

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ СРЕДНЕГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЭКСПЛОЗИЙ НА ЭКОСИСТЕМЫ**

*Алексей Александрович Верхотуров*

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования, e-mail: ussr-91@mail.ru

*Вячеслав Анатольевич Мелкий*

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, e-mail: vamelkiy@mail.ru

*Инна Ивановна Лобищева*

Сахалинский государственный университет, 693023, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 2, старший преподаватель кафедры геологии и нефтегазового дела Технического нефтегазового института, тел. (4242)45-41-02, e-mail: slalinna@mail.ru

Активизация вулканических процессов способна приводить к катастрофическим последствиям для экосистем, человеческим жертвам и значительному материальному ущербу. Территория Курильских островов и Камчатского края непосредственно находится в зоне риска. Поэтому исследования в данном направлении являются крайне важными.

Целью исследования является определение характера деградации экосистем при эксплозиях и скорости сукцессии на территориях, подвергавшихся воздействию извержения, по космическим снимкам среднего разрешения Landsat и Sentinel.

В работе представлены результаты площадной оценки воздействия на экосистемы северо-западной части острова Атласова (Курильские острова) извержения вулкана Алаид в 1972 году. На основе использования космических снимков среднего разрешения систем Landsat и Sentinel за период с 1972 по 2019 г. в геоинформационной среде были рассчитаны значениям NDVI, что позволило проследить динамику и характер сукцессий пораженной территории.

Выявлено, что многозональные снимки среднего разрешения позволяют довольно качественно определить суть процессов, происходящих на территориях, на которых выпадали твердые продукты извержений.

**Ключевые слова:** многозональные космические снимки, дистанционное зондирование Земли, спектральные характеристики, вулканические эксплозии, мониторинг, вегетационный индекс, Sentinel, Landsat.

## **USING MEDIUM-RESOLUTION SATELLITE IMAGES TO ASSESS IMPACT OF VOLCANIC EXPLOSIONS ON ECOSYSTEMS**

*Alexey A. Verkhoturov*

Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 1B, Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, Ph. D., Senior Researcher, Center of Collective Use, e-mail: ussr-91@mail.ru

### ***Vyacheslav A. Melkiy***

Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 1B, Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, D. Sc., Leading Researcher, Laboratory of Volcanology and Volcanic Hazards, e-mail: vamelkiy@mail.ru

### ***Inna I. Lobishcheva***

Sakhalin State University, 2, Pogranichnaya St., Yuzhno-Sahalinsk, 693023, Russia, Senior Lecturer, Department of Geology and Oil & Gas engineering of Oil and Gas Technical Institute, phone: (4242)45-41-01, e-mail: slalinna@mail.ru

Activation of volcanic processes can lead to catastrophic consequences for ecosystems, loss of life and significant material damage. Territory of the Kuril Islands and the Kamchatka territory is a risk zone. Therefore, research in this direction is extremely important.

The aim of the study was to determine the pattern degradation of ecosystem during explosions and the rate of succession in the affected territories using medium-resolution Landsat and Sentinel satellite images.

The paper presents results of an area-based assessment of impact on ecosystems of the North-Western part of Atlasov Island (Kuril Islands) of eruption of volcano Alaid in 1972. Based on use of 1972–2019 medium-resolution satellite images of Landsat and Sentinel systems, NDVI values were calculated in geoinformation system, which allowed tracing dynamics and nature of successions of affected area.

It was found that multi-zone images of medium resolution allow determining the essence of processes occurring on territories where solid products of eruptions fell out quite qualitatively.

**Key words:** multi-zone satellite images, remote sensing of the Earth, spectral characteristics, volcanic eruptions, monitoring, vegetation index, Sentinel, Landsat.

## ***Введение***

Извержения вулканов – это грозное природное явление, способное привести к существенным изменениям природных ландшафтов, различного рода материальным потерям и человеческим жертвам.

