Создание и развитие информационной системы «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил»

О. А. Гирина[1], Е. А. Лупян[2], Д. В. Мельников[1], А. В. Кашницкий[2], И. А. Уваров[2], А. А. Бриль[2], А. М. Константинова[2], М. А. Бурцев[2], А. Г. Маневич[1], Е. И. Гордеев[1], Л. С. Крамарева[3], А. А. Сорокин[4], С. И. Мальковский[4], С. П. Королёв[4]

[1] *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*
Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия
E-mail: girina@kscnet.ru

[2] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru

[3] *Дальневосточный центр НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия*

[4] *Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия*

В 2011 г. совместно с экспертами Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН), Института космических исследований РАН (ИКИ РАН), Дальневосточного центра НИЦ «Планета» (ДЦ НИЦ «Планета») и Вычислительного центра ДВО РАН (ВЦ ДВО РАН) была создана первая версия информационной системы «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (ИС VolSatView). Система предоставляет специалистам информацию для решения задач дистанционного мониторинга вулканической активности, включая оперативные и долговременные архивы данных дистанционного зондирования Земли. Созданы различные веб-интерфейсы, которые позволяют получать доступ к распределённым архивам данных и вычислительным ресурсам, необходимым для их анализа и обработки. При этом для работы с системой не требуется специализированных настольных приложений, пользователям достаточно иметь веб-браузер и подключение к сети Интернет. С момента ввода в эксплуатацию ИС VolSatView велось постоянное расширение её возможностей, связанное как с объёмом и составом информации, поступающей в систему, так и с развитием инструментов её анализа, в том числе позволяющих проводить моделирование процессов распространения пепловых шлейфов. К настоящему времени накоплен достаточно большой опыт использования системы специалистами-вулканологами для решения задач постоянного оперативного мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил, а также изучения вулканов. Работа посвящена описанию текущих возможностей ИС VolSatView, которые были реализованы в системе в последние годы, в том числе для определения высоты пепловых шлейфов и анализа временных рядов данных.

Ключевые слова: вулкан, Камчатка, Курилы, спутниковый мониторинг, VolSatView, информационная система, дистанционное зондирование Земли

Одобрена к печати: 05.06.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265

Введение

Согласно данным Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT — Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team), на Камчатке и Северных Курилах расположено 36 действующих вулканов, из них от трёх до восьми ежегодно находятся в состоянии извержения (http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/) (Гирина и др., 2017; Gordeev, Girina, 2014). Для решения задач мониторинга активности вулканов и изучения геологического эффекта их извержений требуется применение спутниковых систем дистанционного зондирования. Незаменимость спутниковых данных объясняется множеством факторов: разнообразие задач, обширная и труднодоступная территория расположения вулканов, быстрое распространение пепловых облаков и шлейфов на многие десятки и сотни километров, в том числе над океаном, и др.

Доступные в настоящее время спутниковые данные, пригодные для решения вулканологических задач, чрезвычайно разнообразны по диапазонам электромагнитного спектра, пространственным разрешениям, периодичности и источникам. Следует сказать, что для каждого типа данных и каждого спутника характерна своя специфичная схема получения данных, организации их обработки и хранения. Разные типы информации в каждом случае требуют также специфических способов анализа и интерпретации. Отдельной проблемой являются объёмы получаемой сегодня спутниковой информации по региону, подверженному влиянию активности вулканов Камчатки и Курил. По нашей оценке, общий объём данных только из открытых спутниковых систем на 2019 г. составляет не менее 250 Гбайт в сутки. Отметим также, что для мониторинга и изучения вулканической активности необходим комплексный анализ спутниковой информации совместно с данными наземных наблюдений, исторической информацией об извержениях, метеорологическими данными и результатами компьютерного моделирования.

В таких условиях выполнение всех описанных выше задач только специалистами, изучающими вулканы, затруднительно. К тому же многие задачи, связанные с получением, обработкой, хранением и анализом спутниковой информации, сегодня уже решены в различных научных центрах и организациях. Всё это послужило поводом для создания комплексной информационной системы (ИС) для изучения активности вулканов Камчатки и Курил разными специалистами из различных организаций. Такая система была создана большим коллективом авторов из Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН), Института космических исследований РАН (ИКИ РАН), Вычислительного центра ДВО РАН (ВЦ ДВО РАН) и Дальневосточного центра НИЦ «Планета» (ДЦ НИЦ «Планета») и получила название «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил (VolSatView)» (далее — ИС VolSatView; http://volcanoes.smislab.ru). VolSatView является специализированной информационной системой, работающей в онлайн-режиме в веб-интерфейсе, которая обеспечивает специалистов, выполняющих мониторинг и изучение вулканической активности на Камчатке и Курилах, удобным доступом к различным спутниковым данным и инструментам для их анализа. Возможности системы уже достаточно подробно описаны в публикациях (см., например, (Гордеев и др., 2014; Ефремов и др., 2012; Gordeev et al., 2016; Sorokin et al., 2017)). С момента ввода в эксплуатацию ИС VolSatView постоянное расширение её возможностей связанно как с объёмом и составом информации, поступающей в систему, так и с развитием инструментов её анализа. Настоящая статья посвящена представлению текущих возможностей системы, при этом особое внимание уделяется функционалу, реализованному в последние годы.

Основные решаемые задачи

Основной целью создания информационной системы мониторинга вулканов являлось обеспечение специалистов-вулканологов удобными инструментами для работы с разнородной информацией, поступающей из различных источников. В разработанной системе все инструменты для анализа спутниковых данных предоставляются в онлайн-режиме из любого места подключения к сети Интернет только с помощью веб-браузера, без скачивания больших объёмов данных и необходимости установки какого-либо дополнительного программного обеспечения. Специалисты могут использовать все возможности системы удалённо, применяя для анализа распределённые вычислительные ресурсы различных центров хранения и обработки информации. Для этого в системе решены следующие основные задачи:

- автоматическое получение спутниковых данных из различных источников и размещение их в собственных архивах или автоматизированное получение в режиме реального времени данных из архивов сторонних систем непосредственно в момент, когда исследователю необходимо провести их анализ;
- осуществление автоматической обработки данных для получения различных информационных продуктов, использующихся для мониторинга и изучения вулканической активности;

- ведение архивов спутниковых данных и результатов их обработки, в том числе постоянное их пополнение;
- предоставление через веб-интерфейс различных интерактивных инструментов анализа и обработки имеющихся в системе данных.

