

УДК 528.44: 528.8: 551.21
DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-1-93-111

Мониторинг геопространства вулканоопасных территорий

¹Мелкий В.А., ^{2,3}Долгополов Д.В., ¹Верхотов А.А.

¹Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН,
Россия, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б

²Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта (ООО «НИИ Транснефть»),
Россия, 117186, Москва, Севастопольский просп., 47а

³Сахалинский государственный университет,
Россия, 693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290
vamelkiy@mail.ru, d-daniil@yandex.ru, ussr-91@mail.ru

Аннотация. Разнообразная информация о динамике вулканических процессов, получаемая при помощи различных средств наземного и аэрокосмического мониторинга, нуждается в своевременной и качественной обработке. Такую возможность обеспечивают геоинформационные технологии, позволяющие проводить сбор и анализ пространственно-ориентированных данных. В статье рассматриваются теоретические основы отрасли науки, определяющей принципы обеспечения моделирования геопространства вулканоопасных территорий, которые позволяют формировать единый комплекс взаимообусловленных данных из различных источников. Одной из важных задач безопасной жизнедеятельности на вулканоопасных территориях является мониторинг действующих вулканов и своевременное оповещение населения в условиях чрезвычайных ситуаций. В результате исследований выявлено, что в целях информационного обеспечения мероприятий по контролю за действующими вулканами, своевременного предупреждения и ликвидаций последствий извержений должно быть сформировано геопространство вулканоопасных территорий с использованием данных современных средств дистанционного зондирования, геоинформационных технологий, а также методов геопространственного и математического моделирования. В целях оперативного анализа и прогнозирования динамики вулканических процессов, влияющих на климат и изменяющих содержание парниковых газов в атмосфере и состояние экосистем в целом, требуется непрерывное обновление картографической документации кадастра вулканоопасных территорий с точной геодезической привязкой.

Ключевые слова: кадастровые съемки, геопространство вулканоопасных территорий, вулканическая деятельность, аэрокосмическая съемка, карты зонирования территорий, геоинформационные технологии

Благодарности: исследование выполнено при поддержке проекта «Приоритеты 2030 ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет»».

Для цитирования: Мелкий В.А., Долгополов Д.В., Верхотов А.А. 2025. Мониторинг геопространства вулканоопасных территорий. Региональные геосистемы, 49(1): 93–111. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-1-93-111

Monitoring the Geospace of Volcano Hazard Areas

¹Vyacheslav A. Melkiy, ^{2,3}Daniil V. Dolgopolov, ¹Alexey A. Verkhotorov

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
1B Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

² Limited Liability Company the Pipeline Transport Institute (PTI, LLC),
47a Sevastopolskiy Ave., Moscow 117186, Russia

³ Sakhalin State University,
290 Lenin St, Yuzhno-Sakhalinsk 693008, Russia
vamelkiy@mail.ru, d-daniil@yandex.ru, ussr-91@mail.ru

Abstract. Various data on the dynamics of the state of volcanoes obtained using diverse monitoring tools, both ground-based and aerospace-based ones, needs timely and high-quality processing. Such an

© Мелкий В.А., Долгополов Д.В., Верхотов А.А., 2025

opportunity is provided by geoinformation technologies that allow collecting and analyzing spatially oriented data. The article examines the theoretical foundations of the branch of science that defines the principles of modeling the geospace of volcano hazard areas, which make it possible to form a single set of interdependent data from various sources. Monitoring of active volcanoes and timely notification of the population in emergency situations is one of the important tasks of safe life in volcano-prone areas. The research revealed the need to form a geospace of volcano hazard areas using data from modern remote sensing tools, geoinformation technologies, as well as geospatial and mathematical modeling methods. This will allow information support for measures to control active volcanoes, timely prevention, and elimination of the eruption consequences. Continuous updating of the cartographic documentation of volcano hazard areas cadastre with accurate geodetic reference is required in order to promptly analyze and predict the dynamics of volcanic processes affecting the climate and changing the content of greenhouse gases in the atmosphere and the state of ecosystems as a whole.

Keywords: remote cadastral surveys, geospace of volcano hazard areas, volcanic activity, aerospace survey, zoning maps of territories, geoinformation technologies

Acknowledgements: The research was supported by the project "Priorities 2030" of Sakhalin State University.

For citation: Melkiy V.A., Dolgopolov D.V., Verkhoturov A.A. 2025. Monitoring the Geospace of Volcano Hazard Areas. *Regional Geosystems*, 49(1): 93–111 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-1-93-111

Введение

В целях обеспечения безопасной жизнедеятельности на территориях, подверженных воздействиям вулканической деятельности, необходимо вести мониторинг и осуществлять своевременный анализ пространственно-ориентированной информации о динамике состояния вулканов. Для чего необходимо создать геоинформационное пространство, сформированное на базе единой информационной модели, основанное на общих принципах и единых требованиях. Геоинформационное обеспечение для соответствия этим требованиям должно:

- быть основой для проверки и совместного комплексного использования данных: космического мониторинга, экологических наблюдений, аэрокосмической съемки (АКС);
- обеспечивать возможность анализа динамики состояния вулканов и прогноза их извержений.

Методологическая основа направления науки, обеспечивающей анализ пространственно-ориентированной информации о динамике состояния вулканов, базируется на теоретических основах геоинформационного пространства и его мониторинга, разработанных в трудах В.П. Савиных, В.Г. Бондура, А. Т. Зверева, А. П. Карпика, Д. В. Лисицкого, В.А. Малинникова, В.А. Мелкого, В.С. Хорошилова, Д.В. Долгополова, А.В. Дубровского и других специалистов в области наук о землеустройстве, кадастре, мониторинге земель различного назначения, аэрокосмических исследований, геодезии, картографии и геоинформатики [Бондур, 1995; Мелкий, 1999; Карпик, 2004, 2013; Бондур и др., 2005; Зверев, Малинников, 2011; Зверев и др., 2011; Долгополов, 2020, 2021; Антонов и др., 2021; Дубровский, 2022; Khoroshilov et al., 2022; Карпик и др., 2023; Хорошилов и др., 2023].

Ведущую роль в обеспечении геопространственными данными играет система космического мониторинга. Концептуальные принципы формирования такой системы сформулированы в трудах В.Г. Бондура [1995], которые развивались им в совместных исследованиях с В.П. Савиным и К.Я. Кондратьевым [2005], в направлении совершенствования инструментария для математического моделирования и анализа динамики процессов в окружающей среде, в том числе для предсказания природных катастроф. А.Т. Зверев и В.А. Малинников [2011] указали на необходимость мониторинговых наблюдений за актив-

ными динамическими процессами, протекающими на исследуемых территориях, и разрабатывали пути решения многих задач определения состояния сложных геодинамических систем с помощью аэрокосмических технологий. А.П. Карпиком [2004, 2013] совместно с Д.В. Лисецким [2023] разработана концепция структурирования необходимого обеспечения данными геопространственных моделей. Теоретические основы преобразования геоинформации в геознания на основе когнитивных способностей человека получила развитие в работах С.С. Янкелевич и Е.С. Антонова [Антонов и др., 2021]. Теоретические основы формирования системы мониторинга вулканоопасных территорий заложены в работах В.А. Мелкого [1999]. Дальнейшее развитие научных основ оперативной обработки геопространственных данных послужит обеспечению безопасности жизнедеятельности и функционирования сложных техногенных систем на территориях, подверженных воздействию активных геодинамических процессов, климатических изменений, повышению концентрации парниковых газов. Основные принципы рационального природопользования, моделирования опасных геологических процессов, организации безопасной эксплуатации трубопроводных систем представлены в работах В.С. Хорошилова [Khoroshilov et al., 2022, Хорошилов и др., 2023], Д.В. Долгополова [2020, 2021] и А.В. Дубровского [2022].

Объекты и методы исследования

С древних времен одной из важнейших потребностей людей, которые живут и ведут хозяйственную деятельность на территориях, подверженных воздействию вулканов, является необходимость наблюдать за их состоянием. Каждый вулкан обладает «набором» специфических опасных воздействий на земли, которые зависят в первую очередь от химического состава магматического расплава, поступающего к поверхности. Обусловлено это прежде всего геодинамической позицией блоков земной коры, к которым приурочены вулканические аппараты.

Методология формирования геопространственных моделей вулканов основывается на логическом выборе научных гипотез, системном подходе и разработке технологических схем для анализа данных о характере протекающих процессов. Геопространственная система для обеспечения анализа состояния вулкана должна формироваться с учетом комплексности исследований параметров, характеризующих процессы, которые могут протекать во время извержений (рис. 1). Определение наблюдаемых параметров производится при помощи широкого спектра разнообразных инструментов и приборов для контактных измерений и дистанционного зондирования.