Исследование вопросов, связанных с вулканической деятельностью, имеет очевидную теоретическую и практическую значимость. Наиболее важным обстоятельством является необходимость обеспечения безопасности населения, которую можно обеспечить, организовав комплексный мониторинг действующих вулканов, потенциально опасных для мест постоянного и временного пребывания людей на основе дистанционного зондирования Земли. В работе детально рассмотрены и приведены результаты пространственно-временной оценки воздействия извержения вулкана Алайд в 1972 году на экосистемы северо-западной части острова Атласова (рис.1) [1].

Цель работы – оценить масштабы нарушенности экосистем и характер процессов восстановления на пораженной территории после извержения вулкана Алайд в 1972 г. с использованием космических снимков среднего разрешения и ГИС-технологий.

Задачами исследования являлись:

- подбор репрезентативных разновременных космических снимков среднего разрешения на район исследования;

- расчет NDVI разновременных снимков;
- оценка изменения состояния экосистемы по динамике сукцессии.

Долгосрочный анализ восстановления экосистем после катастрофических эксплозивных извержений представляет большой интерес для более глубокого понимания динамики сукцессии [2]. Несмотря на то, что исследование вулканической активности и последствий извержений на основе данных дистанционного зондирования Земли в научной литературе достаточно широко освещено [3–6], пространственно-временные наблюдения за динамикой сукцессии с применением аэрокосмоснимков весьма редки [7–8].