Архитектура ИС VolSatView

Основные информационные узлы и их взаимодействие

В системе ИС VolSatView используются значительные объёмы данных, включая архивы многолетних наблюдений, накопленные различными научными учреждениями. Организована работа с большим количеством информации, поступающей из разных источников. Источниками спутниковой информации дистанционного зондирования в VolSatView являются российские и зарубежные территориально распределённые центры приёма, обработки, хранения и распространения данных. Процедуры обработки этой информации, а также её комплексного анализа совместно с данными, поступающими из других информационных систем, реализованы на базе уже существующих ресурсов научных центров. В связи с вышесказанным архитектура ИС VolSatView, ориентированная на обеспечение работы с распределёнными информационными и вычислительными ресурсами, была построена на основе уже имеющихся возможностей различных научных центров (*рис. 1*, см. с. 252). Это позволяет пользователям системы работать с данными, оперативно поступающими из разных источников, а также с историческими архивами данных и результатов их обработки, хранящимися в ведущих научных центрах.

В ИС VolSatView реализовано четыре основных информационных узла (ИУ), которые расположены в городах Петропавловск-Камчатский (ИВиС ДВО РАН), Хабаровск (ДЦ НИЦ «Планета» и ВЦ ДВО РАН) и Москва (ИКИ РАН). Также работу с данными некоторых российских спутников обеспечивает дополнительный узел в Европейском центре (ЕЦ) НИЦ «Планета» (Москва). На *рис. 1* показаны основные информационные потоки между этими узлами и главные функции каждого узла. Взаимодействие между узлами системы осуществляется на основе сети Интернет и телекоммуникационной инфраструктуры ВЦ ДВО РАН и Центра коллективного пользования «Центр данных ДВО РАН» (Sorokin et al., 2017). В каждом узле, кроме ИУ ЕЦ НИЦ «Планета» (Москва), установлен полнофункциональный интерфейс, который обеспечивает работу со всей информацией, имеющейся в системе. Также на *рис. 1* показаны внешние по отношению к ИС VolSatView информационные системы, которые могут являться как поставщиками данных, так и потребителями. Опишем далее последовательно все узлы системы, их функции и решаемые задачи:

Центральный информационный узел (ЦИУ), расположенный в ИВиС ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский), ориентирован на обеспечение вулканологам (в первую очередь специалистам KVERT) оперативного доступа к различной информации, необходимой для мониторинга и изучения вулканической активности. В ЦИУ размещены архивы спутниковых данных по региону Камчатки и Курил. С 2015 г. работает приёмная станция ИВиС ДВО РАН, которая обеспечивает получение данных со спутников Terra, Aqua, Suomi NPP и JPSS-1. В ЦИУ налажено оперативное автоматизированное пополнение архивов из других центров, включая поступление метеорологической информации. Также организовано взаимодействие с ИС VOKKIA (Volcanoes of Kurile-Kamchatka Island Arc) (Гирина и др., 2018; Романова и др., 2012) и KVERT (Гирина и др., 2018; Romanova, Girina, 2018).

ИУ ДЦ НИЦ «Планета» (Хабаровск). В узле организован автоматический приём данных спутника Himawari-8 из Японского агентства аэрокосмических исследований (Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA), а также от спутниковых систем NOAA, Terra, Aqua, NPP, «Метеор М», «Канопус», «Ресурс» и др. Узел обеспечивает автоматическую обработку и хранение этих данных для формирования различных информационных продуктов, использующихся в ИС VolSatView, а также автоматическую передачу данных в ЦИУ и ИУ ВЦ ДВО РАН.

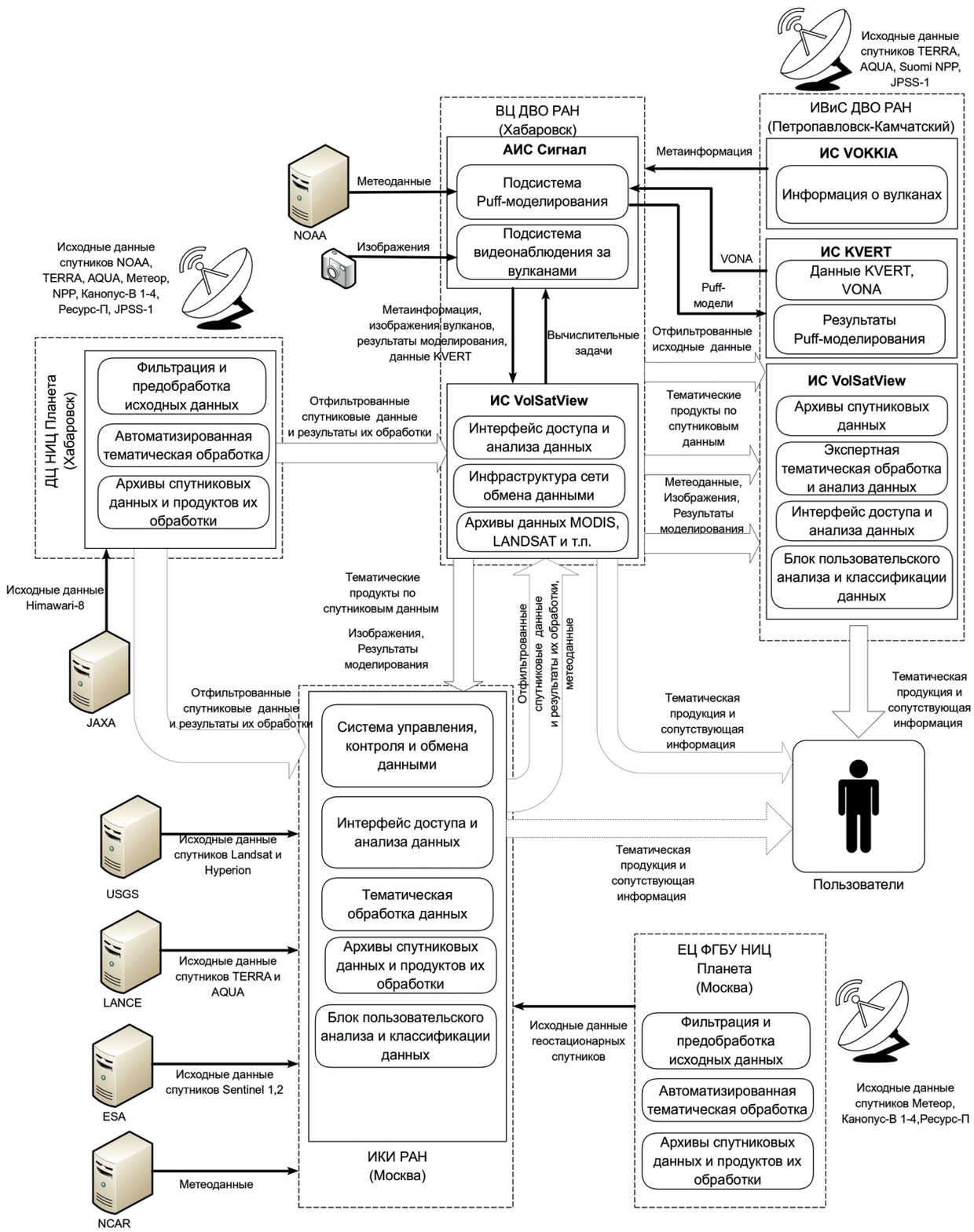

Рис. 1. Архитектура построения ИС VolSatView

ИУ ВЦ ДВО РАН (Хабаровск) обеспечивает ведение долговременных и оперативных архивов данных, поступающих в ИС VolSatView из ДЦ НИЦ «Планета». Также на базе его ресурсов организовано взаимодействие с автоматизированной ИС (АИС) «Сигнал» (Королёв и др., 2014) для обеспечения моделирования траекторий движения пепловых облаков и получения данных из системы видеонаблюдения за вулканами Камчатки.