Пространственный анализ осуществляется с помощью программного обеспечения ГИС, которое реализует ряд функций преобразования векторных и растровых моделей территории. Такого рода программы позволяют анализировать пространственное положение объектов, взаимоотношение их частей, зоны распространения продуктов извержений вокруг объектов, выполнять операции вычислительной геометрии и обработку цифровых моделей рельефа и др. [Карпик, 2004]. Кроме того, в ГИС предусмотрено использование программных модулей-приложений, функционирующих на основе алгоритмов детерминистских и стохастических моделей, а также могут устанавливаться специализированные приложения для анализа и прогнозирования ситуаций.

На первом этапе обработки в результате анализа пространственно-привязанной информации формируется модель разномасштабных форм рельефа на склонах вулканической постройки, затем к характерным точкам привязываются данные, поступающие в процессе мониторинга и полученные в результате обработки и анализа. Модель территории дополняется новыми предметами – зонами риска, характеристиками объектов, расположенных на землях возможного воздействия продуктов извержений. Пространственный анализ позволяет осуществлять программное обеспечение, которое выполняет математические преобразования в картографических проекциях и количественную оценку изменений [Лисецкий и др., 2024].



Рис. 1. Схема определения геопространства вулконоопасных территорий [по Карпик, 2004 с изменениями]: А – мониторинг состояния вулконоопасных территорий; Б – передача данных мониторинга в хранилище пространственных данных; В – цикл периодических наблюдений за состоянием вулконоопасных территорий

Fig. 1. The scheme for determining the geospace of volcano hazard areas [by Karpik, 2004 revised]: A – monitoring the state of volcano hazard areas; B – transmission of monitoring data to the spatial data repository; C – cycle of periodic observations of the state of volcano hazard areas

Самыми популярными программами считаются *ArcGIS* и *QGIS*. Картографические задачи решают с помощью *Mapinfo*, *DataGraf*, *NextGIS*.

Изучение характерных особенностей проявлений вулканических процессов выполняется с использованием первичных и вторичных данных. Среди них можно особо отметить топографические листы карт Курильских островов, Камчатского полуострова масштабов 1: 50 000 – 1: 200 000, крупномасштабные карты островов Гавайи и Исландия, пространственно-привязанные данные, полученные при съемках со спутников (Канопус, Арктика-М № 1, *NOAA-18/19*, *GOES-R*, *Terra*, *Aqua*, *Landsat-1-9*, *Sentinel*, *FY-3D*, *JPSS-1*, *Suomi NPP*, *Himawari-9*, и др.) в цифровом виде с различным пространственным разрешением, которые широко представлены в специализированных базах данных [Геопортал..., 2024; Global Volcanism Program, 2024; ТЕРРА ТЕХ, 2024]. Изображения анализируются на предмет поиска проявлений вулканических процессов (таких как тон, текстура, форма, узор, ассоциации и т. д.). Обработка, анализ и интеграция пространственных данных для достижения целей исследования выполняются при помощи программного обеспечения *ArcGIS* и подобного.

В настоящее время разработано довольно много методик, которые обеспечивают работу с данными космических съемок при помощи мультиспектральных, инфракрасных, радиолокационных и иных сканирующих устройств [Aveni, Blackett, 2022; Campus et al., 2022; Martí et al., 2022]. При необходимости получения данных с более высоким пространственным разрешением используются данные аэрофотосъемок с различных лета-

тельных аппаратов, в том числе беспилотных, а также воздушного лазерного сканирования [Chen et al., 2021; Liu et al., 2022]. Завершение работы по созданию тематических карт и трехмерных моделей осуществляется в специализированных картографических программах. Проверка точности моделирования выполняется периодически в процессе полевых исследований на соответствующих вулканах.

Результаты и их обсуждение

Извержения вулканов оказывают существенное влияние на природную и антропогенную среду и могут повлечь за собой огромные материальные потери и существенные экологические последствия. Все это дает полное право наряду с термином «геопространство» [Карпик, 2013] выделить отдельно понятие – «Геопространство вулканоопасных территорий». Геопространство вулканоопасных территорий – это пространство, ограниченное факторами воздействия вулканических процессов в определенный период на окружающую среду.

Формирование геоинформационного пространства любой наземной системы представляет собой создание цифрового двойника, который соответствует идеологии моделирования в рамках проектов «Цифровой Земли». Наиболее информативным проектом для аналитических исследований в этом направлении является геоинформационная платформа корпорации «Роскосмос» [ТЕРРА ТЕХ, 2024]. Для анализа состояния природной среды и производственно-территориальных комплексов различного пространственного охвата, по-компонентных изменений в экосистемах, разнообразных процессов в литосфере, гидросфере и атмосфере, трансформаций в результате антропогенного воздействия необходимо применять методы исследований, которые базируются на знаниях различных отраслей науки.

Для формирования единого геоинформационного пространства используют современные геоинформационные системы, которые обеспечивают возможность комплексного анализа геопространственной информации и возможность совместной работы с данными распределенным в группах исследователей вулканических процессов и экосистемных изменений в результате их воздействия на атмосферу и гидросферу.

Границы вулканоопасных территорий в пространстве выделяются по ряду признаков, таких как:

- обособление вулканогенных ландшафтов по спектральным и текстурным признакам, свидетельствующим о значительных изменениях экосистем (повреждение или сведение растительности);
- наличие специфических форм рельефа на территориях, попавших под определенное воздействие продуктов извержений или полностью сформированных такими отложениями;
- определение на склонах вулканических построек русел, по которым могут проходить лавовые, пирокластические потоки, сбегать падающие тучи или лахары.

Моделирование процессов вулканических извержений начинается с определения типа деятельности и эксплозивности, свойственной исследуемому вулкану. Характер деятельности предопределяется местоположением магматических очагов в земной коре, через которые проходит магматический расплав, – коровых и мантийных (К-тип и М-тип) [Сывороткин, 2017]. Изменение химического состава магмы в результате процессов смешения, дифференциации, ликвации и подобных приводит к созданию вулканических аппаратов, которым свойственна эфузивная, эксплозивная или экструзивная деятельность.

Эфузивная деятельность характерна для вулканов, у которых высокотемпературный магматический расплав изливается на поверхность из жерл или трещин. Продукты эфузивной деятельности чаще всего представлены базальтами. Самый крупный и активный представитель из эфузивных вулканов – Мауна-Лоа на о. Гавайи: его деятельности уделяется наибольшее внимание вулканологов. Извержение вулкана в ноябре – декабре 2022 года

наблюдалось с геостационарных спутников *GOES-R*. Увеличение тепловой активности в начале извержения, а затем снижение на другой день было определено по данным инфракрасного канала *SWIR* мультиспектрального инструмента *MSI*, а также отслеживалось с помощью тепловизора *ABI* [Genzano et al., 2023]. Площадное распространение лавовых потоков также хорошо отслеживается с помощью инструментов *OLI* (спутники *Landsat 8/9*), *MSI* (*Sentinel-2*), панхроматической и многозональной съемочных систем (космический аппарат Канопус-В-ИК). Детальные построения рельефа, точное картографирование разломов и измерения кинематики раскрытия трещин требуют применения аэросъемок с использованием вертолетов или беспилотных воздушных судов [Mannini et al., 2024].

Большинству островодужных вулканов свойственны эксплозивно-фреатические извержения. Интенсивность эксплозивной вулканической деятельности характеризуется индексом эксплозивности (*VEI*) [King, 2024]. Эксплозивные извержения с $VEI = 1–3$ достаточно хорошо изучены при наблюдениях на вулканах Италии, Камчатки и Курильских островов (извержения Этны, Эбеко, Алаида, Большое трещинное Толбачинское) [Belousov et al., 2021; Aveni, Blackett, 2022; Calvari, Nunnari, 2024]. На архивных космических снимках зафиксированы эксплозивные выбросы вулканов. Газово-тефровые колонны поднимаются на высоту до нескольких километров над уровнем моря. Основную опасность при эксплозивных извержениях представляют обломки тефры различной размерности. Крупный обломочный материал выпадает неподалеку от кратера, пепел переносится в атмосфере на сотни и тысячи километров от эруптивного центра [Мелкий и др., 2024].

Вулканическая деятельность интенсивностью $VEI \geq 4$ наблюдалась на вулканах Безымянный, Шивелуч [Гирина и др., 2023; Ridolfi et al., 2023], Сент-Хеленс [Fink, Anderson, 2023]. Все эти взрывные извержения можно отнести к экструзивным, потому что при них разрушалась вершинная часть вулканической постройки, которая представляла собой экструзивный купол. Пароксизмальное высокоэксплозивное извержение субплинианского типа, произошедшее на вулкане Шивелуч 10–13 апреля 2023 года, разрушило экструзивный купол. По спутниковым данным высота эруптивной колонны превысила 15 км н. у. м., пепловое облако распространилось на расстояние более 3500 км и выпало на Камчатке на площади 3280 тыс. км².

