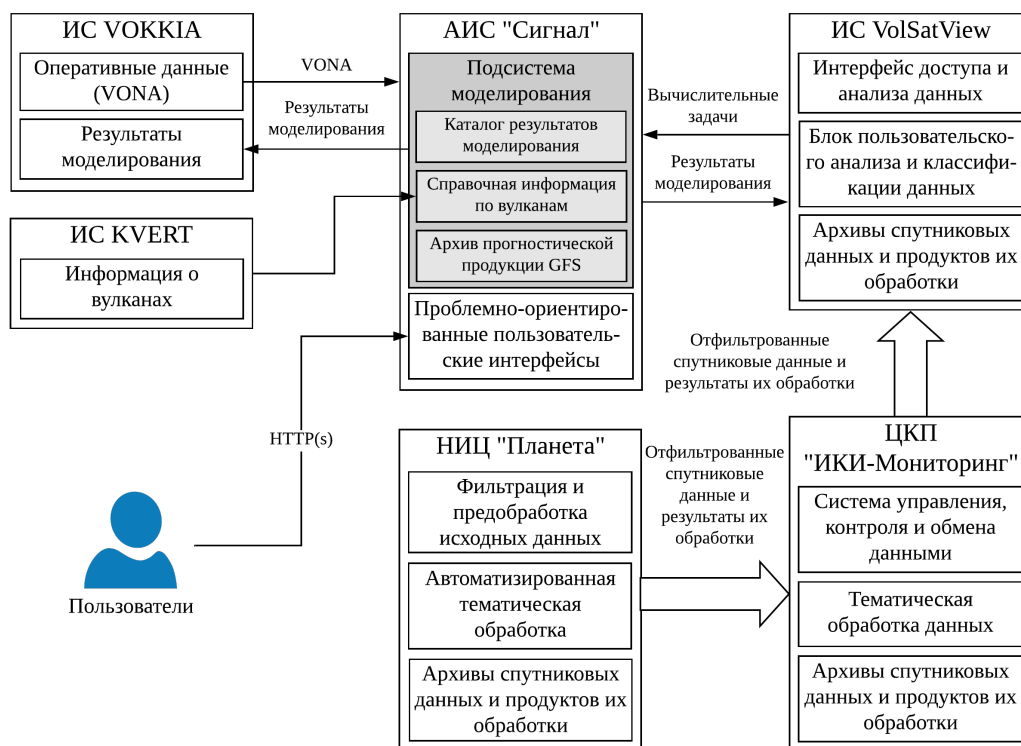


Рис. 4 — Структурная схема компьютерной системы

В качестве технологической основы для развертывания компьютерной системы была использована автоматизированная информационная система (АИС) "Сигнал", обеспечивающая управление ресурсами сетей инструментальных наблюдений Дальневосточного отделения РАН. В её составе был создан специализированный блок "Вулканы". Источниками справочных, оперативных и иных данных по вулканам выступают: объединенная система работы со спутниковыми данными НИЦ "Планета", Центр коллективного пользования "ИКИ-Мониторинг", ИС VOKKIA и KVERT Геопортала ИВиС ДВО РАН. Для выполнения расчетов используются вычислительные ресурсы ЦКП "Центр данных ДВО РАН".

Одним из основных компонентов разработанной компьютерной системы является подсистема моделирования и визуализации процессов распространения пепловых облаков, созданная на основе моделей PUFF и FALL3D. Её назначением является прогнозирование качественных и количественных характеристик пепловых облаков и шлейфов (направление, скорость и высота распространения пепла в атмосфере; мощность пепловых отложений, возникающих при пеплопадах; концентрация пепла на эшелонах полетов самолетов и т. д.). Входными данными для подсистемы является информация об основных параметрах взрывного события, к которой относятся дата и время извержения, его длительность, а также минимальная и максимальная высота выброса пепла.

Основой для автоматического оперативного прогнозирования распространения пепла являются данные мониторинга вулканов, проводимого KVERT.