ИУ ИКИ РАН (Москва) обеспечивает оперативный сбор и автоматическую обработку данных из различных российских и зарубежных центров, необходимых для работы ИС VolSatView, включая данные спутниковых систем Landsat, Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, «Метеор-М», «Канопус-В» и др., а также метеорологическую информацию из открытых источников. На базе возможностей ИУ ИКИ РАН организован оперативный доступ к данным, предоставляемым различными информационными сервисами Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015б), в том числе к долговременным архивам спутниковых данных. Часть обработанной информации автоматически поступает в ИУ ВЦ ДВО РАН. Также ИУ ИКИ РАН обеспечивает работу в ИС VolSatView интерактивных инструментов для обработки и анализа спутниковых данных, о которых будет рассказано далее.

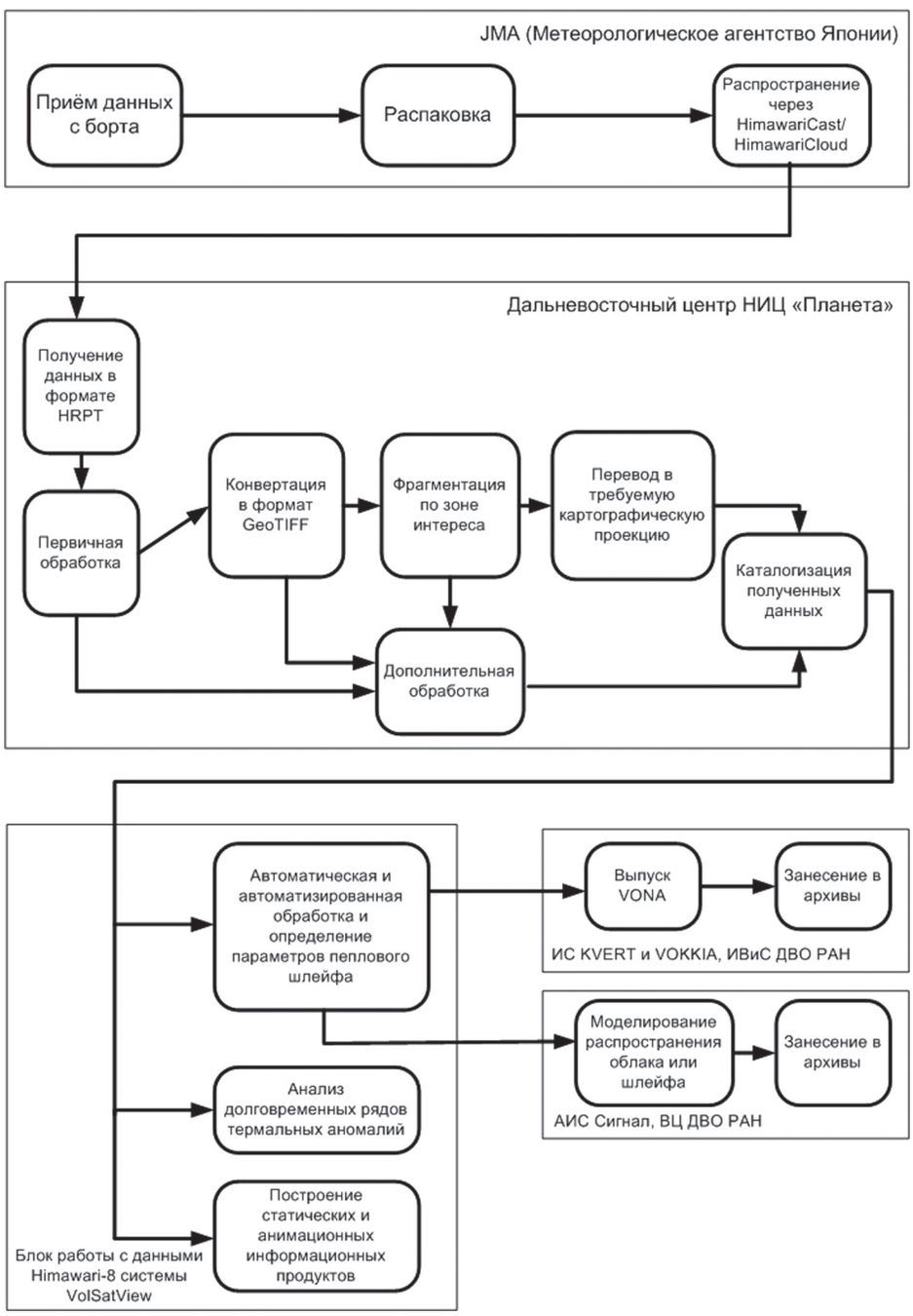

Рис. 2. Схема организации оперативного получения, обработки и использования информации для решения задач мониторинга и исследования вулканов Камчатки и Курил на основе данных спутника Himawari-8

ЕЦ НИЦ «Планета» (Москва) обеспечивает пользователям ИС VolSatView возможность анализа информации, получаемой со спутников «Метеор», «Канопус-В», «Ресурс-П», которая принимается, обрабатывается и хранится в данном узле. Это единственный узел, в котором не установлен интерфейс работы с данными ИС VolSatView.

Взаимодействие центров на примере поступления данных Himawari-8

Рассмотрим осуществление обмена данными между центрами в рамках приведённой на *рис. 1* общей схемы архитектуры системы на примере схемы поступления и использования данных геостационарного японского спутника Himawari-8.

Полный поток данных, получаемых со спутника Himawari-8, распространяется уполномоченными организациями национальных метеорологических агентств в рамках соглашений Всемирной метеорологической организации. В России это ДЦ НИЦ «Планета» (http://www.dvrcpod.ru/), через который были организованы получение и обработка данных со спутника Himawari-8 и их интеграция в ИС VolSatView для обеспечения оперативного мониторинга вулканов Камчатки и Курил (*рис. 2*, см. с. 253).

Основной особенностью реализованной схемы является обеспечение получения постоянного потока данных (до 144 наблюдений в сутки) с задержкой не более 30 мин от времени съёмки, произведённой спутником. Полученные в ИУ ВЦ ДВО РАН (Хабаровск) данные далее не пересылаются, однако метаинформация о них рассылается по всем узлам системы. В результате данные спутника Himawari-8 хранятся в системе только в одном центре, однако могут быть получены пользователем при работе с любым центром.