Самым интенсивным извержением, наблюдавшимся в исторический период, считается разрушение Кракатау в 1883 году. Высоту выброса эруптивной колонны оценивают в 80 км, на удалении 150 км от пепла стало темно днем. Взрыв интенсивностью $VEI = 6$ и сопровождающее его цунами унесли жизни более 30 000 человек, стерли с лица Земли 165 населенных пунктов, а 132 нанесли значительный урон. Звук взрыва услышали жители австралийского г. Перт, расположенного в 2100 км от Кракатау, приборы, находившиеся в 160 км, зафиксировали звук взрыва в 172 децибела. Ударная волна после взрыва обшла земной шар 4 раза [Цыганов, 2024].

В связи с необходимостью прогноза катастрофических событий на экструзивных вулканах возник большой интерес к моделированию кальдерообразующего извержения вулкана Окмок (о. Умнак, Аляска), которое произошло в 43 году до н. э. Пирокластические потоки покрыли на о. Умнак земли площадью около 1000 км². Выброс в стратосферу большого количества пепла, серы и ее соединений вызвал изменения климата и всеобщее похолодание [Reccia et al., 2023]. Анализ петрологических, полевых тefрохронологических, палеоклиматических данных позволяет моделировать процессы их воздействия на окружающую среду [Burgisser et al., 2024].

Если с лавовыми и пирокластическими потоками бороться очень сложно и зачастую нет в том необходимости, то выбор способов защиты от пеплопадов и расчет усиления элементов конструкции крыш в зонах возможного разнопланового воздействия не составит большого труда. Следует заметить, что выпадение пеплов повышает плодородие почв. На вулканах Алаид и Эбеко пеплы обладают повышенной радиоактивностью и при-

вносят в почвы обломки с большими по сравнению с другими объектами Курильских островов и Камчатки содержанием U , Th . Л.В. Захарихина с коллегами [Захарихина и др., 2021] при исследовании пеплов определила наличие более высокого показателя потенциального плодородия курильских почв, чем на полуострове Камчатка.

Несмотря на то, что на склонах вулканических построек практически повсеместно присутствует опасность воздействия тех или иных процессов, угрожающих безопасности жизнедеятельности людей и строений, возможность получения относительно дешевой энергии на ГеоТЭС, высоких урожаев агрокультур на плодородных почвах во все времена побуждали желание использовать эти земли для хозяйственной деятельности. В этой связи возникает необходимость оценить все риски при использовании вулканоопасных земель, вести мониторинг состояния вулканов и моделировать сценарии развития процессов, которые могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду, гражданские и промышленные объекты.

Геоинформационные технологии для анализа динамики любого природного процесса должны обеспечивать его моделирование на основе накапливаемой и структурированной информации о параметрах, отражающих свойства компонентов системы [Khoroshilov et al., 2022]. Результаты наблюдений перемещения масс горных пород по склонам анализируются в сочетании с топографической информацией о рельефе местности и ландшафтными признаками, отражающими особенности движения потоков на склонах [Хорошилов и др., 2023]. Моделирование перемещений масс позволяет определить степень риска, основываясь на знаниях о геопространстве вулканов.

Использование геоинформационных технологий позволяет сформировать единое пространство для крупных природно-территориальных или природно-технических систем, которые позволяют анализировать динамику их состояния по данным мониторинга изменяющихся параметров (рис. 2) [Долгополов и др., 2021]. Особенностями разнопланового мониторинга вулканоопасных территорий определяется потребность в создании единой информационной пространственной среды, ориентированной на задачи обеспечения безопасной жизнедеятельности в зонах с различной степенью возможного воздействия при извержениях, своевременного оповещения населения в условиях чрезвычайных ситуаций, а также для информационного обеспечения работы штабов и органов власти.

Входная информация, необходимая для решения геопространственных задач [Антонов и др., 2021], обеспечивающих моделирование вулканических и сопутствующих им процессов в окружающей среде, подгружается из хранилища пространственных данных в виде цифровых карт, 3D-моделей, составленных ранее. Для каждого из исследуемых вулканов (в зависимости от типа характерных для них извержений) производится выбор объектов наблюдения, а также определение параметров, характеризующих процессы, происходящие в момент измерения. Кроме того, предварительной обработке подвергаются оперативные данные АКС, телеметрических сведений о контактных измерениях наблюдаемых параметров газоанализаторами, наклонометрами, видеокамерами, тепловизорами и др. приборами, автономными метеостанциями, полевыми и стационарными сейсмостанциями.

Современные возможности формирования геопространства вулканоопасных территорий базируются на новых методах и средствах сбора, автоматизированной обработки данных. Методы аэрокосмического мониторинга за последние несколько лет вышли на качественно новый уровень в связи с применением новых систем и технологий космической съемки, лазерного сканирования, цифровой аэросъемки, в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Мониторинг территорий с активной вулканической деятельностью, выявление и моделирование протекающих процессов должны быть построены с учетом знаний о характере протекающих процессов. Так как именно тип деятельности определяет скорость деформаций и возможный характер протекания опасных явлений. Моделирование геопространства вулканоопасных территорий целесообразно выполнять с учетом требований компьютерного

восприятия и возможностью трехмерного представления данных в современных ГИС. Примером аналогичной системы может служить технологическая цифровая платформа мониторинга природно-технологической среды (ТЦП МПТС) [Долгополов и др., 2022].

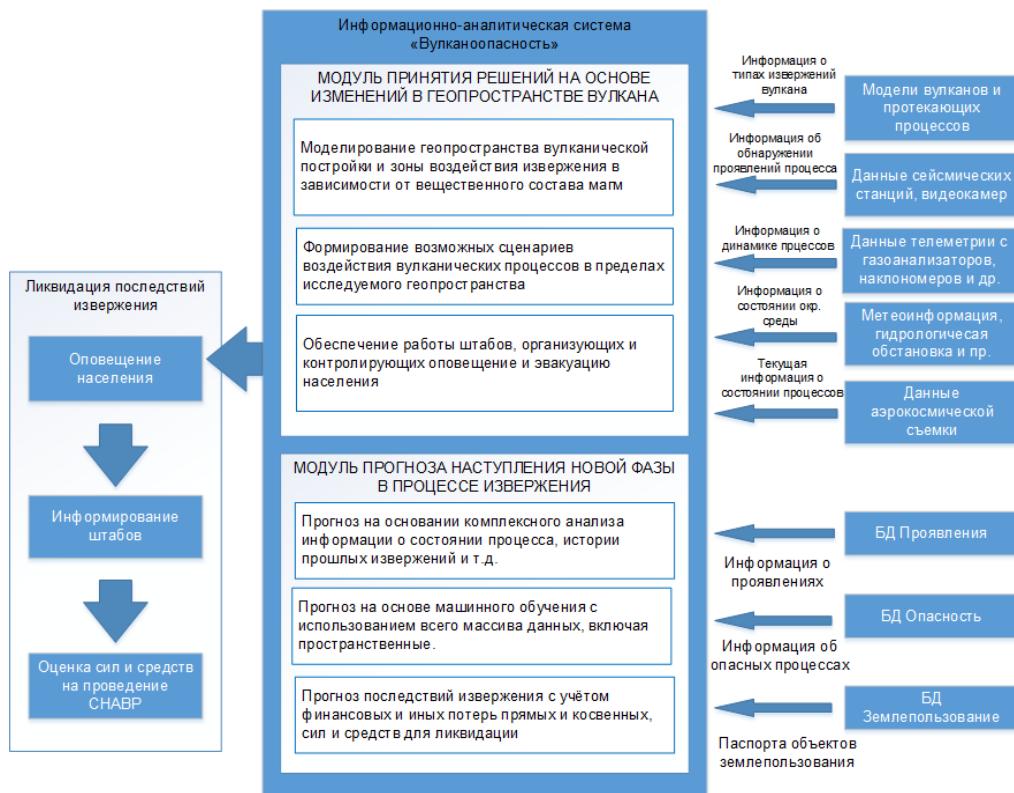


Рис. 2. Технологическая схема мониторинга вулканоопасных территорий
 (по Долгополову и др., 2021 с дополнениями)

Fig. 2. Technological scheme for monitoring volcano hazard areas
 (according to Dolgopolov et al., 2021 with additions)

Мониторинг вулканоопасных территорий выполняется для обеспечения моделей геопространства вулканов достоверной оперативной информацией о параметрах состояния системы, которая поступает регулярно в результате разновременных космических съемок, опубликованных данных об истории вулканической деятельности и процессов, представляющих опасность для людей и строений. Для апробирования предлагаемой схемы обработки информации составляются пространственные модели территории и карты зонирования земель с выделением подзон, соответствующих типу и интенсивности воздействия вулканоопасных явлений. Использование метода ретроспективного анализа на основе космических снимков среднего и высокого разрешения позволило оценить масштабы воздействия опасных явлений на вулкане Эбеко и составить карты зонирования территории по вулканоопасности. Проведенное исследование позволило определить научные принципы зонирования вулканоопасных территорий. В границах выделяемых подзон следует применять определенные обременения на использование земель, а также производить переоценку их кадастровой стоимости [Верхутуров, 2024]. Корректные данные для моделирования опасных процессов позволяют понять масштабы предстоящих катастрофических событий и максимально повысить безопасность жизнедеятельности людей и сооружений [Мазарович, Соколов, 2022].