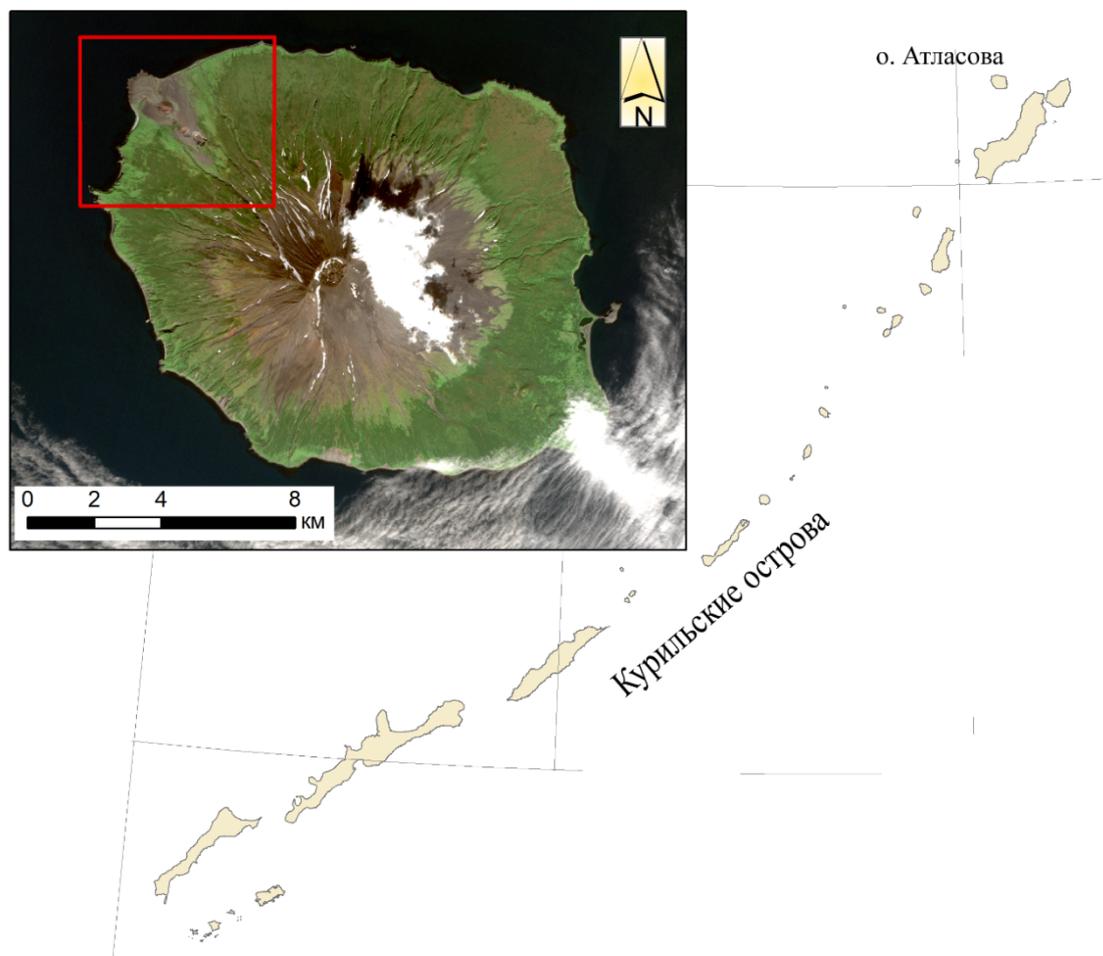


Рис. 1. Местоположение о. Атласова в Большой Курильской гряде и района исследования

### ***Методы и материалы***

Для осуществления исследования был произведен сбор и анализ доступных космических снимков среднего пространственного разрешения систем Landsat 1-8 и Sentinel-2 в период с 1972 по 2019 г. [9]. При подборе снимков руководствовались следующими критериями: дата съемки в вегетационный период (июль-сентябрь) и отсутствие облачности над интересующей областью.

В качестве оценочного средства состояния экосистем непосредственно после мощного эксплозивного извержения на протяжении нескольких десятилетий применялся нормализованный относительный вегетационный индекс (NDVI):

$$NDVI = \left( \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \right), \quad (1)$$

где  $\rho_{NIR}$  – отражение в ближней инфракрасной области спектра,  
 $\rho_{RED}$  – отражение в красной области спектра.

### *Результаты*

Определенный объем вулканического материала, образующего геологическое тело со свойственными ему петрографическими признаками, обусловленный типом извержения, вещественным составом исходного материала, представляет собой вулканическую фацию. Разнообразные условия выноса вулканитов на поверхность, характерные для определенных вулканических построек, накладывают определенный отпечаток на формирующиеся породы и несут генетическую информацию о физико-химических условиях в магматическом расплаве.

Тип вулканической постройки, состав вулканических продуктов и характер извержений зависят от тектонического положения вулканического аппарата. Выделяют два типа вулканов. Первый тип представляют – М (мантийные), которые приурочены к узлам пересечения островной дуги поперечными глубинными разломами (на Курилах являются Алайд, Эбеко, Мильна, Тятя). Извержения проходят в виде эффузии лавовых потоков или выбросов пирокластического материала (пепел, шлак). Твердые продукты извержений представлены породами основного химического состава – базальтами и андезито-базальтами. Другая группа вулканов – К (коровые). Они также имеют исходный мантийный очаг, но так как расположены вне зоны поперечных разломов, то путь их магмы к поверхности более сложный. Возникает цепочка разноглубинных очагов, включая приповерхностные периферические очаги [4].

Произошедшие в XX в. извержения Алайда можно отнести к эксплозивно-эффузивному типу с умеренным характером вулканической деятельности. Наиболее изученным является извержение Олимпийского прорыва в 1972 г. Вязкие базальтовые [10] лавовые потоки излились из побочных кратеров, образовавшихся вдоль трещины северо-западного направления на конусе вулкана порциями, натекающими одна на другую. В результате неоднократного перекрытия отдельных порций лавовые потоки сформировали покров мощностью 35–60 м длиной около 1 км, где монолитная лава переслаивается с глыбовой, в которой глыбы имеют размеры от 0,1 до 1,5 м [11].