Данные в ИС VolSatView

Спутниковые данные дистанционного зондирования

Автоматическое поступление спутниковой информации, её хранение в распределённых архивах и предоставление для анализа и обработки пользователям и внешним информационным системам в автоматическом и автоматизированном режимах осуществляется на базе многолетних разработок ИКИ РАН (Лупян и др., 2015а; Прошин и др., 2016). Основные типы информации в ИС VolSatView и задачи, для решения которых она используется, представлены в *табл. 1* (см. с. 255). Важно отметить, что в VolSatView доступны не только оперативные данные, но и многолетние архивы наблюдений Камчатки и Курил. В основном возможности доступа к долговременным архивам спутниковых данных и результатам их обработки предоставляет система ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015б). Базовые характеристики основных архивов, доступных в системе, приведены в *табл. 2* (см. с. 256). В ней указаны только «статические» продукты, которые формируются и физически хранятся в доступных ИС VolSatView архивах. Кроме этого, в VolSatView имеется значительный набор динамических информационных продуктов, которые формируются в режиме реального времени в момент запроса их пользователями системы.

Метеорологические данные

Интеграция метеорологических данных в ИС VolSatView обусловлена необходимостью их совместного анализа со спутниковыми данными и другой информацией, использующейся при изучении и мониторинге вулканической активности. Поэтому в VolSatView ведётся оперативно пополняемый архив прогнозных метеоданных, полученных с помощью модели GFS Национальных центров прогнозов по окружающей среде США (NCEP). Прогнозы описывают состояние атмосферы с интервалом в 3 ч на срок до 10 дней и с интервалом 12 ч на срок до 16 дней. Пространственное разрешение данных составляет 0,25°.

Таблица 1. Основные виды спутниковой информации в ИС VolSatView
(* цифры приведены для районов от Южных Курил до северной части Камчатки)

Диапазон	Разрешение	Прибор (спутник)	Частота наблюдения	Основные решаемые задачи
Оптика 0,4–0,9 мкм	Более 2 км	AHI (Himawari-8)	10 мин	• Детектирование пепловых шлейфов и оценка их параметров; • картирование и определение характеристик отложений
	1 км	MODIS (Terra/Aqua), AVHRR (NOAA), VIIRS (Suomi NPP, JPSS1), МСУ МР («Метеор-М»)	От 15 до 25 в сутки*	
	100–300 м	Terra/Aqua (MODIS), VIIRS (Suomi NPP, JPSS1)	От 5 до 8 в сутки*	
	10–60 м	TM, ETM+, OLI (Landsat), MSI (Sentinel-2A/B), МСС (серия спутников «Канопус-В»), КМСС («Метеор-М»)	От 1 раза в 2 сут до 1 раза в сутки*	
	Лучше 10 м	ПСС (серия спутников «Канопус-В»), Геотон-П («Ресурс-П»), ORBVIEW-3	Несколько раз в год по отдельным участкам	
Ближний ИК 1,4–3,9 мкм	Более 2 км	AHI (Himawari-8)	10 мин	• Выделение аномалий и оценка характеристик температуры; • анализ характеристик термальных аномалий; • анализ характеристик пепловых облаков и шлейфов
	1 км	MODIS (Terra, Aqua), VIIRS (Suomi NPP, JPSS1), AVHRR (NOAA), МСУ МР («Метеор-М»)	От 15 до 25 в сутки*	
	200–800 м	VIIRS (Suomi NPP, JPSS1), МС-ИК-СРМ («Канопус-В ИК»)	От 5 до 8 в сутки*	
	10–30 м	TIRS (Landsat), MSI (Sentinel-2A/B)	От 1 раза в 5 сут до 1 раза в 3 сут*	
ИК 11–12 мкм	Более 2 км	AHI (Himawari-8)	10 мин	• Выделение аномалий и оценка характеристик температуры; • детектирование пепловых шлейфов и оценка их параметров; • анализ характеристик термальных аномалий; • анализ характеристик пепловых облаков и шлейфов
	1 км	Terra/Aqua (MODIS), VIIRS (Suomi NPP, JPSS1), AVHRR (NOAA), МСУ МР («Метеор-М»)	От 15 до 25 в сутки*	
	200 м	МСУ-ИК-СМР	1 раз в 2–3 дня	
	60 м	TIRS (Landsat)	1 раз в 14 дней	
Радиолокаторы	20×40 м	C_SAR (Sentinel-1A/B)	1 раз в 5 дней	• Анализ вулканических отложений
Гиперспектрометры	30 м	Hiperion (EO-1)	Несколько раз в год	• Анализ вулканических отложений; • анализ пепловых облаков и шлейфов

Таблица 2. Архивы основных спутниковых данных, доступные в ИС VolSatView по состоянию на 1 мая 2019 г. (только «статические» продукты, которые формируются и физически хранятся в архивах)

Спутники	Приборы	Тип данных (уровень обработки)	Источники данных	Диапазон дат	Кол-во сеансов (сцен)	Объём продуктов, Тбайт	Средняя скорость поступления, Гбайт/день
Himawari-8	AHI	Продукты уровня (L1B)	НИЦ «Планета» (JAXA)	25.08.2015	96 420	18	27
NOAA 15 NOAA 16 NOAA 18 NOAA 19	AVHRR	Продукты уровня (L1B)	НИЦ «Планета»	19.03.2014	35 807	2,8	2
AQUA TERRA	MODIS	Продукты уровня (L1B). Тематические продукты по данным LANCE (L2): • «Дымы и облачность»; • «Пепел» (разность каналов 11–12 мкм); • «Термальная аномалия»	ИКИ РАН, НИЦ «Планета», ИВиС ДВО РАН	25.03.2012	118 216	38	20,2
Suomi NPP JPSS1 (NOAA 20)	VIIRS	Продукты уровня (L1B). Тематические продукты по данным LANCE (L2): • «Дымы и облачность»; • «Пепел» (разность каналов 11–12 мкм); • «Термальная аномалия»	НИЦ «Планета», ИВиС ДВО РАН	03.05.2013	20 882	7,6	8,6
«Метеор-М» № 1, 2	МСУ-МР	Продукты уровня (L1B). Тематические продукты по данным LANCE (L2): • «Дымы и облачность»; • «Пепел» (разность каналов 11–12 мкм); • «Термальная аномалия»	НИЦ «Планета»	07.03.2014	48 394	5,9	11
«Метеор-М» № 1, 2	КМСС	Продукты уровня (L1B)	НИЦ «Планета»	01.10.2011	77 387	12	13
Landsat-4 Landsat-5 Landsat-7 Landsat-8	TM, ETM+, OLI, OLI_TIRS	Продукты уровня (L1B). Тематические продукты по данным LANCE (L2): • «Термальная аномалия»	ИКИ РАН (USGS, ISA)	17.04.1984	149 760	59	15