Для любого вулканического аппарата характерны свойственные только ему физические процессы, которые только в общих чертах могут происходить на вулканах аналогичного типа. Следовательно, для моделирования процессов на определенном вулкане требуется тщательное исследование процессов и получение достоверных исходных данных. Моделирова-

ние распространения лахаров и путей движения пирокластических потоков производилось для вулкана Мигер (Британская Колумбия) с использованием цифровых моделей рельефа [Warwick et al., 2022], которые были построены по данным *LiDAR* и *SRTM* с разрешением 30 м [Гусев и др., 2022; Рязанов, Кулагина, 2022]. Большое количество моделей и карт вулканоопасности представлено в базе данных на веб-сайте Международной ассоциации вулканологии и химии недр Земли (*IAVCEI*) [Ogburn et al., 2023]. Оценка динамики экологической обстановки и изменений экосистем как на суше, так и в окружающих морях и атмосфере после воздействия распространения продуктов извержений и дегазации Земли в зонах разломов может производиться с помощью анализа геопространства вулканов [Мелкий, Верхотуров, 2022; Chen et al., 2022; Гусев, 2023; Bisson et al., 2023; Tesfaye, 2024]. Большой интерес представляет анализ климатических изменений в условиях высокогорья на вулканах по сравнению с другими горными регионами [Бекмурзаева и др., 2022].

Вне всяких сомнений, наиболее информативным источником актуальной и объективной информации при мониторинге вулканоопасных территорий служат материалы аэро- и космических съемок. Конечно, местоположение спутников на орбитах и технические возможности съемочной аппаратуры не всегда позволяют непрерывно отслеживать динамику всех процессов на активизирующемся вулкане, поэтому кроме космического мониторинга ведется сбор данных наземных наблюдений.

Первым признаком активизации вулкана и движения магмы в подводящем канале является увеличение количества и энергетики вулканотектонических землетрясений. Пожалуй, самым эффективным способом выявления первых признаков предстоящего извержения являются сейсмические наблюдения, которые ведутся при помощи датчиков автономных сейсмостанций, передающих данные по радиоканалам, а также приборов стационарных станций. Рой вулканотектонических землетрясений обычно распознается по меньшей силе и большей частоте дрожания, чем отличается от тектонических толчков, у которых напряжения, накопленные в течение продолжительного периода покоя, происходят в результате одного или нескольких сильных толчков и афтершоков. В качестве примера сейсмологических наблюдений за землетрясениями, предшествующими извержению вулкана, можно представить результаты пространственно-временного анализа данных о глубине гипоцентров выделения сейсмической энергии в периоды за несколько месяцев до извержения и во время активизации эруптивной деятельности, выполненного С.Л. Сенюковым с коллегами (рис. 3).

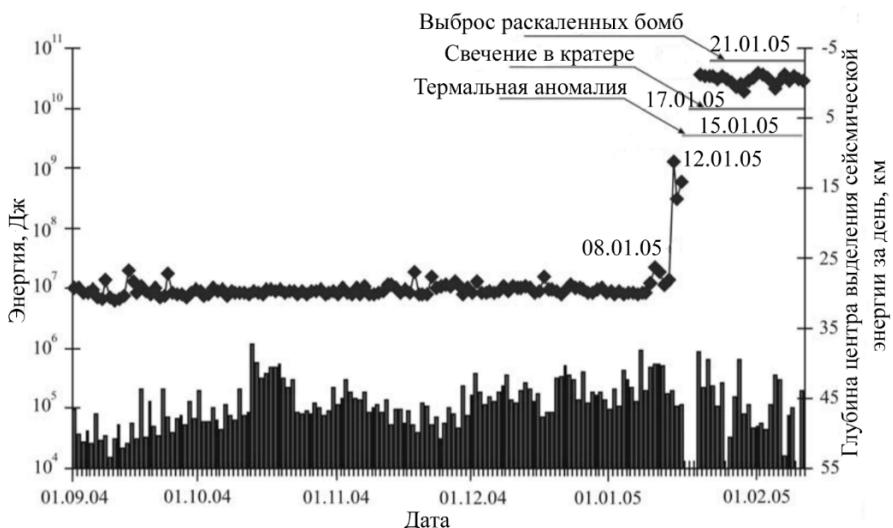


Рис. 3. Пространственно-временной анализ выделения энергии в гипоцентрах землетрясений вулкана Ключевской за период с 01 сентября 2004 г. по 27 февраля 2005 г. (по Сенюкову и др., 2008)

Fig. 3. Spatial and temporal analysis of energy release in earthquake hypocenters of Klyuchevskaya volcano from September 01, 2004 to February 27, 2005 (by Senyukov et al., 2008)

Информация о динамике перемещения центров выделенной сейсмической энергии (ц. в. с. э.) регистрируется как рои землетрясений в течение каждого суток. В итоге было установлено, что глубина местоположения центров изменялась от 30 км до –5 км над уровнем моря. Выделенная сейсмическая энергия перед извержением 2005 года нарастала от 10^5 до 10^{11} Дж. Исследования С.Л. Сенюкова с коллегами показали, что перемещение ц. в. с. э. в верхнюю часть вулканической постройки Ключевского вулкана происходит за несколько дней до начала извержения, что позволяет считать этот процесс надежным предвестником для прогноза извержений [Сенюков и др., 2008].

Данные АКС и сейсмологических наблюдений дополняются информацией с видеокамер наблюдения, наклонометров, газоанализаторов и других приборов и датчиков, установленных непосредственно на наблюдаемом объекте или в пределах прямой видимости (рис. 4).