Лавовые потоки из конусов и образовали новый полуостров, на котором, естественно, не было никакой растительности. Для первичной сукцессии на лаве потребуется длительный период. Согласно данным С. Ю. Гришина этот период может составлять 1,5–2 тыс. лет. Потоки глыбовой лавы, пересыпанные среднеили мелкообломочным материалом, к 2006 г. были покрыты на 30–50 % мхами.

Участие лишайников (помимо накипных) в растительном покрове было незначительно [12]. В настоящее время сосудистые растения суммарно покрывают 3,7 га (3,53 %) из 104,88 га поверхности лавового поля. Чаше других встречаются пеннелиант кустарниковый (*Pennellianthus frutescens*), анафалис жемчужный (*Anaphalis margaritacea*), папоротник – щитовник широкий (*Dryopteris expansa*), полынь пушистая (*Artemisia opulenta*). Единично на лаве отмечаются небольшие кустики ольховника (*Duschekia kamtschatica*), приуроченные либо к трещинам между глыбами и местам аккумуляции щебнистого мелкозема. Подножия потоков заросли в большей степени, здесь встречаются группы ольховника высотой до 1–1,5 м, а также участки сомкнутой травянистой растительности.

Извержения магматического материала основного состава почти всегда происходят с эксплозивными выбросами шлаков, разнообразных бомб и глыб. Тефровые отложения Олимпийского прорыва представлены в основном ювенильным пирокластическим материалом автохтонного происхождения. Тефра по мере удаления от кратера дифференцируется по крупности, удельной массе и агрегатному состоянию. Различают отложения трех зон: 1) прикратерной, 2) промежуточной, 3) удаленной [13].

Тефра выбрасывалась во всех направлениях, но основной ее объем накрыл северо-восточный сектор на расстояние до 5 км. Общий объем изверженных вулканитов составил около 150 млн. м<sup>3</sup>, в том числе 100 млн. м<sup>3</sup> представлено вулканокластикой [14]. В результате бомбардировки тефрой была поражена растительность на значительной территории, в частности вызвана гибель ольховника, у которого была сбита листва, ободраны почки и кора. На удаленных территориях механические повреждения нанесли меньший урон, однако повреждение листьев и запыление фотосинтетического аппарата отрицательно повлияли на жизненность растений. Цементирование моросью и туманами тонкого пепла на листве и ветвях приводило к их обламыванию. Негативно действовало химическое отравление воднорастворимыми веществами и кислотными дождями [2].

В ходе подбора имеющихся в архиве космических снимков, руководствуясь вышеотмеченными критериями, а также достаточным для фиксирования изменений состояния экосистем исследуемой территории с временным интервалом (10–15 лет) были выбраны 5 сцен. Для обеспечения большей корректности сравнения в степени сезонного развития биомассы, снимки выбирались с близкими датами съемки (конец августа – начало сентября). Исключением был снимок от 27.07.1983, по причине отсутствия лучшего варианта в этот временной интервал.

После проведения атмосферной коррекции и расчета NDVI в геоинформационной среде был получен ряд карт-схем, отражающих состояние и развитие растительности после извержения 1972 г. (рис. 2).

Каждая сцена была расклассифицирована на пять категорий по значению индекса и переведена в векторный формат для подсчета площади полигонов, с различным покрытием растительности (табл. 1). Суммарная площадь проведенного анализа составила 1995,59 га.

В связи с тем, что с июня 2003 года данные Landsat-7 получались с проблемами, сцена за 2006 г. была скомбинирована со сценой за 2007 г. Благодаря этому

удалось избежать значительного искажения показаний NDVI в полосах с отсутствием данных [15].