Окончание табл. 2

Спутники	Приборы	Тип данных (уровень обработки)	Источники данных	Диапазон дат	Кол-во сеансов (сцен)	Объём продуктов, Тбайт	Средняя скорость поступления, Гбайт/день
Sentinel-2A Sentinel-2B	MSI	Продукты уровня (L1B). Тематический продукт по данным LANCE (L2): • «Термальная аномалия»	ИКИ РАН (ESA)	28.08.2015	28 722	139	118
EO-1	HYPERION	Продукты уровня (L1B)	ИКИ РАН (ESA, USGS)	14.07.2001	2100	561	–
Sentinel-1A Sentinel-1B	C-SAR	Продукты уровня (L1B)	ИКИ РАН (ESA)	03.10.2014	22 916	40	36
«Канопус-В» № 1, 3, 4, ИК	ПСС	Продукты уровня (L1B)	НИЦ «Планета»	30.12.2011	9084	0,8	–
«Канопус-В» № 1, 3, 4, ИК	МСС	Продукты уровня (L1B)	НИЦ «Планета»	30.12.2011	9037	0,2	–
«Ресурс-П» № 1, 2, 3	ГЕОТОН	Продукты уровня (L1B)	НИЦ «Планета»	19.03.2015	260	0,5	–
«Канопус-В-ИК»	МСУ-ИК-СРМ	Продукты уровня (L1B)	НИЦ «Планета»	18.08.2017	883	0,5	1,7
Sentinel-3A	SLSTR, OLCI	Продукты уровня (L1B)	ИКИ РАН (ESA)	17.11.2016	11 326	0,2	–
Metop-B	IASI	Продукты уровня (L1B)	НИЦ «Планета»	02.05.2017 20.09.2017	35	0,1	–

Для создания архива метеоданных в качестве источников были использованы серверы Национального центра атмосферных исследований США — NCAR (https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1) и NCEP (http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/). Собираемые данные представлены в формате GRIB, стандартизированном Всемирной метеорологической организацией.

Пользователи ИС VolSatView могут проводить анализ метеоданных и другой информации, доступной в системе, с помощью картографических интерфейсов и анализа рядов данных. В картографическом интерфейсе системы пользователям доступно построение изолинейных карт различных показателей: температуры, влажности, давления и др., — с возможностью отображения на них значков направления и силы ветра. Карты температуры и ветра могут быть построены также для высоты выбранной изобарической поверхности. Представляет интерес отображение условий погоды вместе со спутниковыми изображениями. В интерфейсах реализованы различные механизмы, позволяющие проводить совместный анализ спутниковой и метеоинформации (Уваров и др., 2013).

В VolSatView реализованы также интерфейсы для анализа как временных, так и пространственных рядов метеопараметров, например интерфейс для анализа вертикальных профилей температуры. Анализ таких профилей совместно с данными о температуре, получаемыми на основе спутниковой информации, в частности, может использоваться для оценки высоты подъёма пепловых шлейфов.

Возможности анализа данных

Используемые технологии

При создании средств анализа данных в ИС VolSatView использовались подходы, технологии и решения, которые разрабатываются, поддерживаются и развиваются в ИКИ РАН для работы со сверхбольшими распределёнными архивами спутниковых данных и результатов их обработки, в первую очередь в интересах Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015б).

Основным инструментом анализа пространственной информации является картографический интерфейс. Он разработан на основе технологии GEOSMIS, созданной в ИКИ РАН (Толпин и др., 2011). Интерфейс обеспечивает характерный для геоинформационных систем выбор параметров поиска, отображения и анализа информации. Он позволяет принимать и визуализировать различные спутниковые данные, доступные в системе, а также продукты, получаемые на основе их обработки, в том числе виртуальные (формируемые «на лету» по запросу пользователей). Предусмотрены цветовая коррекция изображений и арифметические операции с ними, расчёт ряда спектральных индексов гистограмм, статистических показателей, а также классификация многоспектральных и разновременных данных и многие другие возможности анализа (Кашницкий и др., 2015).

Специализированные интерфейсы дополняют картографический интерфейс и обеспечивают анализ одномерных рядов данных, а также работу с базами данных (БД) пространственных объектов (пепловых шлейфов, термальных аномалий и др.).

Базы данных объектов и явлений

В системе VolSatView предусмотрена работа со специализированными базами данных, в которых регистрируются пространственно привязанные объекты нескольких видов и их характеристики. В число типов объектов входят:

- термальные аномалии;
- пепловые шлейфы;
- лавовые потоки;
- пирокластические потоки;
- регионы постоянных наблюдений.

Информацию об этих объектах можно отображать и анализировать в картографическом интерфейсе. Для анализа информации, накапливаемой в БД, в системе созданы специализированные интерфейсы, например для работы с БД по термальным аномалиям вулканов.

Контуры объектов могут вноситься в базу данных как автоматически, так и на основе экспертной оценки. Предусмотрена работа с временной серией состояний объекта для изучения движения и развития пепловых шлейфов. Регистрация регионов постоянных наблюдений предназначена для последующей автоматической обработки временных рядов спектральной яркости наблюдаемого объекта.

Анализ термальных аномалий

В ИС VolSatView реализованы возможности выявления тепловых аномалий по данным различных приборов в ручном и автоматическом режимах, в том числе:

- автоматизированное на основе алгоритма MOD14 (приборы AVHRR, MODIS, VIIRS);
- автоматизированное на основе алгоритма MODVOLC (приборы AVHRR, MODIS, VIIRS);
- автоматическое на основе временных серий, получаемых по данным спутника Himawari-8;
- интерактивное (приборы AVHRR, MODIS, VIIRS);
- интерактивное на основе временных серий, получаемых по данным спутника Himawari-8.

Для анализа термальных аномалий имеются такие возможности, как оценка температуры различных точек на спутниковых изображениях и температуры фона и расчёт нормализованного теплового индекса.

Анализ рядов данных

В системе VolSatView предусмотрен достаточно широкий набор интерфейсов, позволяющих анализировать ряды данных: временных, пространственных и спектральных.