Разработанный алгоритм функционирования компьютерной системы, обеспечивающий доступ к сообщениям VONA (Volcano Observatory Notice for Aviation), содержащим информацию по произошедшим событиям (дата и время извержения, его длительность, высота выброса пепла, направление перемещения пеплового облака, расстояние от пеплового облака до вулкана и т. д.), выполнение моделирования и визуализации распространения пепла, а также загрузку результатов расчетов для их отображения на соответствующих web-страницах сайта KVERT, представлен на рисунке 5.

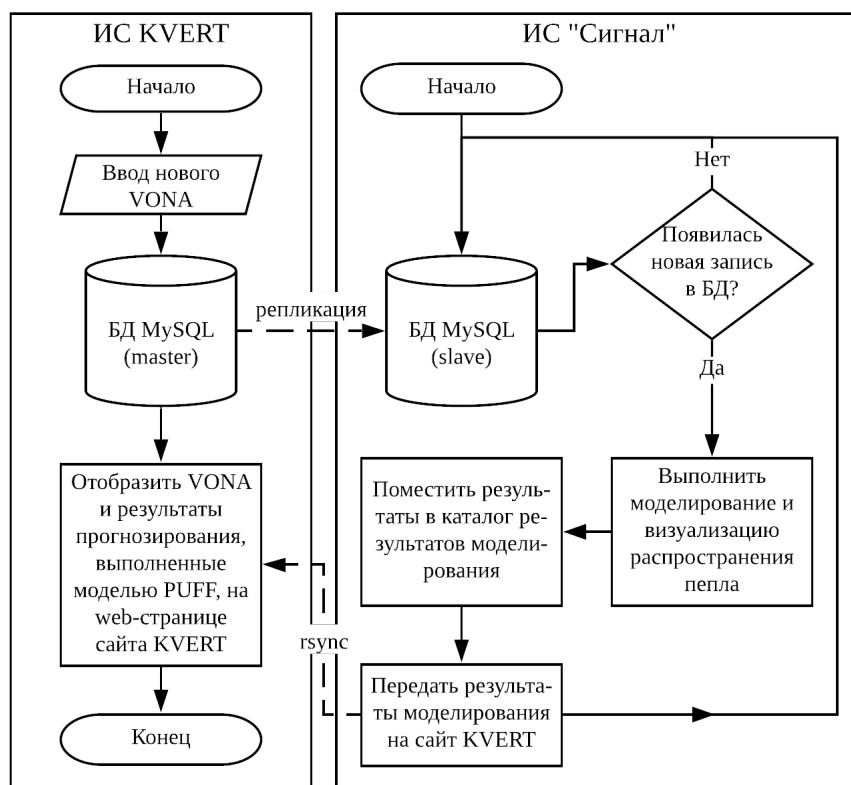


Рис. 5 — Блок-схема алгоритма оперативного режима функционирования компьютерной системы (пунктиром обозначено взаимодействие ИС)

Помимо автоматического режима расчетов, применяемого при выпуске или обновлении VONA, реализован экспертный режим работы подсистемы моделирования. В главе рассматриваются созданные проблемно-ориентированные пользовательские интерфейсы, предоставляющие возможность специалистам провести интерактивный расчет качественных и количественных характеристик пепловых облаков с детальным указанием исходных параметров произошедшего события и требуемых параметров моделей. Получаемые результаты моделирования также заносятся в общий каталог, доступ к которому имеют все тематические системы, включенные в информационный обмен. Указанный режим является востребованным вулканологами при проведении исследований отдельных исторических событий.

При моделировании распространения пепла, выполняемого в обоих режимах функционирования компьютерной системы, используется прогностическая

продукция глобальной модели GFS, поступающая из локального архива, пополняемого с серверов Национальной метеорологической службы США. На основе информации о времени и длительности эксплозивного события из архива прогностической продукции формируется коллекция, содержащая оптимальные на момент расчетов метеорологические данные, которые далее используются при моделировании. Для этого разработан специальный алгоритм, выполняющий анализ состояния локального архива и выборку актуальных метеоданных. В настоящее время реализована поддержка работы с продукцией модели GFS, имеющей пространственное разрешение 0,5 градуса.