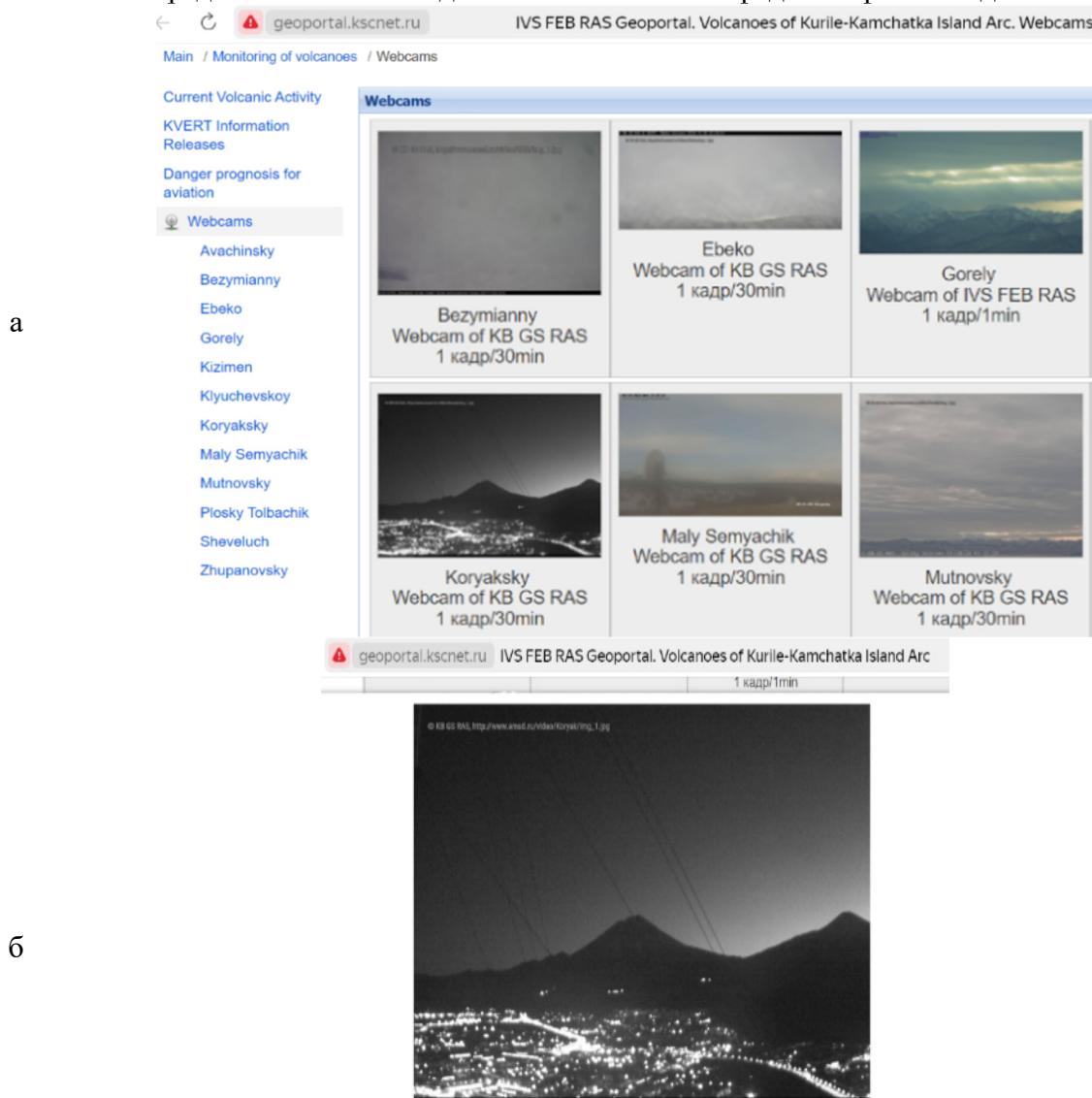


Рис. 4. Мониторинг общего состояния вулканов Камчатки видеокамерами: а – интерфейс геопортала Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; б – вид Корякского вулкана в декабре 2024 года [Геопортал..., 2024]

Fig. 4. Monitoring of the general condition of Kamchatka volcanoes with video cameras: a – interface of the geoportal of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; b – view of the Koryak volcano in December 2024 [Geoportal..., 2024]

Детальные съемки проводятся на вулканах, которые часто посещаются и представляют какую-либо серьезную опасность для хозяйственной деятельности (рис. 5).

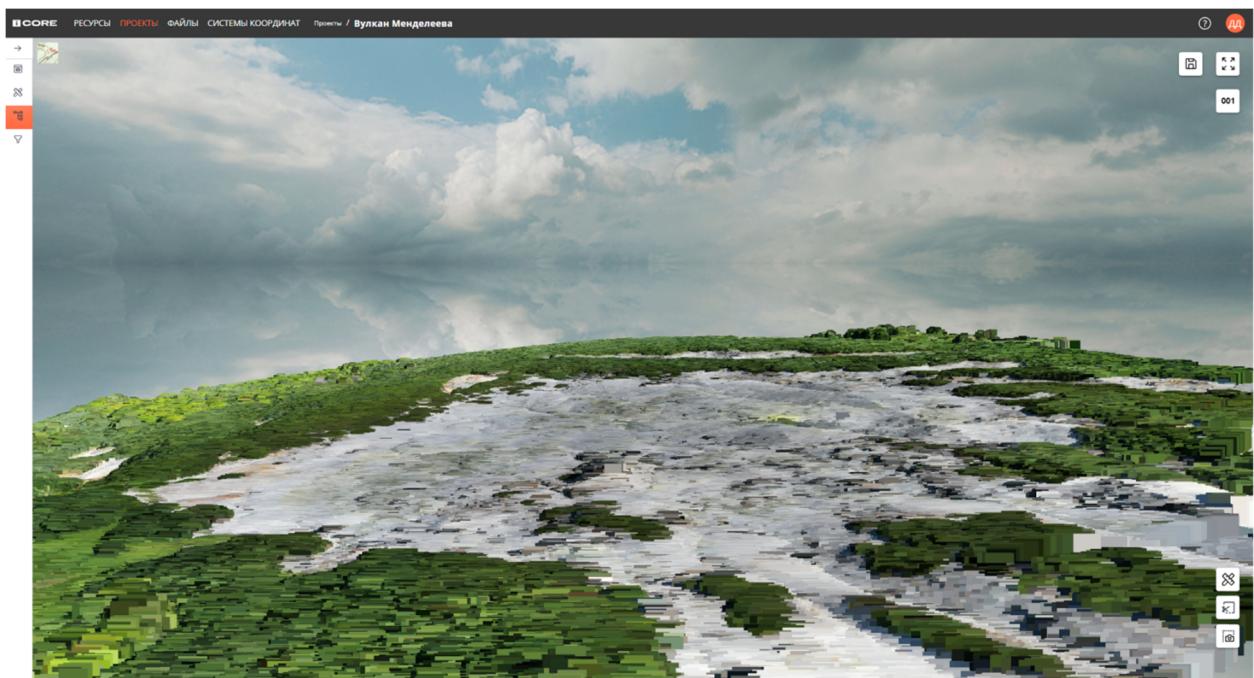


Рис. 5. Сольфатарное поле вулкана Менделеева на о. Кунашир: а) на фотографии (фото В.А. Мелкого); б) в виде трехмерной модели, полученной по материалам цифровой аэрофотосъемки (ЦАФС выполнена А.А. Верхотовым), в веб-интерфейсе программного обеспечения ТЦП МПТС [Долгополов и др., 2022]

Fig. 5. The solphataric field of the Mendeleev volcano on Kunashir Island: a) in a photograph (photo by V. A. Melkiy); b) in the form of a three-dimensional model obtained from digital aerial photography (Digital aerial photography performed by A. A. Verkhoturov), in the web interface of the "Technological digital platform for monitoring the natural and technological environment" software [Dolgopolov et al., 2022]

Заключение

В результате получены следующие основные результаты:

1. Сформулировано определение геопространства вулканоопасных территорий.
2. Подтверждено, что данные ДЗЗ являются наиболее важным источником объективной и актуальной информации при мониторинге вулканоопасных территорий, которые могут использоваться для:
 - формирования геопространственных моделей вулканов с использованием высокоточных цифровых моделей рельефа;
 - мониторинга термальных площадок дистанционными методами в инфракрасном диапазоне электромагнитных волн;
 - формирования базовой мульти尺度ной пространственной основы;
 - обновления единой цифровой картографической основы;
 - зонирования территории по степени опасности;
 - решения задач оценки экологической обстановки и ее динамики в результате воздействия вулканических извержений;
 - регулярных наблюдений в радиоволновых диапазонах за разрушением экструзивных куполов, особенно при наличии сплошной облачности.
3. Выявлены потребности в источниках данных, необходимых при построении систем мониторинга вулканоопасных территорий.

В качестве примера модели вулкана и зонирования территории, попадающей под воздействие интенсивности вулканических процессов и пространственного распространения продуктов извержений, можно привести работу по выявлению характера деятельности эруптивного центра вулкана Эбеко. В результате исследования были выявлены зоны сильного, среднего и слабого воздействия, а позднее определены принципы и основные критерии зонирования вулканоопасных территорий.

Список источников

- Геопортал Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. 2024. Электронный ресурс. URL: <http://geoportal.ksnet.ru/data.php> (дата обращения 01.12.2024)
- Долгополов Д.В., Камашев Р.А., Назаров Д.С., Удовиченко М.С. 2022. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662888 Российской Федерации. Технологическая цифровая платформа мониторинга природно-технологической среды: № 2022662580: заявл. 07.07.2022: опубл. 07.07.2022.
- ТЕРРА ТЕХ. Сайт АО организации Госкорпорации «Роскосмос». 2024. Электронный ресурс. URL: <https://terratech.ru/> (дата обращения 27.11.2024 г.).
- Цыганов М. Кракатау – бедствие, которое вспоминают до сих пор. РИА Новости. Электронный ресурс. URL: <https://ria.ru/20080827/150686556.html> (дата обращения: 27.11.2024).
- Global Volcanism Program. 2024. Volcanoes of the World (v. 5.2.4; 21 Oct 2024). Database. Electronic resource. Distributed by Smithsonian Institution, compiled by Venzke E. DOI: 10.5479/si.GVP.VOTW5-2024.5.2
- King H.M. Volcanic Explosivity. Geology.com. Geoscience News and Information; 2005–2024. Electronic resource. URL: <https://geology.com/stories/13/volcanic-explosivity-index/> (Date of circulation: 27.11.2024).