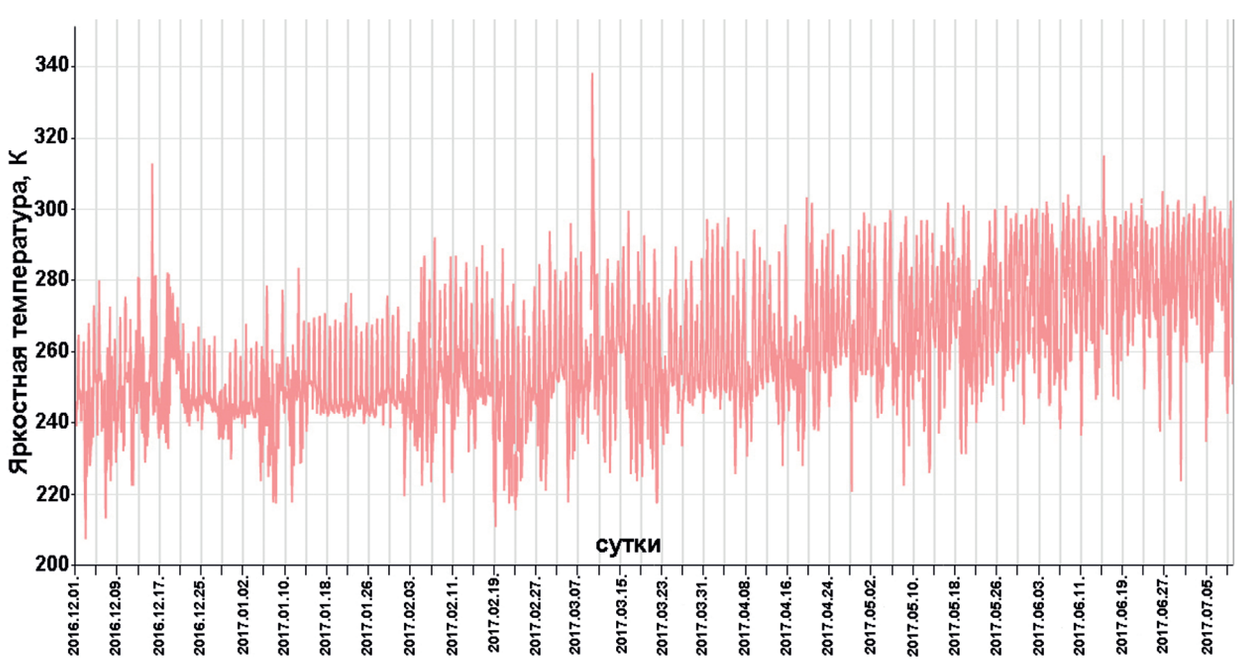

Рис. 3. Изменение величины яркостной температуры в районе вулкана Безымянный в течение извержения 2016–2017 гг. по данным Himawari-8 (7-й канал, 3,9 мкм)

Для анализа динамики различных процессов оправдано использование инструмента, позволяющего анализировать ряды наблюдений в отдельных точках, полученные в разных спектральных каналах. На *рис. 3* (см. с. 259) представлено изменение величины яркостной температуры в районе вершины вулкана Безымянный по данным спутника Himawari-8 за период с 1 декабря 2016 г. по 10 июля 2017 г. во время его экструзивно-эксплозивно-эффузивного извержения (три пика отражают эксплозивные извержения вулкана).

Возможности анализа временных рядов данных включают, помимо отображения собственно динамики яркостной температуры, вычисление и изучение динамики таких величин, как разность температур по данным каналов 11 и 12 мкм и нормализованный тепловой индекс, выполнение преобразований между яркостной температурой и спектральной энергетической яркостью. Предусмотрены функции отображения скользящих средних и отклонений от них, исключения дневных данных, отображения и исключения фоновой величины.

Динамика яркостной температуры может быть исследована в произвольной точке либо в точке постоянного наблюдения. Предварительный выбор в рамках системы точек постоянного наблюдения в местах расположения активных вулканов ускоряет доступ к данным и упрощает исследование длинных временных рядов.

Выделение пепловых облаков

В VolSatView существует три метода интерактивного выделения пеплового шлейфа: задание порога на продукте «разность температур», необучаемая кластеризация и ручное оконтуривание. Основным информационным продуктом для решения задачи детектирования и оконтуривания пепловых шлейфов является разность радиояркостных температур в каналах спутниковых данных с длинами волн в 11 и 12 мкм. Пепловым шлейфом считаются все пиксели, для которых такая разница превышает определенный порог. Пороговое значение для каждого типа спутниковых данных было подобрано эмпирически. Так, например, для данных прибора AVHRR (спутник NOAA) пороговое значение составляет 0,529 K разницы, для данных прибора AHI (спутник Himawari-8) — 0,365 K. Поскольку фиксированное значение порога на продукте «разность температур» не всегда верно выделяет пепловый шлейф, в ИС имеется возможность интерактивного изменения порогового значения. В случае, когда невозможно качественно выделить пепловый шлейф по пороговому значению, применяется выделение на базе необучаемой кластеризации снимков низкого разрешения либо снимков с геостационарных спутниковых систем. Пользователем системы выбираются данные, по которым будет проходить выделение, грубо задаётся область пеплового шлейфа и внутри этой области проводится кластеризация выбранных каналов снимка, после чего в интерактивном режиме отбираются кластеры, соответствующие пепловому шлейфу. В системе ИС VolSatView также имеется возможность «ручного» оконтуривания пеплового шлейфа. Эксперт-вулканолог в интерактивном режиме на спутниковом снимке обводит область, которую считает пепловым шлейфом.

Оценка высоты верхней границы пеплового облака

В ИС VolSatView внедрены два основных метода оценки высоты верхней границы пеплового облака: по метеорологическому профилю и метод стереопары.

Оценка высоты верхней границы пеплового облака по метеорологическому профилю выполняется с использованием данных метеорологических прогнозов и спутниковой информации. Метод основан на предположении, что радиояркостная температура соответствует температуре атмосферы на определённой высоте. По тепловому каналу спутниковых данных определяется радиояркостная температура верхней границы пеплового облака. Далее по профилю температуры и высоты из метеорологических прогнозов находится такой интервал температур, которому принадлежит полученная радиояркостная температура. Высота, соответствующая температуре в нижней границе найденного интервала, считается высотой верхней границы пеплового облака.

Оценка высоты верхней границы пеплового облака с использованием метода стереопары основана на эффекте параллакса, когда положение объекта относительно удалённого фона изменяется в зависимости от положения наблюдателя. Пепловое облако на определённой высоте над поверхностью Земли имеет различные координаты на снимках с геостационарного и низкоорбитального спутников за счёт разных углов съёмки. Для оценки его высоты по снимкам с низкоорбитального спутника и ближайшим по времени к ним снимкам с геостационарного спутника выбирается одна и та же точка на верхней границе пеплового облака и вычисляются её геодезические координаты с разных углов съёмки. Далее по орбитальным параметрам спутниковых систем с использованием упрощённой модели движения SGP4 (Hoots, Roehrich, 1988) находится точное положение низкоорбитального и геостационарного спутников в момент съёмки. Путём пересечения плоскости съёмки низкоорбитального спутника и направления съёмки геостационарного спутника получаются геоцентрические координаты точки на верхней границе пеплового облака. Выполнив преобразование из геоцентрических координат в геодезические, получаем высоту точки на верхней границе пеплового облака над поверхностью земного эллипсоида.

Другие возможности анализа

В системе реализован ряд других возможностей анализа спутниковых данных, подробно они описаны в работе (Гирина и др., 2018). Например, для анализа динамических процессов в VolSatView предусмотрено построение цветовых синтезов на основе разновременных изображений. Изменение состояния объектов на разновременных снимках можно наблюдать с помощью анимации.