Благодаря проведенным работам по усовершенствованию алгоритмического обеспечения (см. гл. 2), а также реализованным алгоритмам функционирования компьютерной системы, обеспечивающим доступ к информации по произошедшим эксплозивным событиям и актуальным метеорологическим данным, от выпуска VONA до получения прогноза распространения пепла в пределах западной части Северной Пацифики с использованием модели PUFF на 24 часа проходит не более 6–7 минут. Эти результаты открывают новые возможности для разработки методов и инструментов повышения точности прогнозов, которые могут быть реализованы на основе совместного анализа результатов численных расчетов с данными оперативных спутниковых наблюдений. Например, с использованием информации геостационарного спутника Himawari-8, покрывающей регион исследований, данные которого поступают в информационную систему “Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил” (ИС VolSatView) каждые 10 минут.

Для организации информационного взаимодействия с ИС VolSatView разработан специализированный сервис, основанный на методологии REST. С использованием протокола HTTP(s) обеспечен доступ к каталогу с результатами расчетов, а также реализована возможность удаленной постановки заданий на проведение вычислений с использованием модели PUFF. На основе поставляемых данных и разработанных средств управления подсистемой моделирования в ИС VolSatView были созданы специальные программные средства для визуализации результатов моделирования распространения пепловых облаков и проведения их сравнительного анализа с фактическими данными, полученными методами ДЗЗ. При этом непосредственно в ИС VolSatView можно инициировать проведение моделирования с различными параметрами, далее выбирая реализации, которые наиболее полно согласуются с данными спутниковых наблюдений. Результаты моделирования визуализируются в картографическом интерфейсе системы в виде набора точек (частиц пепла), цвет которых соответствует высоте нахождения пепловых частиц в заданный момент времени. В пользовательском интерфейсе реализованы инструменты для просмотра результатов (географическое положение частиц и их высота) по каждому шагу моделирования. Исследователь также имеет возможность заказать отображение пепловых частиц на интересующих его высотах. Поддерживается



представление результатов моделирования совместно с различными информационными продуктами, получаемыми на основе спутниковых данных.

**Четвертая глава** посвящена практической апробации полученных результатов и разработанных на их основе программных средств. Исследования проводились на основе анализа результатов расчетов, полученных как в режиме автоматического оперативного прогнозирования распространения пепловых облаков и шлейфов, так и в формате комплексного (экспертного) изучения отдельных, в том числе исторических, взрывных событий на вулканах Камчатки и Курил. В главе представлены некоторые результаты указанных работ, а также, для демонстрации функциональности разработанной компьютерной системы, рассмотрен пример восстановления параметров взрывного события путем совместного анализа результатов моделирования с данными ДЗЗ.

Использование модели PUFF иллюстрируется на примере катастрофического взрывного извержения вулкана Шивелуч, произошедшего 11 ноября 1964 г. в 19:07 UTC. Приводятся результаты моделирования распространения пепла, возникшего во время этого извержения, выполняется анализ доступных инструментальных данных и формализация ключевых параметров для численного моделирования. По результатам проведенных работ делается заключение о том, что использование адаптированной модели позволило получить хорошее совпадение наблюдаемых и модельных временных характеристик движения эруптивной тучи вулкана.

В качестве события для анализа возможностей усовершенствованного алгоритмического обеспечения FALL3D было рассмотрено взрывное извержение вулкана Шивелуч, произошедшее 10 апреля 2019 года. В главе анализируются результаты моделирования распространения пеплового облака с использованием прогнозных метеорологических данных. Проводится сравнение положения и формы пеплового облака с результатами детектирования вулканического пепла, полученными методом разности радиояркостных температур в ИС VolSatView (рис. 6). Делается вывод о том, что прогнозные положение и форма облака вулканического пепла достаточно хорошо совпадают с фактическими данными (значение метрики (3), при вычислении которой в качестве области  $U_m$  была взята область, занятая пеплом на рис. 6б, составило 0,61). Приводятся результаты оценки концентрации частиц пепла в исследуемом пепловом облаке на эшелонах FL200 и FL250, которые показывают, что она превышала разрешенный для полетов самолетов порог в  $4 \text{ мг/м}^3$  на всем временном отрезке моделирования (около 15 ч после извержения). Для оценки возможности моделирования параметров пепла, выпавшего на поверхность земли, выполняется сравнение положения отложений пепла по данным прибора MODIS спутника Aqua с визуализацией мощности отложений пепла, полученных по результатам расчетов.