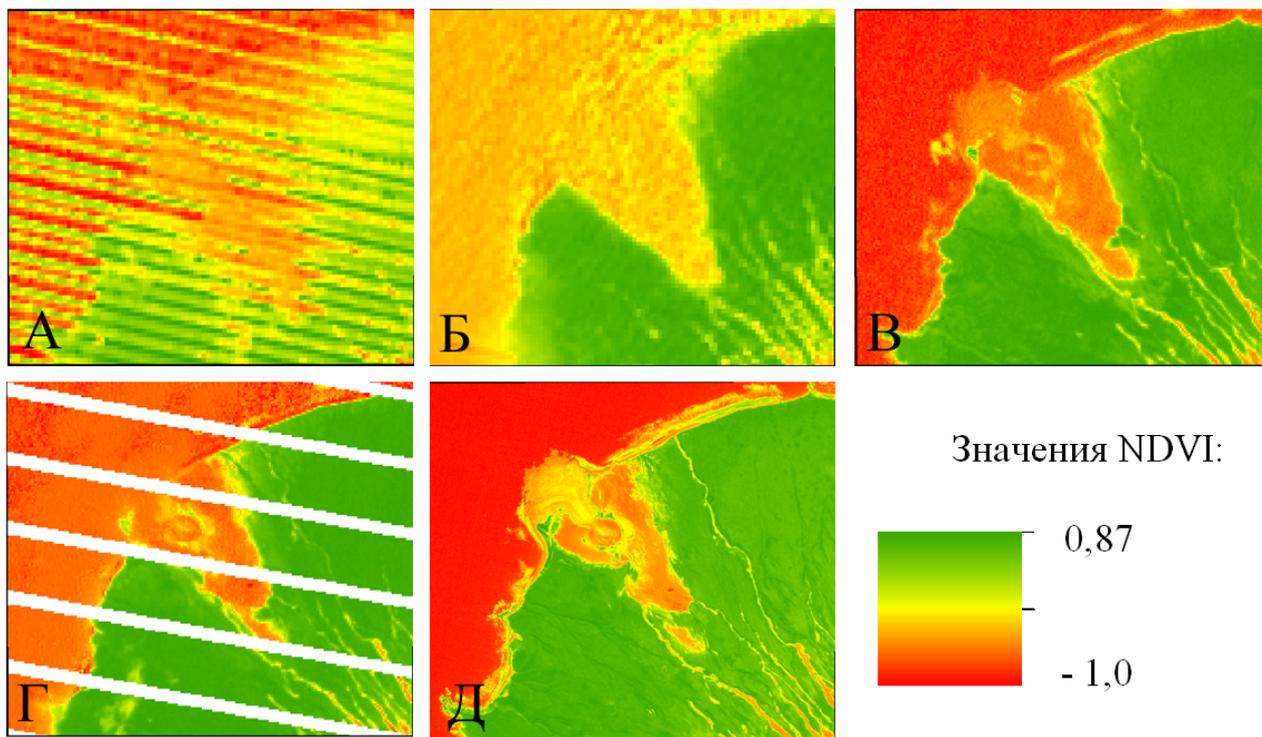


Рис. 2. Результаты расчета NDVI на пораженной территории:  
 А – 1972 г.; Б – 1983 г.; В – 2001 г.; Г – 2007 г.; Д – 2018 г.

Таблица 1

Суммарные площади полигонов с различными значениями NDVI по годам, га

Дата съемки \ Значение NDVI	8.09.1972	27.07.1983	14.09.2001	27.08.2006/ 07.08.2007	10.09.2018
<0	671,61	292,08	190,8	129,41	109,15
0–0,1	191,67	250,32	163,17	138,07	113,35
0,1–0,4	445,59	200,64	188,82	181,32	350,04
0,4–0,65	468,28	358,65	600,12	235,97	163,07
>0,65	218,44	893,9	852,68	1310,82	1259,98

### Обсуждение

Полученные результаты пространственно-временного анализа указывают на закономерную реакцию экосистем после эффузивно-эксплозивного извержения 1972 г., заключающуюся в непрерывном восстановлении растительного покрова (рис. 3). Площадь территории полностью лишенной растительного покрова за 46 лет сократилась на 25,77 %. Высокая степень развития биомассы уве-

личилась с 34,41 % (непосредственно после извержения) до 62,76 % к 1983 г. и до 71,3 % в 2018 г. от общей площади. Наиболее худшим зарастанием характеризуются районы взрывных воронок и лавовых потоков.