Анализ гиперспектральных данных, в частности полученных прибором Hyperion, обеспечивает подробное описание характеристик наблюдаемых объектов. Это позволяет, например, изучать состояние пепловых шлейфов, структуры лавовых и пирокластических потоков и вулканогенных пород. Анализ спектральной яркости и спектральной отражательной способности поверхностей вулканогенных объектов даёт возможность выделять и анализировать вулканогенные образования одного типа, но различного возраста.

Интеграция ИС VolSatView с АИС «Сигнал» обеспечивает совместный анализ результатов моделирования распространения пепловых шлейфов и спутниковых данных. Исследователь может сформировать задание на проведение моделирования движения пеплового облака конкретного эксплозивного события или же абстрактного облака от любого вулкана, передать его в АИС «Сигнал», а затем визуализировать результаты с помощью картографического интерфейса VolSatView.

Заключение

В информационной системе VolSatView впервые реализована функциональность, позволяющая решать задачи разного уровня — от оперативного мониторинга активности вулканов до фундаментальных проблем вулканологии. За последние годы с помощью ИС VolSatView было решено множество задач, полученные результаты легли в основу ряда публикаций. В результате ежедневного мониторинга вулканов Камчатки и Курил с помощью ИС VolSatView учёные KVERT, например, выпустили в 2017–2018 гг. 413 сообщений VONA (Volcano Observatory Notice for Aviation) об опасных эксплозивных извержениях восьми вулканов (Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Карымский, Жупановский, Камбальный, Эбеко, Пик Сарычева). Возможности ИС VolSatView по мониторингу вулканической активности и изучению вулканов непрерывно будут развиваться и в дальнейшем.

При создании ИС VolSatView использовались ресурсы Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг», работа которого осуществляется при поддержке ФАНО (тема «Мониторинг», госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00042).

Литература

1. *Гирина О. А.*, *Мельников Д. В.*, *Маневич А. Г.* Спутниковый мониторинг вулканов Камчатки и Северных Курил // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 194–209. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-194-209.
2. *Гирина О. А.*, *Лупян Е. А.*, *Сорокин А. А.*, *Мельников Д. В.*, *Романова И. М.*, *Кашницкий А. В.*, *Уваров И. А.*, *Мальковский С. И.*, *Королев С. П.*, *Маневич А. Г.*, *Крамарева Л. С.* Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. 192 с.
3. *Гордеев Е. И.*, *Гирина О. А.*, *Лупян Е. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Сорокин А. А.*, *Мельников Д. В.*, *Маневич А. Г.*, *Романова И. М.*, *Королев С. П.*, *Крамарева Л. С.* Возможности использования данных гиперспектральных спутниковых наблюдений для изучения активности вулканов Камчатки с помощью геопортала VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. №. 1. С. 267–284.
4. *Ефремов В. Ю.*, *Гирина О. А.*, *Крамарева Л. С.*, *Лупян Е. А.*, *Маневич А. Г.*, *Мельников Д. В.*, *Матвеев А. М.*, *Прошин А. А.*, *Сорокин А. А.*, *Флитман Е. В.* Создание информационного сервиса «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 155–170.
5. *Кашницкий А. В.*, *Балашов И. В.*, *Лупян Е. А.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 156–170.
6. *Королёв С. П.*, *Сорокин А. А.*, *Верхотуров А. Л.*, *Коновалов А. В.*, *Шестаков Н. В.* Автоматизированная информационная система для работы с инструментальными данными региональной сети сейсмологических наблюдений ДВО РАН // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 3. С. 30–41.
7. *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Бурцев М. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Кобец Д. А.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Мазуров А. А.*, *Назиров Р. Р.*, *Прошин А. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.*, *Флитман Е. В.* (2015а) Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 53–75.
8. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* (2015б) Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
9. *Прошин А. А.*, *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Кашницкий А. В.*, *Бурцев М. А.* Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
10. *Романова И. М.*, *Гирина О. А.*, *Максимов А. П.*, *Мелекесцев И. В.* Создание комплексной информационной веб-системы «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги» (VOKKIA) // Информатика и системы управления. 2012. Вып. 33. № 3. С. 179–187.
11. *Толпин В. А.*, *Балашов И. В.*, *Ефремов В. Ю.*, *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Уваров И. А.*, *Флитман Е. В.* Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 93–108.
12. *Уваров И. А.*, *Халикова О. А.*, *Балашов И. В.*, *Бурцев М. А.*, *Лупян Е. А.*, *Матвеев А. М.*, *Платонов А. Е.*, *Прошин А. А.*, *Толпин В. А.*, *Крашенинникова Ю. С.* Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 30–45.
13. *Gordeev E. I.*, *Girina O. A.* Volcanoes and their hazard to aviation // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2014. V. 84. No. 1. P. 1–8. DOI: 10.1134/S1019331614010079.
14. *Gordeev E. I.*, *Girina O. A.*, *Loupian E. A.*, *Sorokin A. A.*, *Kramareva L. S.*, *Efremov V. Yu.*, *Kashnitskii A. V.*, *Uvarov I. A.*, *Burtsev M. A.*, *Romanova I. M.*, *Melnikov D. V.*, *Manevich A. G.*, *Korolev S. P.*, *Verkhoturov A. L.* The VolSatView information system for Monitoring the Volcanic Activity in Kamchatka and on the Kuril Islands // J. Volcanology and Seismology. 2016. V. 10. No. 6. P. 382–394. DOI: 10.1134/S074204631606004X.

15. *Hoots F. R.*, *Roehrich R. L.* Models for Propagation of NORAD Element Sets. Spacetrack report. US, Department of Defense, 1988. Iss. 3. 91 p.
16. *Romanova I. M.*, *Girina O. A.* Information Technologies for Data Analysis of the Kamchatka and Kuriles Volcanoes // Bulletin KRAUNZ. Earth Sciences. 2018. V. 39. No. 3. P. 42–53. DOI: 10.31431/1816-5524-2018-3-39-42-53.
17. *Sorokin A. A.*, *Makogonov S. V.*, *Korolev S. P.* The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia // Scientific and Technical Information Processing. 2017. V. 44. Iss. 4. P. 302–304. DOI: 10.3103/S0147688217040153.