В главе демонстрируется возможность использования разработанной компьютерной системы для восстановления параметров взрывных событий на



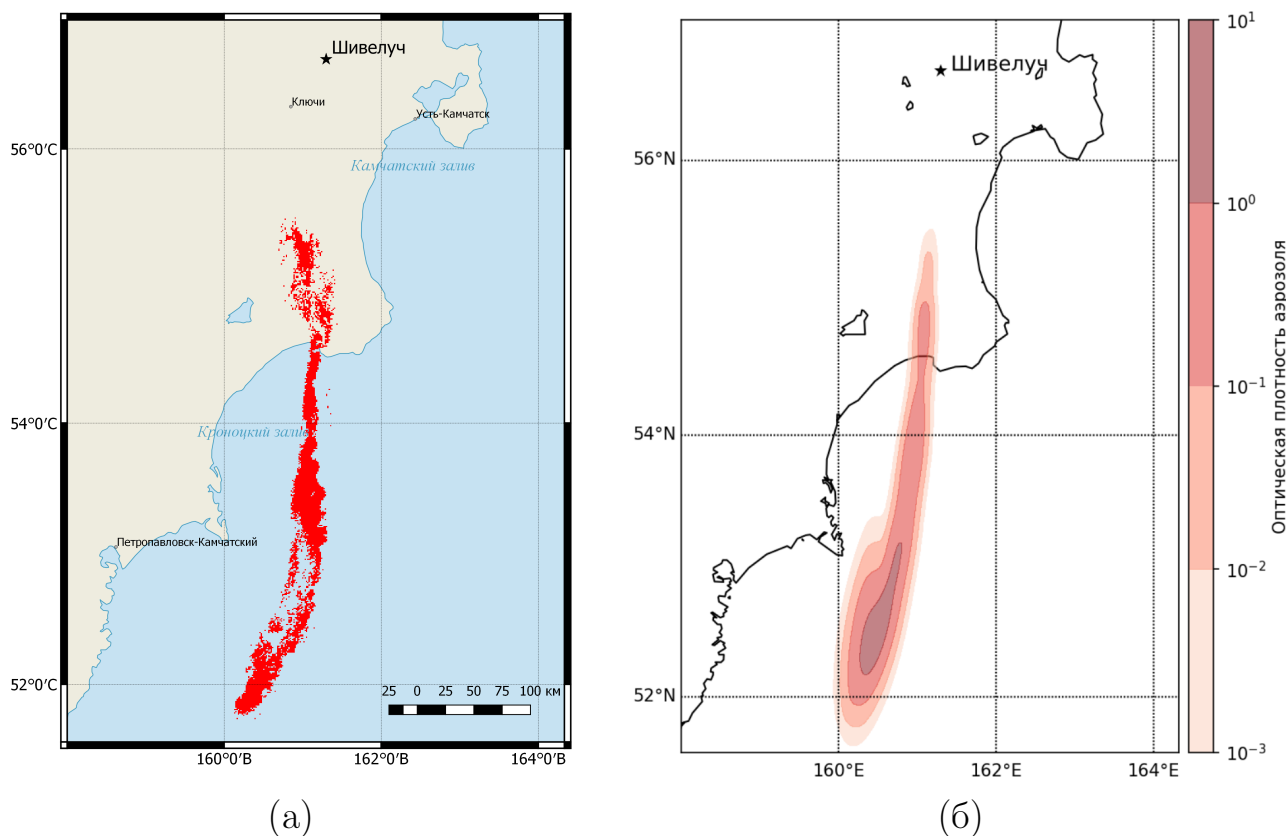


Рис. 6 — Результаты детектирования вулканического пепла методом разности радиоярких температур (каналы 11 и 12 мкм) по данным прибора AVHRR спутника NOAA-18 в 8:43 UTC 10.04.2019 в ИС VolSatView (а) и визуализация результатов моделирования распространения пепла (оптическая плотность аэрозоля) в 8:43 UTC 10.04.2019 в АИС “Сигнал” (б)

примере извержения вулкана Жупановский, произошедшего 12 февраля 2016 года (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2016-20>). Для этого приводится сравнение результатов моделирования распространения пеплового шлейфа, выполненного с использованием разработанных решений, и результатов спутниковых наблюдений.