Список литературы

- Антонов Е.С., Лисицкий Д.В., Янкелевич С.С. 2021. Теоретико-методологическое представление прямого перехода от геоинформации к геознаниям. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 26(2): 82–90. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-2-82-90>
- Бекмурзаева Л.Р., Братков В.В., Керимов И.А. 2022. Современные климатические тенденции горных ландшафтов Северного Кавказа на фоне глобального изменения климата. Известия

- Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 16(3): 56–62. <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2022-16-3-56-62>
- Бондур В.Г. 1995. Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2: 14–38.
- Бондур В.Г., Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. 2005. Проблемы мониторинга и предсказания природных катастроф. Исследование Земли из космоса, 1: 3–14.
- Верхотуров А.А. 2024. Обоснование зонирования вулканического воздействия на примере г. Северо-Курильск. В кн.: Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. Материалы Национальной научно-практической конференции, Новосибирск, 21–24 ноября 2024. Новосибирск, Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 1: 100–106. <https://doi.org/10.33764/2687-041X-2024-1-100-106>
- Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нуждаев А.А., Бриль А.А., Озеров А.Ю., Крамарева Л.С., Сорокин А.А. 2023. Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10–13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 20(2): 283–291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>.
- Гусев А.П. 2023. Потоки метана в тропосфере: геологические и антропогенные источники (по данным Sentinel-5P TROPOMI). Региональные геосистемы, 47(4): 580–592. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-580-592>
- Гусев В.Л., Потапов С.Л., Синькова М.Г. 2022. Оценка точности цифровых моделей рельефа и цифровых моделей местности из открытых источников. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 66(1): 52–63. <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2022-66-1-52-63>
- Долгополов Д.В. 2020. Использование данных дистанционного зондирования Земли при формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 25(3): 151–159. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-3-151-159>.
- Долгополов Д.В. 2021. Геопространство трубопроводного транспорта. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 26(1): 76–85. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-1-76-85>
- Долгополов Д.В. Мелкий В.А., Верхотуров А.А. 2021. Геоинформационное обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов, 332(12): 52–63. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/12/3028>.
- Дубровский А.В. 2022. Методические подходы к моделированию и прогнозированию рационального использования земельных ресурсов с применением геотехнологий. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 27(3): 145–156. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-3-145-156>.
- Захарихина Л.В., Рашидов В.А., Аникин Л.П. 2021. Геохимия и потенциальное плодородие вулканических пеплов извержений вулканов Алаид и Эбеко (Курильские острова). Вулканология и сейсмология, 5: 46–62. <https://doi.org/10.31857/S0203030621050072>
- Зверев А.Т., Малинников В.А. 2011. Космический геоэкологический мониторинг северных территорий России. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 6: 68–73.
- Зверев А.Т., Малинников В.А., Савиных В.П. 2011. Космический мониторинг динамики ледников Новой Земли и Земли Франца-Иосифа. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 5: 72–75.
- Карпик А.П. 2004. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий. Новосибирск, СГГА, 259 с.
- Карпик А.П. 2013. Основные принципы формирования геодезического информационного пространства. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, S4: 73–78.

- Карпик А.П., Лисицкий Д.В., Мусихин И.А. 2023. Развитие геопространственной деятельности в России: стратегические направления и первоочередные задачи. Геодезия и картография, 84(12): 49–58. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2023-1002-12-49-58>
- Лисецкий Ф.Н., Голеусов П.В., Буряк Ж.А. 2024. Допустимые эрозионные потери почвы и скорости почвообразования в контексте регулирования углеродного баланса. Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение, 79(3): 139–151. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-3-139-151>
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю. 2022. Опасность разрушения вулкана Бернбург (остров Ян-Майен, Норвежско-Гренландское море). Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 504(2): 163–167. <https://doi.org/10.31857/S2686739722060111>
- Мелкий В.А. 1999. Аэрокосмический мониторинг вулканоопасных территорий: теория и методы. Дис. ... докт. тех. наук. М., 337 с.
- Мелкий В.А., Верхотуров А.А. 2022. Современное состояние растительного покрова вулкана Головнина по данным космических съемок (о. Кунашир, Курильские острова). Региональные геосистемы, 46(4): 555–573. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-4-555-573>
- Мелкий В.А., Верхотуров А.А., Братков В.В. 2024. Зонирование воздействия вулкана Эбеко (Курильские острова) на прилегающие земли по данным материалов аэрокосмических съемок. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 68(1): 21–32. <https://doi.org/10.30533/GiA-2024-002>
- Рязанов С.С., Кулагина В.И. 2022. Сравнительная оценка вертикальной точности цифровых моделей высот – SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM и MERIT DEM на примере лесной и пойменной зоны национального парка «Нижняя Кама». Геосферные исследования, 1: 107–117. <https://doi.org/10.17223/25421379/22/8>
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрозднина С.Я. 2008. Пространственно-временной анализ землетрясений вулкана Ключевской за 1999–2007 гг. В кн.: Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Труды региональной научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007. Обнинск, Единая геофизическая служба Российской академии наук: 120–124.
- Сывороткин В.Л. 2017. Извержения вулканов. Пространство и время, 1(27): 196–213.
- Хорошилов В.С., Павловская О.Г., Кобелева Н.Н., Ямбаев Х.К. 2023. Математическое моделирование динамики перемещений оползневых склонов в условиях техногенных воздействий. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 28(1): 45–58. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-1-45-58>
- Aveni S., Blackett M. 2022. The First Evaluation of the FY-3D/MERSI-2 Sensor's Thermal Infrared Capabilities for Deriving Land Surface Temperature in Volcanic Regions: A Case Study of Mount Etna. International Journal of Remote Sensing, 43(8): 2777–2792. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2068360>
- Belousov A., Belousova M., Kotenko T., Auer A., Walter T.R. 2021. Mechanism of the Historical and the Ongoing Vulcanian Eruptions of Ebeko Volcano, Northern Kuriles. Bulletin of Volcanology, 83(1): 4. <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z>
- Bisson K.M., Gassó S., Mahowald N., Wagner S., Koffman B., Carn S.A., Deutsch S., Gazel E., Kramer S., Krotkov N., Mitchell C., Pritchard M.E., Stamieszkin K., Wilson C. 2023. Observing Ocean Ecosystem Responses to Volcanic Ash. Remote Sensing of Environment, 296: 113749. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113749>
- Burgisser A., Peccia A., Plank T., Moussallam Y. 2024. Numerical Simulations of the Latest Caldera-Forming Eruption of Okmok Volcano, Alaska. Bulletin of Volcanology, 86(9): 77. <https://doi.org/10.1007/s00445-024-01765-1>
- Calvari S., Nunnari G. 2024. Reawakening of Voragine, the Oldest of Etna's Summit Craters: Insights from a Recurrent Episodic Eruptive Behavior. Remote Sensing, 16(22): 4278. <https://doi.org/10.3390/rs16224278>
- Campus A., Laiolo M., Massimetti F., Coppola D. 2022. The Transition from MODIS to VIIRS for Global Volcano Thermal Monitoring. Sensors, 22(5): 1713. <https://doi.org/10.3390/s22051713>
- Chen J., Chen Y., Liu Z. 2021. Classification of Typical Tree Species in Laser Point Cloud Based on Deep Learning. Remote Sensing, 13(23): 4750. <https://doi.org/10.3390/rs13234750>