Полученные в работе результаты достаточно хорошо коррелируют с результатами других исследователей [2], где на основе дешифрирования аэрофото- снимка за 1980 г. площадь пораженной растительности определена в 8 км<sup>2</sup> (против 7,47 км<sup>2</sup> на 1983 г. по нашим данным). Однако в год извержения площадь пораженной растительности могла достигать 1308,87 га (13,09 км<sup>2</sup>), что косвенно указывает на незначительную мощность отложения тефры (до 30 см по [2]) на большой территории, где была повреждена растительность.

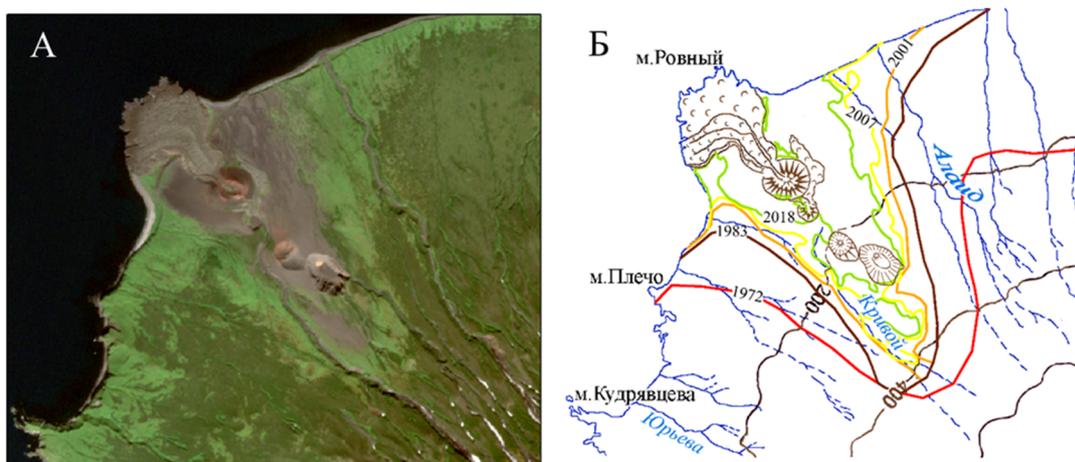


Рис. 3. Район олимпийского прорыва:

А – Фрагмент космического снимка района исследования за 2018 г.; Б – Схема дешифрирования и границы со значением NDVI = 0,4 по данным космической съемки в различные годы

Восстановление растительного покрова сопровождается заселением территории животными. В заплесковых лужах на лавовых потоках В. А. Рашидовым обнаружена «цветная» вода различных оттенков, обусловленных наличием пурпурных фототрофных бактерий, что свидетельствует о стабильном характере функционирования экосистем на территории. В районе Олимпийского прорыва существует колония наземных улиток *Bradybaenidae*, которые успешно пережили извержение вулкана [16]. По наблюдениям зоолога В. Л. Костенко извержение серьезно воздействовало на зоокомпонент экосистем. Погибли все насекомые. В результате пеплопада в зоне поражения были полностью уничтожены или впоследствии погибли от голода полевки-экономки. Другие грызуны (серая крыса) остались между крупными валунами в литоральной зоне, где питались выбросами моря. В 2006 г. в районе прорыва полевки встречались единично, а крысы не наблюдались. Семья лисиц осталась на своем индивидуальном участке. Вне зоны непосредственного воздействия извержения все компоненты экосистем сохранились. В трех километрах к югу от лавового потока, на мысу сохранилось лежбище сивучей (40–50 особей) [2].