Creation and development of the information system "Remote Monitoring of Kamchatka and Kuril Islands Volcanic Activity"

O. A. Girina[1], E. A. Loupian[2], D. V. Melnikov[1], A. V. Kashnitskii[2], I. A. Uvarov[2], A. A. Bril[2], A. M. Konstantinova[2], M. A. Burtsev[2], A. G. Manevich[1], E. I. Gordeev[1], L. S. Kramareva[3], A. A. Sorokin[4], S. I. Malkovsky[4], S. P. Korolev[4]

[1] *Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS*
Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia
E-mail: girina@kscnet.ru

[2] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru

[3] *Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta"*
Khabarovsk 680000, Russia

[4] *Computing Center FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia*

In 2011, the experts of the Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS in cooperation with Space Research Institute RAS, Far-Eastern Center of SRC Planeta and Computing Center FEB RAS created the first version of the information system named "Remote Monitoring of Kamchatka and Kuril Islands Volcanic Activity" (IS VolSatView). The system provides experts with access to a variety of information, including long-term archives of remote sensing data needed for remote monitoring of volcanic activity. A number of web interfaces are developed to deal with the data provided by the system. They enable comprehensive data analysis and processing. However working with the system does not require any specialized desktop applications, but only a web browser and Internet connection to use the system. Since the launch of the system, the list of available data, as well as tools for their analysis, has been continuously expanding. By now, there is a lot of experience in daily use of the system by the experts in volcanology and for solving various problems in the studies of volcanoes and volcanic activity. This article describes the current state of the system, including recent developments, such as determination of the height of ash plumes, improvement of the time series analysis tools, implementation of specialized data processing products.

Keywords: volcano, Kamchatka, Kuril Islands, satellite monitoring, VolSatView, information system, Earth remote sensing

Accepted: 05.06.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265

References

1. Girina O. A., Melnikov D. V., Manevich A. G., Sputnikovyi monitoring vulkanov Kamchatki i Severnykh Kuril (Satellite monitoring of Kamchatkan and Northern Kuriles volcanoes), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 194–209, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-194-209.

2. Girina O. A., Loupian E. A., Sorokin A. A., Melnikov D. V., Romanova I. M., Kashnitsky A. V., Uvarov I. A., Malkovsky S. I., Korolev S. P., Manevich A. G., Kramareva L. S., *Kompleksnyi monitoring eksplozivnykh izverzhenii vulkanov Kamchatki* (Comprehensive monitoring of explosive volcanic eruptions of Kamchatka), Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2018, 192 p.
3. Gordeev E. I., Girina O. A., Loupian E. A., Efremov V. Yu., Sorokin A. A., Melnikov D. V., Manevich A. G., Romanova I. M., Korolev S. P., Kramareva L. S., Vozmozhnosti ispol'zovaniya dannykh giperspektral'nykh sputnikovykh nablyudenii dlya izucheniya aktivnosti vulkanov Kamchatki s pomoshch'yu geoportala VolSatView (Using satellite hyperspectral data to study the activity of Kamchatka volcanoes on the basis of the VolSatView geoportal), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 267–284.
4. Efremov V. Yu., Girina O. A., Kramareva L. S., Loupian E. A., Manevich A. G., Melnikov D. V., Matveev A. M., Proshin A. A., Sorokin A. A., Flitman E. V., Sozdanie informatsionnogo servisa "Distantsionnyi monitoring aktivnosti vulkanov Kamchatki i Kuril" (Creating an Information Service "Remote Monitoring of Active Volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands"), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 155–170.
5. Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Sozdanie instrumentov dlya udalennoi obrabotki sputnikovykh dannykh v sovremennykh informatsionnykh sistemakh (Development of software tools for satellite data remote processing in contemporary information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 156–170.
6. Korolev S. P., Sorokin A. A., Verkhoturov A. L., Konovalov A. V., Shestakov N. V., Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema dlya raboty s instrumental'nymi dannymi regional'noi seti seismologicheskikh nablyudenii DVO RAN (Automated information system for instrument-data processing of the regional seismic observation network of FEB RAS), *Seismicheskie pribory*, 2014, Vol. 50, No. 3, pp. 30–41.
7. Loupian E. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Efremov V. Yu., Kashnitsky A. V., Kobets D. A., Krasheninnikova Yu. S., Mazurov A. A., Nazirov R. R., Proshin A. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Flitman E. V. (2015a), Sozdanie tekhnologii postroeniya informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Development of information systems design technologies), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 53–75.
8. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A. (2015b), Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
9. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V., Kashnitskiy A. V., Burtsev M. A., Sozdanie unifitsirovannoi sistemy vedeniya arkhivov sputnikovykh dannykh, prednaznachennoi dlya postroeniya sovremennykh sistem distantsionnogo monitoringa (Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 9–27, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
10. Romanova I. M., Girina O. A., Maksimov A. P., Melekestsev I. V., Sozdanie kompleksnoi informatsionnoi veb-sistemy "Vulkany Kurilo-Kamchatskoi ostrovnoi dugi" (VOKKIA) (Creation of Complex Information Web System "Volcanoes of the Kurile-Kamchatka Island Arc" (VOKKIA)), *Informatika i sistemy upravleniya*, 2012, Issue 33, No. 3, pp. 179–187.
11. Tolpin V. A., Balashov I. V., Efremov V. Yu., Proshin A. A., Uvarov I. A., Flitman E. V., Sozdanie interfeisov dlya raboty s dannymi sovremennykh sistem distantsionnogo monitoringa (sistema GEOSMIS) (The GEOSMIS System: Developing Interfaces to Operate Data in Modern Remote Monitoring Systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 93–108.
12. Uvarov I. A., Khalikova O. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Loupian E. A., Matveev A. M., Platonov A. E., Proshin A. A., Tolpin V. A., Krasheninnikova Yu. S., Organizatsiya raboty s meteorologicheskoi informatsiei v informatsionnykh sistemakh distantsionnogo monitoringa (Meteorological data management in framework of the satellite monitoring information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 30–45.
13. Gordeev E. I., Girina O. A., Volcanoes and their hazard to aviation, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2014, Vol. 84, No. 1, pp. 1–8, DOI: 10.1134/S1019331614010079.
14. Gordeev E. I., Girina O. A., Loupian E. A., Sorokin A. A., Kramareva L. S., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Uvarov I. A., Burtsev M. A., Romanova I. M., Melnikov D. V., Manevich A. G., Korolev S. P., Verkhoturov A. L., The VolSatView information system for Monitoring the Volcanic Activity in Kamchatka

and on the Kuril Islands, *J. Volcanology and Seismology*, 2016, Vol. 10, No. 6, pp. 382–394, DOI: 10.1134/S074204631606004X.

15. Hoots F. R., Roehrich R. L., *Models for Propagation of NORAD Element Sets*, Spacetrack Report, US, Department of Defense, 1988, Issue 3, 91 p.
16. Romanova I. M., Girina O. A., Information Technologies for Data Analysis of the Kamchatka and Kuriles Volcanoes, *Bulletin KRAUNZ. Earth Sciences*, 2018, Vol. 39, No. 3, pp. 42–53, DOI: 10.31431/1816-5524-2018-3-39-42-53.
17. Sorokin A. A., Makogonov S. V., Korolev S. P., The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia, *Scientific and Technical Information Processing*, 2017, Vol. 44, Issue. 4, pp. 302–304, DOI: 10.3103/S0147688217040153.