- Chen Z., Jacob D.J., Nesser H., Sulprizio M.P., Lorente A., Varon D.J., Xiao Lu, Lu Shen, Qu Z., Penn E., Yu X. 2022. Methane Emissions from China: a High-Resolution Inversion of TROPOMI Satellite Observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(16): 10809–10826. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10809-2022>.
- Fink J., Anderson S. 2023. Lessons Learned from the 1980–1986 Eruption of the Mount St. Helens Composite Lava Dome. *Bulletin of Volcanology*, 85(6): 35. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01642-3>
- Genzano N., Marchese F., Plank S., Pergola N. 2023. Monitoring the Mauna Loa (Hawaii) Eruption of November–December 2022 from Space: Results from Goes-r, Sentinel-2 and Landsat-8/9 Observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122: 103388. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103388>
- Khoroshilov V.S., Kobeleva N.N., Noskov M.F. 2022. Analysis of Possibilities to Use Predictive Mathematical Models for Studying the Dam Deformation State. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 8(2): 733–744. <https://doi.org/10.22055/jacm.2022.38005.3129>
- Liu X, Lian X, Yang W, Wang F, Han Y, Zhang Y. 2022. Accuracy Assessment of a UAV Direct Georeferencing Method and Impact of the Configuration of Ground Control Points. *Drones*, 6(2): 30. <https://doi.org/10.3390/drones6020030>
- Mannini S., Ruch J., Hazlett R.W., Downs D.T., Parcheta C.E., Lundblad S.P., Anderson J.L., Perry R., Oestreicher N. 2024. Tracking Magma Pathways and Surface Faulting in the Southwest Rift Zone and the Koa‘e Fault System (Kīlauea Volcano, Hawai‘i) Using Photogrammetry and Structural Observations. *Bulletin of Volcanology*, 86: 45. <https://doi.org/10.1007/s00445-024-01735-7>
- Martí J., Becerril L., Rodríguez A. 2022. How Long-Term Hazard Assessment May Help to Anticipate Volcanic Eruptions: the Case of La Palma Eruption 2021 (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 431: 107699. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107669>
- Ogburn S.E., Charlton D., Norgaard D., Wright H.M., Calder E.S., Lindsay J., Ewert J., Takarada S., Tajima Y. 2023. The Volcanic Hazard Maps Database: an initiative of the IAVCEI Commission on Volcanic Hazards and Risk. *Journal of Applied Volcanology*, 12: 2. <https://doi.org/10.1186/s13617-022-00128-9>
- Peccia A., Moussallam Y., Plank T., DallaSanta K., Polvani L., Burgisser A., Larsen J., Schaefer J. 2023. A New Multi-Method Assessment of Stratospheric Sulfur Load from the Okmok II Caldera-Forming Eruption of 43 BCE. *Geophysical Research Letters*, 50(21): e2023GL103334. <https://doi.org/10.1029/2023GL103334>.
- Ridolfi F., Almeev R.R., Ozerov A.Yu., Holtz F. 2023. Amp-TB2 Protocol and Its Application to Amphiboles from Recent, Historical and Pre-historical Eruptions of Bezymianny volcano, Kamchatka. *Minerals*, 13(11): 1394. <https://doi.org/10.20944/preprints202309.2133.v1>
- Tesfaye W., Elias E., Warkineh B., Tekalign M., Abebe G. 2024. Modeling of Land Use and Land Cover Changes Using Google Earth Engine and Machine Learning Approach: Implications for Landscape Management. *Environmental Systems Research*, 13: 31. <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00366-3>
- Warwick R., Williams-Jones G., Kelman M., Witter J. 2022. A Scenario-Based Volcanic Hazard Assessment for the Mount Meager Volcanic Complex, British Columbia. *Journal of Applied Volcanology*, 11: 5. <https://doi.org/10.1186/s13617-022-00114-1>

References

- Antonov E.S., Lisitsky D.V., Yankelevich S.S. 2021. Theoretical and Methodological Representation of the Direct Transition from Geoinformation to Geoscience. *Vestnik of SGUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 26(2): 82–90. (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-2-82-90>
- Bekmurzaeva L.R., Bratkov V.V., Kerimov I.A. 2022. Current Climatic Trends in the Mountain Landscapes of the North Caucasus Against the Backdrop of Global Climate Change. *Dagestan State Pedagogical University. Journal. Natural and Exact Sciences*, 16(3): 56–62 (in Russian) <https://doi.org/10.31161/1995-0675-2022-16-3-56-62>

- Bondur V.G. 1995. Printsypr postroyeniya kosmicheskoy sistemy monitoringa Zemli v ekologicheskikh i prirodno-resursnykh tselyakh [Principles of Building a Space System for Monitoring the Earth for Environmental and Natural Resource Purposes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodesy and aerialphotography*, 2: 14–38.
- Bondur V.G., Kondratiev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.P. 2005. The Problems of Monitoring and Forecasting of Natural Catastrophes. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 1: 3–14 (in Russian).
- Verkhoturov A.A. 2024. Obosnovanie zonirovaniya vulkanicheskogo vozdeystviya na primere g. Severo-Kuril'sk [Justification of Zoning of Volcanic Impact on the Example of Severo-Kurilsk city]. In: *Regulirovanie zemel'no-imushchestvennykh otnosheniy v Rossii: pravovoe i geoprostranstvennoe obespechenie, otsenka nedvizhimosti, ekologiya, tekhnologicheskie resheniya* [Regulation of Land and Property Relations in Russia: Legal and Geospatial Support, Real Estate Valuation, Ecology, Technological Solutions]. Materials of the National Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, 21–24 November 2024. Novosibirsk, Publ. Siberian State University of Geosystems and Technologies, 1: 100–106. <https://doi.org/10.33764/2687-041X-2024-1-100-106>
- Girina O.A., Loupian E.A., Horvath A., Melnikov D.V., Manevich A.G., Nuzhdaev A.A., Bril A.A., Ozerov A.Yu., Kramareva L.S., Sorokin A.A. 2023. Analysis of the Development of the Paroxysmal Eruption of the Sheveluch Volcano on April 10–13, 2023, Based on Data from Various Satellite Systems. *Modern problems of science and education*, 20(2): 283–291 (in Russian). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
- Gusev A.P. 2023. Methane Flows in the Troposphere: Geological and Anthropogenic Sources (According to Sentinel-5P TROPOMI Data). *Regional Geosystems*, 47(4): 580–592 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-580-592>
- Gusev V.L., Potapov S.L., Sinkova M.G. 2022. Open sources digital terrain model's and digital elevation models accuracy estimation. *Izvestia VUZOV. Geodesy and aerophotosurveying*, 66(1): 52–63 (in Russian). <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2022-66-1-52-63>
- Dolgopolov D.V. 2020. Use of Earth Remote Sensing Data for Formation of Geodata Space of Pipeline Transport. *Vestnik SGUGT* (Siberian State University of Geosystems and Technologies), 25(3): 151–159 (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-3-151-159>
- Dolgopolov D.V. 2021. Pipeline Transport Geospaces. *Vestnik SGUGT* (Siberian State University of Geosystems and Technologies), 26(1): 76–85 (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-1-76-85>
- Dolgopolov D.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. 2021. Geoinformation Support for Safe Operation of Pipeline Transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 332(12): 52–63 (in Russian). <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/12/3028>
- Dubrovsky A.V. 2022. Methodological Approaches to Modeling and Forecasting of Rational Use of Land Resources Using Geotechnologies. *Vestnik SGUGT* (Siberian State University of Geosystems and Technologies), 27(3): 145–156 (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-3-145-156>
- Zakharikhina L.V., Rashidov V.A., Anikin L.P. 2021. The Geochemistry and Potential Fertility of Volcanic Ash Discharged by Alaid and Ebeko Volcanoes, Kuril Islands. *Journal of Volcanology and Seismology*, 15(5): 333–348. (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0742046321050079>
- Zverev A.T., Malinnikov V.A. 2011. Kosmicheskiy geoekologicheskiy monitoring severnykh territoriy Rossii [Space Geoecological Monitoring of the Northern Territories of Russia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodesy and aerialphotography*, 6: 68–73.
- Zverev A.T., Malinnikov V.A., Savinykh V.P. 2011. Kosmicheskiy monitoring dinamiki lednikov Novoy Zemli i Zemli Frantsa-Iosifa [Space Monitoring of the Dynamics of Glaciers of Novaya Zemlya and Franz Josef Land]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodesy and aerialphotography*, 5: 72–75.
- Karpik A.P. 2004. Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformatsionnogo obespecheniya territoriy [Methodological and Technological Foundations of Geoinformation Support of Territories]. Novosibirsk, Publ. SGGA, 259 p.
- Karpik A.P. 2013. Osnovnyye printsypry formirovaniya geodezicheskogo informatsionnogo prostranstva [Basic Principles of Geodesic Information Space Formation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodesy and aerialphotography*, S4: 73–78. (in Russian).