На указанном примере показывается, что, варьируя параметры моделирования, в частности — время выброса, можно подобрать время (около 20:00 UTC 12.02.2016), обеспечивающее оптимальное совпадение результатов расчетов и спутниковых наблюдений (рис. 7) при максимальном значении метрики (3), равном 0,79. Следует обратить внимание, что при таких начальных условиях моделирования наблюдается наиболее полное совпадение не только основной области, в которой расположен пепловый шлейф в момент сравнения (23:55 UTC 12.02.2016), но и его форма и тенденции распространения. При моделировании с более ранним временем начала события шлейф смещен на юг, а с более поздним — на север по сравнению с данными спутниковых наблюдений.

Аналогичным образом можно восстанавливать не только время начала эксплозивных событий, но и их длительность, а также высоты подъема и перемещения пепла.

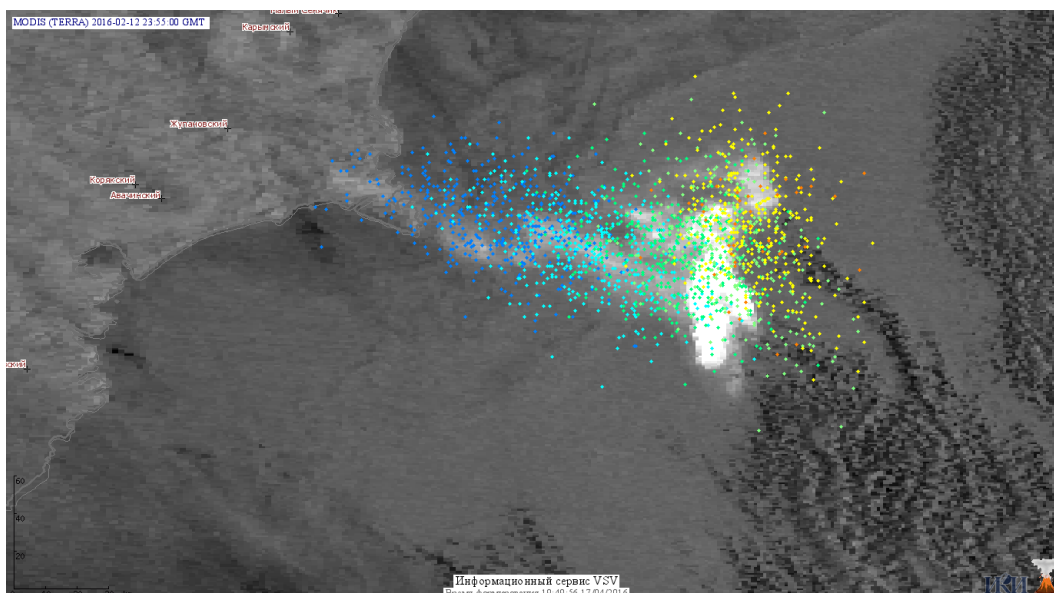


Рис. 7 — Визуализация результатов моделирования пеплового облака с предполагаемым временем начала выброса пепла в 20:00 UTC; черно-белое изображение — разница каналов 11–12 мкм по данным прибора MODIS (спутник Terra) на 23:55 UTC 12 февраля 2016 года

В целом, за период эксплуатации с октября 2016 г. по ноябрь 2019 г. разработанной компьютерной системы выполнено 933 расчета распространения пепла от вулканов Камчатки и Курил. Экспертная оценка учеными KVERT ИВиС ДВО РАН, основанная на сравнительном анализе результатов численного моделирования с фактической информацией, позволила сделать вывод о высокой точности получаемых прогнозов.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы и выводы о перспективах развития и применения результатов проведенных исследований.

В **приложениях** представлены копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, фрагменты алгоритмического кода основных приложений и акты внедрения.

**Основные результаты работы.** В ходе выполненных исследований получены следующие основные результаты:

1. Выполнен анализ численных моделей распространения вулканического пепла в атмосфере, позволяющих определять качественные и количественные характеристики пепловых облаков и шлейфов.
2. Усовершенствовано алгоритмическое обеспечение для моделирования распространения вулканического пепла в атмосфере, а также проведена его адаптация с учетом особенностей вулканов Камчатки и Курил. Это, в частности, позволило сократить время расчета количественных характеристик пепловых облаков в 4–5 раз.
3. Разработана компьютерная система для оперативного прогнозирования и визуализации распространения облаков вулканического пепла.

4. Реализованы инструменты для совместного анализа результатов численного моделирования распространения пепловых облаков и спутниковых данных, а также показана возможность их использования для восстановления характеристик взрывных событий.
5. На примере анализа отдельных взрывных извержений вулканов Камчатки проведена практическая апробация разработанных алгоритмов и программных средств.

## Основные публикации автора по теме диссертации

### В изданиях из списка ВАК РФ

1. Сервис-ориентированный интерфейс для доступа к научным данным в области исследования и оперативного мониторинга состояния вулканов Камчатки и Северных Курил / С. П. Королёв [и др.] // Системы и средства информатики. — 2018. — Т. 28, № 2. — С. 88—98.
2. *Мальковский, С. И.* Развитие информационной системы численного моделирования распространения пепловых облаков от вулканов Камчатки и Курил / С. И. Мальковский, А. А. Сорокин, О. А. Гирина // Вычислительные технологии. — 2019. — Т. 24, № 6. — С. 79—89.

### В изданиях, входящих в международную базу цитирования Web of Science

3. *Malkovsky, S. I.* Improving the system of numerical simulation of volcanic ash propagation using the PUFF model / S. I. Malkovsky, A. A. Sorokin, S. P. Korolev // Russian Journal of Earth Sciences. — 2017. — Vol. 17, no. 5. — P. 1—6.
4. Satellite Observations and Numerical Simulation Results for the Comprehensive Analysis of Ash Cloud Transport during the Explosive Eruptions of Kamchatka Volcanoes / A. A. Sorokin [et al.] // Russian Meteorology and Hydrology. — 2017. — Vol. 42, no. 12. — P. 759—765.

### В изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus

5. Интегрированная программная платформа для комплексного анализа распространения пепловых шлейфов при взрывных извержениях вулканов Камчатки / А. А. Сорокин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2016. — Т. 13, № 4. — С. 9—19.
6. Применение данных спутника Himawari для мониторинга вулканов Камчатки / О. А. Гирина [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2017. — Т. 14, № 7. — С. 65—76.

7. Создание и развитие информационной системы “Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил” / О. А. Гирина [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16, № 3. — С. 249—265.
8. *Сорокин, А. А.* Автоматизированная информационная система “Сигнал”: исследование и оперативный мониторинг опасных природных явлений в Дальневосточном регионе / А. А. Сорокин, С. П. Королев, С. И. Мальковский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16, № 3. — С. 238—248.

## Монографии

9. Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки / О. А. Гирина [и др.]. — Петропавловск-Камчатский : ИВиС ДВО РАН, 2018. — 192 с.

## Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

10. *Мальковский, С. И.* Программный интерфейс модели PUFF для численного моделирования распространения пепла при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки / С. И. Мальковский, С. П. Королев. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661553.
11. *Королев, С. П.* REST-сервис для доступа к данным оперативного мониторинга вулканов Камчатки / С. П. Королев, А. А. Сорокин, С. И. Мальковский. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661552.

Мальковский Сергей Иванович

## АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЕПЛОВЫХ ОБЛАКОВ ОТ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ И КУРИЛ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 26.03.2020. Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ 85.

Отдел оперативной полиграфии издательства  
Тихоокеанского государственного университета.  
680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.