## Заключение

Результаты исследования подтверждает опасность воздействия вулканических процессов на растительный покров и животный мир территории, а также наличие риска при ведении хозяйственной деятельности.

Динамика и характер восстановления экосистем после таких катастрофических событий, как эффузивно-эксплозивное извержение 1972 г. вулкана Алаид, могут быть оценены и охарактеризованы на больших площадях с помощью доступных данных дистанционного зондирования среднего разрешения, а, следовательно, способствовать лучшему пониманию сущности факторов вулканического воздействия и реакции экосистем на них.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alaid // Сайт Global Volcanism Program GVP of the Smithsonian Institution. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=290390>
2. Гришин С. Ю., Яковлева А. Н., Шляхов С. А. Воздействие извержения вулкана Алаид (Курильские острова) в 1972 г. на экосистемы // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 4. – С. 30-43.
3. Хренов А. П., Платэ А. Н., Зайцев В. В., Шкарин В. Е. Методика комплексного использования данных дистанционного зондирования для оценки масштаба опасности природных катастроф, вызванных извержениями вулканов // Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами. Сб. докладов Всеросс. науч. конф. (Муром, 20-22 июня 2001). – Муром : Муромский институт Вл. ГУ, 2001. – С. 410-414.
4. Сывороткин В. Л. Извержения вулканов // Пространство и время. – 2017. – № 1(27). – С. 196-213.
5. Верхотуров А. А., Мелкий В. А. Организация системы мониторинга и оценки состояния вулcanoопасных территорий // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространств. обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологич. решения. В 2-х т. Т. 2. Новосибирск: СГУГиТ. – 2018. – С. 167–172.
6. Мелкий В. А., Верхотуров А. А. Геоинформационное и картографическое обеспечение мониторинга для оценки состояния природно-техногенных комплексов Сахалинской области // Геоконтекст. Дрезден – Москва. – 2016. – Вып. 4. – С. 30–44.
7. Teltcher K., Fassnacht F. E. Using multispectral Landsat and Sentinel-2 satellite data to investigate vegetation change at Mount St. Helens since the great volcanic eruption in 1980. J. Mt. Sci. 15, 1851–1867 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11629-018-4869-6>
8. Schutter A, Kervyn M, Cnaters F, et al. (2015) Ash fall impact on vegetation: a remote sensing approach of the Oldoinyo Lengai 2007–08 eruption. Journal of Applied Volcanology 4(15): 1–18. <https://doi.org/10.1186/s13617-015-0032-z>
9. Сайт United States Geological Survey (USGS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/earthexplorer.usgs.gov/>
10. Флеров Г. Б., Иванов Б. В., Андреев В. Н. и др. Вещественный состав продуктов извержения вулкана Алаид в 1981 г. // Вулканол. и сейсмология. – 1982. – № 6. – С. 27-43.
11. Малеев В. Ф. Вулканиды: Справочник. – М.: Недра. – 1980. – 240 с.
12. Гришин С.Ю. Излияние лавовых потоков на Курильских островах в XX и начале XXI века: масштабы и глубина изменения экосистем // Известия Русского географического общества. – 2014. – Т. 146. – № 6. – С. 1–13.
13. Малеев В. Ф. Критерии диагностики и фаций и генетических типов вулканитов. – М.: Наука. – 1975. – 257 с.

14. Гришин С. Ю., Баркалов В. Ю., Верхолат В. П., Рашидов В. А., Шляхов С. А., Яковлева А.Н. Растительный и почвенный покров острова Атласова (Курильские острова) // Комаровские чтения. – 2009. – № 56. – С. 64-119.

15. Landsat 7 // Сайт United States Geological Survey (USGS) [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-7?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-7?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con)

16. Рашидов В. А., Аникин Л. П. Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2019 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2014. – № 2. – Вып. 24. – С. 198–203.

© В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров, И. И. Лобищева, 2020