- Karpik A.P., Lisitsky D.V., Musikhin I.A. 2023. Development of Geospatial Activity in Russia: Strategic Directions and Priority Tasks. *Geodesy and cartography*, 84(12): 49–58 (in Russian). <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2023-1002-12-49-58>
- Lisetskii F.N., Goleusov P.V., Buryak Zh.A. 2024. Tolerable soils erosion losses and soil formation rates in the context of carbon balance regulation. *Lomonosov Soil Science Journal*, 79(3): 139–151 (in Russian). <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-3-139-151>
- Mazarovich A.O., Sokolov S.Yu. 2022. The Risk of Destruction of Berenberg Volcano (Jan Mayen Island, Norwegian-Greenland Sea). *Doklady Earth Sciences*, 504(2): 368–371 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1028334X22060113>
- Melkiy V.A. 1999. Aerokosmicheskiy monitoring vulkanoopasnykh territoriy: teoriya i metody [Aerospace Monitoring of Volcano-Prone Areas: Theory and Methods]. Dis. ... Doct. Tech. Sciences. Moscow, 337 p.
- Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. 2022. Current State of the Vegetation Cover of Golovnin Volcano by Space Survey Data (Kunashir Island, Kuril Islands). *Regional Geosystems*, 46(4): 555–573 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-4-555-573>
- Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Bratkov V.V. 2024. Zoning of the Impact of the Ebeko Volcano (Kuril Islands) on Adjacent Lands by the Materials of Aerospace Surveys. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodesy and aerialphotography*, 68(1): 21–32 (in Russian). <https://doi.org/10.30533/GiA-2024-002>
- Ryazanov S.S., Kulagina V.I. 2022. Comparative Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM, MERIT DEM) on the Example of Forest and Floodland Zones of the National Park “Nizhnyaya Kama”. *Geosphere Research*, 1: 107–117 (in Russian). <https://doi.org/10.17223/25421379/22/8>
- Senyukov S.L., Nuzhdina I.N., Droznina S.Ya. 2008. Prostranstvenno-vremennoj analiz zemletrjasenij vulkana Kljuchevskoy za 1999–2007 gg. [Spatial and Temporal Analysis of the Klyuchevskaya Volcano Earthquakes in 1999–2007]. In: *Geofizicheskiy monitoring i problemy sejsmicheskoy bezopasnosti Dal'nego Vostoka Rossii* [Geophysical monitoring and problems of seismic safety in the Russian Far East]. Proceedings of the regional scientific and technical conference, Petropavlovsk-Kamchatsky, 11–17 November 2007. Obrinsk, Publ. Edinaya geofizicheskaya sluzhba Rossiyskoy akademii nauk: 120–124.
- Syvorotkin V.L. 2017. Volcanic Eruptions. *Space and Time*, 1(27): 196–213 (in Russian).
- Khoroshilov V.S., Pavlovskaya O.G., Kobeleva N.N., Yambaev Kh.K. 2023. Mathematical Modeling of the Displacement's Dynamics of Landslide Slopes Under the Conditions of Technogenic Impacts. *Vestnik SGUGT* (Siberian State University of Geosystems and Technologies), 28(1): 45–58 (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-1-45-58>
- Aveni S., Blackett M. 2022. The First Evaluation of the FY-3D/MERSI-2 Sensor's Thermal Infrared Capabilities for Deriving Land Surface Temperature in Volcanic Regions: A Case Study of Mount Etna. *International Journal of Remote Sensing*, 43(8): 2777–2792. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2068360>
- Belousov A., Belousova M., Kotenko T., Auer A., Walter T.R. 2021. Mechanism of the Historical and the Ongoing Vulcanian Eruptions of Ebeko Volcano, Northern Kuriles. *Bulletin of Volcanology*, 83(1): 4. <https://doi.org/10.1007/s00445-020-01426-z>
- Bisson K.M., Gassó S., Mahowald N., Wagner S., Koffman B., Carn S.A., Deutsch S., Gazel E., Kramer S., Krotkov N., Mitchell C., Pritchard M.E., Stamieszkin K., Wilson C. 2023. Observing Ocean Ecosystem Responses to Volcanic Ash. *Remote Sensing of Environment*, 296: 113749. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113749>
- Burgisser A., Peccia A., Plank T., Moussallam Y. 2024. Numerical Simulations of the Latest Caldera-Forming Eruption of Okmok Volcano, Alaska. *Bulletin of Volcanology*, 86(9): 77. <https://doi.org/10.1007/s00445-024-01765-1>
- Calvari S., Nunnari G. 2024. Reawakening of Voragine, the Oldest of Etna's Summit Craters: Insights from a Recurrent Episodic Eruptive Behavior. *Remote Sensing*, 16(22): 4278. <https://doi.org/10.3390/rs16224278>
- Campus A., Laiolo M., Massimetti F., Coppola D. 2022. The Transition from MODIS to VIIRS for Global Volcano Thermal Monitoring. *Sensors*, 22(5): 1713. <https://doi.org/10.3390/s22051713>

- Chen J., Chen Y., Liu Z. 2021. Classification of Typical Tree Species in Laser Point Cloud Based on Deep Learning. *Remote Sensing*, 13(23): 4750. <https://doi.org/10.3390/rs13234750>
- Chen Z., Jacob D.J., Nesser H., Sulprizio M.P., Lorente A., Varon D.J., Xiao Lu, Lu Shen, Qu Z., Penn E., Yu X. 2022. Methane Emissions from China: a High-Resolution Inversion of TROPOMI Satellite Observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(16): 10809–10826. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10809-2022>.
- Fink J., Anderson S. 2023. Lessons Learned from the 1980–1986 Eruption of the Mount St. Helens Composite Lava Dome. *Bulletin of Volcanology*, 85(6): 35. <https://doi.org/10.1007/s00445-023-01642-3>
- Genzano N., Marchese F., Plank S., Pergola N. 2023. Monitoring the Mauna Loa (Hawaii) Eruption of November–December 2022 from Space: Results from Goes-r, Sentinel-2 and Landsat-8/9 Observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122: 103388. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103388>
- Khoroshilov V.S., Kobeleva N.N., Noskov M.F. 2022. Analysis of Possibilities to Use Predictive Mathematical Models for Studying the Dam Deformation State. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 8(2): 733–744. <https://doi.org/10.22055/jacm.2022.38005.3129>
- Liu X, Lian X, Yang W, Wang F, Han Y, Zhang Y. 2022. Accuracy Assessment of a UAV Direct Georeferencing Method and Impact of the Configuration of Ground Control Points. *Drones*, 6(2): 30. <https://doi.org/10.3390/drones6020030>
- Mannini S., Ruch J., Hazlett R.W., Downs D.T., Parcheta C.E., Lundblad S.P., Anderson J.L., Perry R., Oestreicher N. 2024. Tracking Magma Pathways and Surface Faulting in the Southwest Rift Zone and the Koa‘e Fault System (Kīlauea Volcano, Hawai‘i) Using Photogrammetry and Structural Observations. *Bulletin of Volcanology*, 86: 45. <https://doi.org/10.1007/s00445-024-01735-7>
- Martí J., Becerril L., Rodríguez A. 2022. How Long-Term Hazard Assessment May Help to Anticipate Volcanic Eruptions: the Case of La Palma Eruption 2021 (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 431: 107699. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107669>
- Ogburn S.E., Charlton D., Norgaard D., Wright H.M., Calder E.S., Lindsay J., Ewert J., Takarada S., Tajima Y. 2023. The Volcanic Hazard Maps Database: an initiative of the IAVCEI Commission on Volcanic Hazards and Risk. *Journal of Applied Volcanology*, 12: 2. <https://doi.org/10.1186/s13617-022-00128-9>
- Peccia A., Moussallam Y., Plank T., DallaSanta K., Polvani L., Burgisser A., Larsen J., Schaefer J. 2023. A New Multi-Method Assessment of Stratospheric Sulfur Load from the Okmok II Caldera-Forming Eruption of 43 BCE. *Geophysical Research Letters*, 50(21): e2023GL103334. <https://doi.org/10.1029/2023GL103334>.
- Ridolfi F., Almeev R.R., Ozerov A.Yu., Holtz F. 2023. Amp-TB2 Protocol and Its Application to Amphiboles from Recent, Historical and Pre-historical Eruptions of Bezymianny volcano, Kamchatka. *Minerals*, 13(11): 1394. <https://doi.org/10.20944/preprints202309.2133.v1>
- Tesfaye W., Elias E., Warkineh B., Tekalign M., Abebe G. 2024. Modeling of Land Use and Land Cover Changes Using Google Earth Engine and Machine Learning Approach: Implications for Landscape Management. *Environmental Systems Research*, 13: 31. <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00366-3>
- Warwick R., Williams-Jones G., Kelman M., Witter J. 2022. A Scenario-Based Volcanic Hazard Assessment for the Mount Meager Volcanic Complex, British Columbia. *Journal of Applied Volcanology*, 11: 5. <https://doi.org/10.1186/s13617-022-00114-1>

Поступила в редакцию 08.12.2024;
поступила после рецензирования 06.01.2025;
принята к публикации 04.02.2025

Received December 08, 2024;
Revised January 06, 2025;
Accepted February 04, 2025

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мелкий Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, Россия

Долгополов Даниил Валентинович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории разработки и ведения геоинформационных систем и баз данных центра мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта, Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта (ООО «НИИ Транснефть»), г. Москва, Россия; ведущий научный сотрудник лаборатории химико-биологических исследований, Сахалинский государственный университет, г. Южно-Сахалинск, Россия

Верхотуров Алексей Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории островных и прибрежных электроэнергетических систем, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav A. Melkiy, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher of the laboratory of Volcanology and volcanic hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Daniil V. Dolgopolov, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher at the Laboratory for the development and maintenance of geoinformation systems and databases of the Center for monitoring and geoinformation systems of pipeline transport facilities, Limited Liability Company the Pipeline Transport Institute (PTI, LLC), Moscow, Russia; Leading Researcher of the laboratory of Chemical and Biological research, Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Alexey A. Verkhoturov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher of laboratories Island and Coastal Electric power systems, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia