

© Авторы 2022 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2022. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 910.27+551.21+574.42

<https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.256-276>
<https://www.elibrary.ru/cxolys>

Крупномасштабное картографирование растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающего ландшафта (о. Сахалин) по спутниковым данным

К. А. Швидская*, А. В. Копанина

*E-mail: kristina66689@mail.ru

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Реферат. Методы дистанционного зондирования Земли в связи с их оперативностью и информативностью широко используются для изучения динамики растительности и мониторинга вулканической активности. Цель работы – изучение динамики грязевулканического ландшафта и растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана, а также его окрестностей при помощи данных дистанционного зондирования Земли. Общая площадь исследуемой территории – 11.5 км². Работа выполнена в программе QGIS 3.16 с использованием космического снимка спутника Sentinel-2B, снимков из программы Google Earth и графических карт-схем исследуемой территории, разработанных О.А. Мельниковым и В.В. Ершовым. Создана обновленная крупномасштабная карта-схема Южно-Сахалинского грязевого вулкана с отображением всех известных полей извержений вулкана за последние 70 лет, современного и потухшего эруптивных центров. Проведена полуавтоматическая классификация космического снимка спутника Sentinel-2B методами контролируемой и неконтролируемой классификации при помощи модуля Semi-Automatic Classification Plugin. По результатам двух типов классификации посчитаны площади классов растительности исследуемой территории и созданы две карты растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана в масштабе 1 : 50 000 по состоянию на 2018 г. Карты нуждаются в уточнении, но уже могут быть использованы для анализа динамики растительного покрова исследуемой территории. Неконтролируемую классификацию, на наш взгляд, целесообразнее применять до проведения полевого обследования интересующей территории, а контролируемую – после. Спутниковый мониторинг Южно-Сахалинского грязевого вулкана позволяет оперативно отслеживать его активность, оценивать рекреационную нагрузку и изучать влияние деятельности вулкана на растительность и ландшафт в целом.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, космические снимки, грязевой вулкан, извержение, полуавтоматическая классификация, динамика восстановления растительности, природный стресс, грязевулканический ландшафт

Large-scale mapping of the vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent landscape (Sakhalin Island) using satellite data

Kristina A. Shvidskaya*, Anna V. Kopanina

*E-mail: kristina66689@mail.ru

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. The methods of remote sensing of the Earth, due to their efficiency and information content, are widely used to research vegetation dynamics and monitor volcanic activity. The purpose of this work is to research the dynamics of the mud volcanic landscapes and vegetation cover of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano, as well as its eruption, using Earth remote sensing data. The total area of the study area is 11.5 km². The work was done in QGIS 3.16 program using Sentinel-2B satellite image, images from Google Earth program and graphic maps of the study area created by O.A. Melnikov and V.V. Ershov. An updated large-scale schematic map of the Yuzhno-

Sakhalinsk mud volcano has been created, displaying all known volcanic eruption fields over the last 70 years, modern and extinct eruptive centers. A semi-automatic classification of the Sentinel-2B satellite image was carried out using the methods of supervised and unsupervised classification using the Semi-Automatic Classification Plugin module. Based on the results of two types of classification, the areas of vegetation classes of the study area were calculated and two maps of the vegetation cover of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano were created on a scale of 1 : 50 000 as of 2018. The maps need to be refined, but they can already be used to analyze the dynamics of the vegetation cover of the study area. In our opinion, it is more expedient to apply unsupervised classification before conducting a field survey of the area of interest, and supervised classification after. The practical significance of satellite monitoring of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano lies in the ability to quickly monitor its activity, assess the recreational load and study the impact of volcano activity on vegetation and the landscape as a whole.

Keywords: satellite monitoring, space imagery, mud volcano, eruption, semi-automatic classification, vegetation recovery dynamics, natural stress, mud volcano landscape

Для цитирования: Швидская К.А., Копанина А.В. Крупномасштабное картографирование растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающего ландшафта (о. Сахалин) по спутниковым данным. *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 3, с. 256–276. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.256-276>; <https://www.elibrary.ru/cxolys>

For citation: Shvidskaya K.A., Kopanina A.V. Large-scale mapping of the vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent landscape (Sakhalin Island) using satellite data. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 3, pp. 256–276. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.3.256-276>; <https://www.elibrary.ru/cxolys>

Благодарности и финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Авторы выражают благодарность и глубокую признательность сотрудникам отдела исследования вещественного состава геосфер Центра коллективного пользования Института морской геологии и геофизики ДВО РАН к.ф.-м.н. В.В. Ершову, О.А. Никитенко и к.т.н. А.А. Верхотурову, а также рецензентам за советы и ценные замечания при работе над данной статьей.

Acknowledgements and Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS. The authors express their thanks and deep appreciation to the staff of the Department for the study of material composition of the geospheres of Centre for the collective use, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS Cand. Sci. (Phys. and Math.) V.V. Ershov, O.A. Nikitenko and Cand. of Engineering A.A. Verkhoturuv as well as the Reviewers for advices and valuable comments during the work on this article.

Введение

Изучение динамики растительности и оценка биофизических параметров растительного покрова методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) представляет интерес для широкого круга научных и прикладных задач [1]. Анализ актуальных спутниковых снимков и данных многолетних полевых обследований растительности дает возможность оценивать изменения вулканических ландшафтов и скорости восстановления растительного покрова. Методы ДЗЗ применяются с целью мониторинга вулканической активности, изучения динамики восстановления растительности, вычисления нормализованного разностного индекса растительности (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), моделирования рельефа многих активных магматических вулканов – вулканов Курильских островов [2–4], Сент-Хеленс (США) [5], Олдоиньо-Ленгаи (Танзания) [6] и многих других, а также грязевых вулканов – Пугачевского и Южно-Сахалинского (о. Сахалин) [7–10], грязевых вулканов Керченского и Таманского п-овов [11, 12], о. Дашлы в Каспийском море [13], грязевых

вулканов северной Италии [14], Индонезии [15], грязевого вулкана Вилладжо Санта-Барбара (о. Сицилия, Италия) [16], Аязхтарма (Азербайджан) [17], Люси (Индонезия) [18, 19] и многих других.

Грязевой вулканизм по своему влиянию на ландшафт во многом близок к магматическому вулканизму, например по наличию бурных извержений, их периодичности, специфической форме рельефа, негативному воздействию извергающихся продуктов на окружающую среду. Однако извержения грязевых вулканов менее масштабны, представляя, как правило, меньшую опасность для окружающей среды. Тем не менее они являются опасными природными объектами, последствия таких извержений могут носить катастрофический характер [20–22]. Картографирование территории и растительности грязевого вулкана необходимо для оценки многолетней динамики его деятельности и поиска дополнительных индикаторов его активности по данным о растительности и растениях-ценозообразователях. На основании того, что высота грязевых вулканов не превышает 500 м, а иногда они вовсе не об-

разуют гор, а также в связи с локальностью характера извержений [20, 21], картографирование данных объектов, согласно российскому и зарубежному опыту, является преимущественно крупномасштабным [7, 8, 11, 12, 14–17].

Наш опыт использования ДЗЗ для крупномасштабного картографирования показал, что задача полуавтоматической классификации растительного покрова грязевого вулкана на территории площадью до 15 км² может быть решена [23].

Цель настоящей работы – изучение динамики грязевулканического ландшафта и растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана (ЮСГВ), а также прилегающей территории общей площадью 11.5 км² по данным ДЗЗ.

Открытых данных о картографировании Южно-Сахалинского грязевого вулкана немного. Существующие карты и карты-схемы ЮСГВ содержат информацию о его геологическом строении [24], геоморфологии [9], расположении грифонов и групп грифонов [24, 25] и о характере растительности [24, 26]. Последние данные о характере растительности вулкана были представлены в научной работе К.А. Корзникова [10] по материалам полевых исследований, проведенных автором в 2013–2016 гг.

Необходимо было решить следующие задачи: внести изменения в ранее созданную карту-схему ЮСГВ [23] в масштабе 1 : 10 000; провести классификацию растительности ЮСГВ по спутниковым снимкам за 2018 г. посредством контролируемой и неконтролируемой классификации; проанализировать полученные результаты двух типов классификации и рассмотреть возможности их применения для крупномасштабного картографирования исследуемой территории; создать карты растительности ЮСГВ за 2018 г. в масштабе 1 : 50 000 по результатам проведенных двух типов классификации.

Материал и методы

Объект нашего исследования – Южно-Сахалинский грязевой вулкан – расположен в южной части Западно-Сахалинских гор, в предгорье Мицульского хребта, в между-

речье притоков р. Сусуя: рек Алат и Пута, в 18 км к северо-западу от г. Южно-Сахалинск (47°08'08" N, 142°57'66" E). Приблизительно в 5 км к северо-востоку от ЮСГВ расположен пос. Санаторный и примерно на таком же расстоянии к юго-востоку – садовые некоммерческие товарищества. ЮСГВ является памятником природы и обладает туристическим потенциалом* [26]. В то же время этот потенциально опасный природный объект [21, 27] оказывает существенное влияние на структуру ландшафта и инфраструктуру. По всей видимости, подпорные стенки, возведенные рядом со старой железной дорогой (Южно-Сахалинск – Холмск) со стороны вулкана еще в 30-е гг. XX в., защищали ее от возможных последствий его извержения [9].

Площадь ЮСГВ как особо охраняемой природной территории составляет 40 га (0.4 км²)*. По мнению авторов [9], грязевым вулканом является сдвоенный холм, в северо-восточной части которого располагается современный эруптивный центр. Мы считаем, что территория ЮСГВ значительно шире, она включает в себя современный эруптивный центр и прилегающие среднегорные лесные ландшафты, сформировавшиеся, как полагаем, под воздействием грязевого вулкана, общей площадью до 10–13 км². Площадь объекта нашего исследования составляет 11.5 км².

ЮСГВ представляет собой сдвоенный холм высотой чуть более 300 м над уровнем моря, вытянутый в меридиональном направлении [24]. По своей морфологии это усеченный конус диаметром более 400 м в основании, сложенный глинистыми отложениями (площадь выбросов свежей сопочной брекчии ≈ 5 га). На вершине холма имеются группы грифонов и сальз, из которых активно выделяются вода, газ и сопочный ил [28]. На пологих привершинных склонах холма фиксируются радиально расходящиеся эрозионные борозды и промоины глубиной 0.5–1.0 м. С увеличением крутизны склонов они углубляются и расширяются, сохраняясь даже под пологом леса. Обилие выпадающих осадков способствует их постепенному росту и формированию оврагов как на свежих грязевых потоках, так и на более древних (уже залесенных) полях сопочной брекчии

* Государственный кадастр особо охраняемых природных территорий регионального значения Сахалинской области. 2021. Южно-Сахалинск, с. 727–729 [State cadaster of specially protected natural areas of regional importance of the Sakhalin region. 2021. Yuzhno-Sakhalinsk, p. 727–729].

[9]. Извержения ЮСГВ происходят довольно часто. Сильные извержения вулкана зафиксированы в 1959, 1979 и 2001 гг., более слабые – между 1994 и 1996, в 2011 и 2020 гг. При извержении за небольшой промежуток времени вулканом выбрасываются большие объемы сопочной брекчии (порядка 10^3 – 10^5 м³) и подземных газов (преимущественно углекислый газ). В связи с этим грязевой вулканизм относится к опасным геологическим процессам, которые необходимо учитывать при развитии инфраструктуры, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. В грифонную стадию грязевой вулкан постоянно выделяет в относительно небольших количествах сопочную брекчию и газы из грифонов – эруптивных аппаратов. Общее число грифонов на вулкане остается практически неизменным из года в год – 40–70 [25]. Изменения температурного режима грифонов обусловлены главным образом вариациями скорости движения водогрязевой смеси в грифонных каналах [20].

Для вод ЮСГВ характерна высокая минерализация – в среднем 22.5 г/л. Значения pH находятся в диапазоне 7.0–9.2. ЮСГВ выносит на поверхность гидрокарбонатно-хлоридно-натриевые воды, богатые литием и бором. В составе газовых выбросов преобладает CO₂ (60–95 об.%) [28–31].

Растительность ЮСГВ находится под постоянным влиянием его деятельности и имеет сложную мозаичную структуру. Она представлена как луговой растительностью на первых стадиях сукцессии, так и лесной – разнообразными смешанными мелколиственно-темнохвойными сообществами [26, 32]. Отложения грязевого вулкана, особенно сравнительно свежие, на которых поселяются травянистые и древесные растения, характеризуются щелочностью с содовым засолением, что играет определяющую роль для жизни растений [32–34]. Грязевое поле зарастает постепенно в направлении от эруптивного центра, смена растительных группировок и сообществ происходит во времени аналогично зарастанию фумарольных полей магматических вулканов. Грязевые поля разных лет являются хорошей площадкой для изучения закономерностей сукцессионных процессов. Растительность проходит основные стадии первичной сукцессии, а также подвержена трансформации в резуль-

тате реактивации отдельных грифонов и сальз [32, 35, 36]. Высокая напряженность среды в ландшафте ЮСГВ вызывает адаптивные изменения базовых физиологических процессов растений, в особенности долгоживущих жизненных форм – деревьев и кустарников, что находит отражение в структурных перестройках в органах таких растений [32, 34, 37, 38].

Наша работа выполнена при помощи геоинформационной системы с открытым исходным кодом QuantumGIS 3.16 (QGIS) [39]. Изменения в ранее созданную карту-схему ЮСГВ [23] вносили с использованием крупномасштабной (1 : 1 000) картосхемы центральной (привершинной) части ЮСГВ после его извержения в декабре 2001 г. [24], карты-схемы ЮСГВ [25], топографической карты «Торомар (marshruty.ru)» из модуля QuickMapServices, данных совместных полевых исследований на ЮСГВ сотрудников лаборатории экологии растений и геоэкологии и отдела исследования вещественного состава геосфер ЦКП ИМГиГ ДВО РАН, а также анализа спутниковых снимков области исследования из программы Google Earth (за 2016, 2017 и 2021 гг.).

Для осуществления полуавтоматической классификации растительного покрова ЮСГВ (далее – классификация) был использован мультиспектральный снимок юго-восточной части о. Сахалин от 05.10.2018 г. спутника Sentinel-2B* и модуль Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). SCP – это плагин Python для программного обеспечения QGIS, разработанный с целью облегчения проведения мониторинга растительного покрова специалистами различных областей, в том числе с применением данных ДЗЗ [40].

Для дешифрирования и подборки каналов мультиспектрального снимка ЮСГВ мы использовали рекомендации Д.В. Курбатского [41] и информационную таблицу по интерпретации каналов [42], в которой приведено сопоставление каналов мультиспектральных снимков различных спутников (MODISMCD43A4, Landsat 8, Sentinel-2A).

Были применены два метода классификации спутникового снимка – контролируемая («с обучением») и неконтролируемая («без обучения»).

Контролируемая классификация заключается в отнесении каждого из пикселей снимка к

* United States Geological Survey (USGS). URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 05.09.2021).

определенному классу объектов, которому соответствует некоторая область в пространстве спектральных признаков. Данный тип классификации используется, когда есть возможность задать на снимке обучающую выборку. Обучающая выборка представляет собой совокупность участков-эталонов, принадлежность которых к определенному классу объектов установлена по данным натурных обследований, детальным снимкам или картам и которые

уверенно опознаются на снимке [43]. Обучающая выборка была основана на материалах полевой карты, разработанной нами в 2018 г.

Неконтролируемая классификация (кластеризация) позволяет автоматически разделить все изображение снимка на участки с одинаковыми объектами на основе близких значений их спектральной яркости. При этом группы (кластеры), к которым отнесены все пиксели изображения, не обязательно соответствуют тематическим (информационным) классам. Критерием отнесения пикселей к тому или другому кластеру служит только схожесть спектральных характеристик [43]. В качестве алгоритма обработки изображения был выбран итеративный алгоритм ISODATA, используемый для более точной пошаговой кластеризации [44].

Результаты и обсуждение

Анализ данных полевого обследования 2020–2021 гг. после извержения ЮСГВ 2020 г. и снимков из программы Google Earth за разные годы (август 2016 и август 2021) представлен на карте-схеме ЮСГВ (рис. 1). На этой схеме обобщен графический материал об эруптивной деятельности ЮСГВ за последние 70 лет и представлены границы грязевых полей всех известных извержений разных лет (1959, 1966, 1979, 1996, 2001, 2011 и 2020 гг.). Сравнительный анализ космических снимков за разные годы, сведения об обследовании извержений ЮСГВ разных лет [20, 24, 25, 45], а также данные наших полевых исследований в 2020 и 2021 гг. позволяют сделать вывод о том, что извержение ЮСГВ в 2020 г. является сравнительно крупным, вероятно сопоставимым по объемам изверженной брекчии и влиянию на ландшафт с извержением 2001 г. Направление основного грязевого потока 2020 г., имеющего, по нашему мнению, оползневую природу, совпадает с направлением потока 2001 г. (рис. 1). Достигнув р. Алат, грязевой поток 2020 г., по состоянию с сентября 2020 по сентябрь 2021 г., «ушел» приблизительно на 90–100 м на север (по течению р. Алат) и на 300 м на юго-запад (против течения р. Алат).

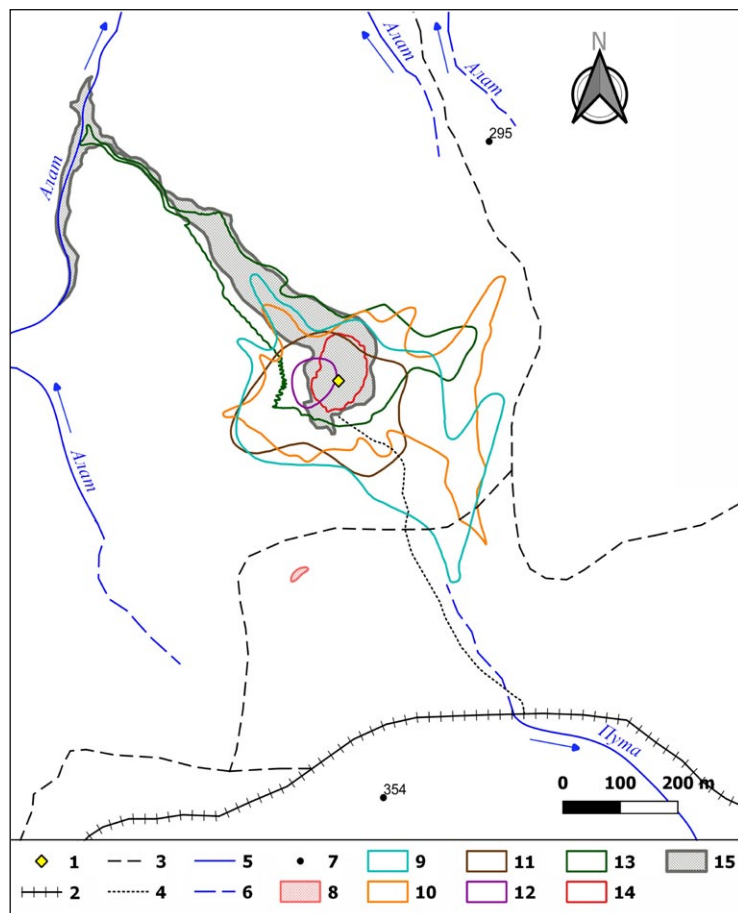


Рис. 1. Карта-схема извержений Южно-Сахалинского грязевого вулкана за последние 70 лет. 1 – современный эруптивный центр (данные полевого обследования В.В. Ершова); 2 – старая железная дорога (Южно-Сахалинск – Холмск); 3 – просека; 4 – тропа, ведущая от железной дороги к грязевому полю; 5 – реки; 6 – истоки рек; 7 – основные высоты (295 и 354 м); 8 – «старый вулкан» [45]; 9–15 – грязевые поля после извержений: 9 – 1959 г. [24], 10 – 1966 [24], 11 – 1979 [24], 12 – 1996 [24], 13 – 2001 [24], 14 – 2011 [25], 15 – 2020 г. Синие стрелки – направление течения рек.

Fig. 1. Schematic map of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano eruptions over the past 70 years. 1 – modern eruptive center (data from field survey by V.V. Ershov); 2 – old railroad (Yuzhno-Sakhalinsk – Kholmsk); 3 – clearing; 4 – trail leading from the railroad to the mud field; 5 – rivers; 6 – the sources of the rivers; 7 – major elevations (295 and 354 m); 8 – «old volcano» [45]; 9–15 – mud fields after eruptions: 9 – 1959 [24], 10 – 1966 [24], 11 – 1979 [24], 12 – 1996 [24], 13 – 2001 [24], 14 – 2011 [25], 15 – 2020. Blue arrows show the direction of river flow.

В мае 2020 г. в ходе полевого обследования последствий извержения мы обнаружили в русле р. Алат сформированную из брекчии объемную плотину, которая сместила русло и существенно сократила дебит реки. Это привело к формированию большой запруды вверх по течению р. Алат, способствовавшей перемещению изверженной и оползневой брекчии. Исходя из известных нам данных о предыдущих извержениях ЮСГВ, отображенных на сформированной нами карте-схеме (рис. 1), такое явление наблюдается впервые.

Полевое обследование центральной части ЮСГВ в конце мая 2020 г., вероятно спустя не более 2–3 мес. после извержения, показало, что вся луговая растительность с участием древесных растений, сформировавшаяся на отложениях 2001 г., была полностью уничтожена новым извержением вулкана. Часть луговых сообществ оказалась захороненной под изверженной брекчией, а остальная территория центра вулкана и потока 2001 г. с луговой и лесной растительностью была пройдена массивным оползнем.

Картографирование ЮСГВ по спутниковым снимкам позволило проследить динамику изменения грязевулканического ландшафта и его территории за последние 70 лет. Систематизированные данные об извержениях вулкана существенно упрощают этот процесс. На схеме (рис. 1) видно, что с 2001 г. грязевые поля стали приобретать другую форму. По мнению О.А. Мельникова [24], данное явление объясняется тем, что грязевой поток 2001 г. изменил свое направление, встретив сопротивление со стороны грязевых полей предыдущих лет, которые образовали широкие и пологие валы возвышений.

Оползневой грязевой поток извержения 2020 г. полностью уничтожил всю луговую растительность на потоке 2001 г. и существенно нарушил лесную растительность вдоль его границ, что отчетливо видно на космических снимках (рис. 2) и фотографиях (рис. 3), сделанных во время полевых исследо-

ваний в 2018 и 2021 гг. Кроме того, извержением 2020 г. была уничтожена растительность вдоль берегов р. Алат на расстоянии приблизительно 400 м (рис. 2). На снимках прослеживается динамика восстановления растительности вдоль северо-восточной границы нового грязевого поля 2020 г. Фрагментарно вокруг эруптивного центра и свежего грязевого поля сохранилась луговая растительность, представленная пионерным сообществом триостренника болотного (*Triglochin palustre* L.), появляющимся обычно спустя 2–3 года после извержения [32]. На фотографиях «языка» вулкана также представлен *Triglochin palustre*.

На рис. 4 изображены границы грязевого поля извержения 2020 г., современный эруптивный центр, группы активных грифонов и «старый вулкан», совмещенные со спутниковым снимком из программы Google Earth (август 2021 г.). Можно увидеть, что вокруг эруптивного центра растительность отсутствует. В местах скопления грифонов, располагающихся вдали от эруптивного центра, практически



Рис. 2. Снимки Южно-Сахалинского грязевого вулкана из программы Google Earth: верхний – август 2016, нижний – август 2021 г.

Fig. 2. Images of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano from Google Earth: upper – August 2016, lower – August 2021.



Рис. 3. Полевые обследования центральной части Южно-Сахалинского грязевого вулкана последних лет. Слева – зарастающий луговой растительностью с участием подроста древесных растений грязевой поток 2001 г. (осень 2018 г., фото А.И. Тальских), справа – оползневой поток извержения 2020 г. (лето 2021 г., фото К.А. Швидской) с фрагментами сохранившейся луговой растительности.

Fig. 3. Recent field surveys of the central part of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano. On the left is the mudflow of 2001 overgrown with meadow vegetation with the participation of undergrowth of woody plants (fall 2018, photo by A.I. Talskikh); on the right is the landslide flow of the 2020 eruption (summer 2021, photo by K.A. Shvidskaya) with fragments of preserved meadow vegetation.

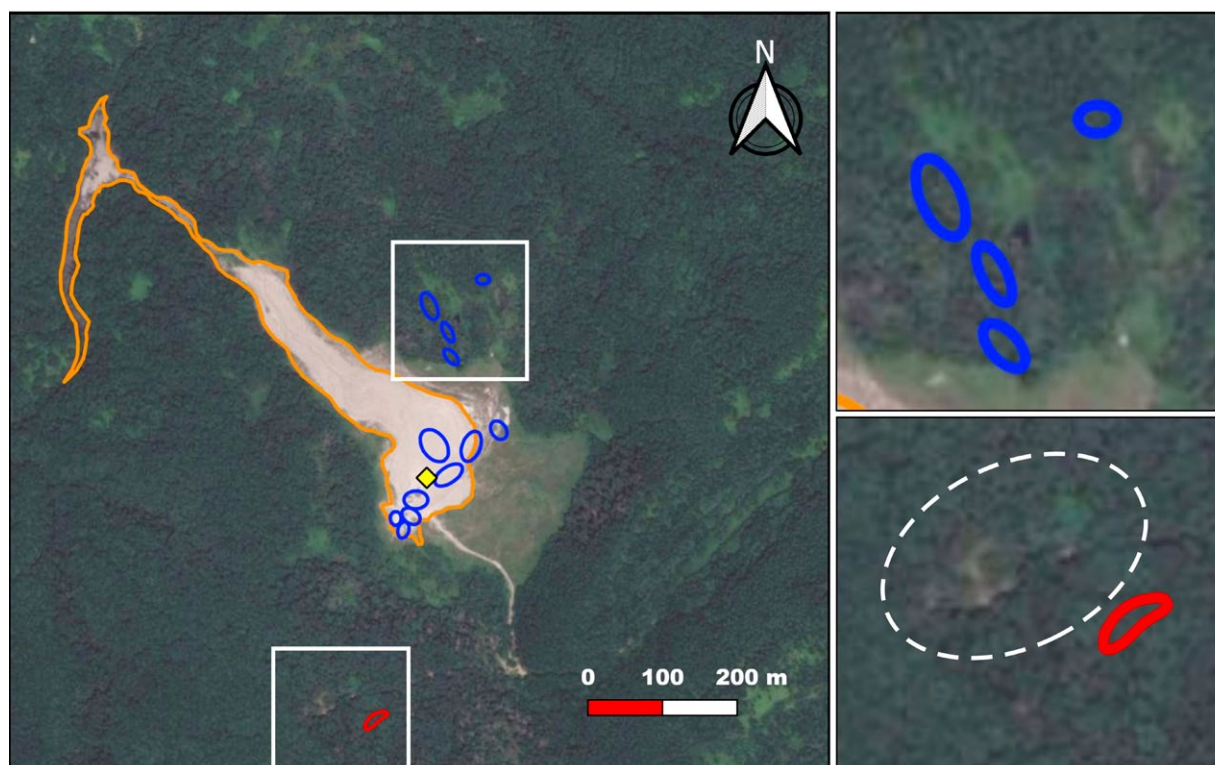


Рис. 4. Границы грязевого поля 2020 г. Южно-Сахалинского грязевого вулкана (оранжевый контур), современный эруптивный центр (желтый ромб) (данные полевого обследования В.В. Ершова), группы активных грифонов (синий контур) [25] и «старый вулкан» (красный контур) [45], совмещенные со снимком из программы Google Earth (август 2021 г.), привязанным в QGIS. В увеличении представлены: справа сверху – группы активных грифонов в лесу, внизу – «старый вулкан» с различающейся на снимке безлесной полосой (белая штриховая линия).

Fig. 4. The boundaries of the 2020 mud field of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano (orange outline), the modern eruptive center (yellow rhombus) (data from field survey by V.V. Ershov), active griffin groups (blue outline) [25] and the «old volcano» (red outline) [45], presented in the image from Google Earth (August 2021), referenced in QGIS. The magnification shows: top right – groups of active griffins in the forest; bottom right – the «old volcano» with a distinguishable in the image treeless strip (white dashed line).

отсутствует древесная растительность, что свидетельствует об их слабой, но постоянной активности. Грифоны и сальзы, действующие в лесу, оказывают угнетающее влияние на растительность (рис. 5). «Старый вулкан», описанный О.А. Мельниковым и Р.Н. Сабировым [45], упоминающийся в трудах Ф. Сайто [46], на снимке не просматривается. Однако хорошо различается безлесная заболоченная полоса – краевое понижение прежнего вулкана, располагающееся немного северо-западнее «старого» эруптивного центра. По данным проведенных ранее сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН полевых исследований [45], растительность, в том числе древесная, на «старом вулкане» моложе, чем за его границами. За последнее столетие эруптивный центр ЮСГВ сместился приблизительно на 330 м на северо-восток. Таким образом, при помощи космических снимков представляется возможным наметить районы проведения полевых исследований в будущем с целью поиска новых индикаторов активности вулкана.

По материалам полевого обследования территории ЮСГВ, проведенного в 2017–2018 гг. нами, с применением метода визуального дешифрирования спутникового снимка из программы Google Earth (май 2017 г.), была разработана полевая карта растительности ЮСГВ и прилегающей территории по состоянию на 2018 г. (полевая карта) в масштабе 1 : 30 000 (рис. 6).

На рис. 6 видно, что для территории ЮСГВ характерна мозаичность отдельных фитоценозов – неравномерность сложения его горизонтальной структуры. Мозаичность фитоценоза очень хорошо выражена в хвойно-мелколиственных лесах.

На грязевом поле извержения 2011 г. растительность практически отсутствует, встречаются лишь единичные растения *Triglochin palustre*. Чем дальше от грязевого поля, тем более сомкнуто располагаются группировки данного вида, в его дернинах поселяются зеленые мхи. Лишайников в пределах эруптивного центра не обнаружено [32]. К.А. Корзников [26] отмечает,



Рис. 5. Сальзы в северной части смешанного леса Южно-Сахалинского грязевого вулкана, обнаруженные во время полевых обследований 2016 г. Фото А.В. Копаниной.

Fig. 5. Salsas in the northern part of the mixed forest of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano, discovered during the field surveys in 2016. Photo by A.V. Kopanina.

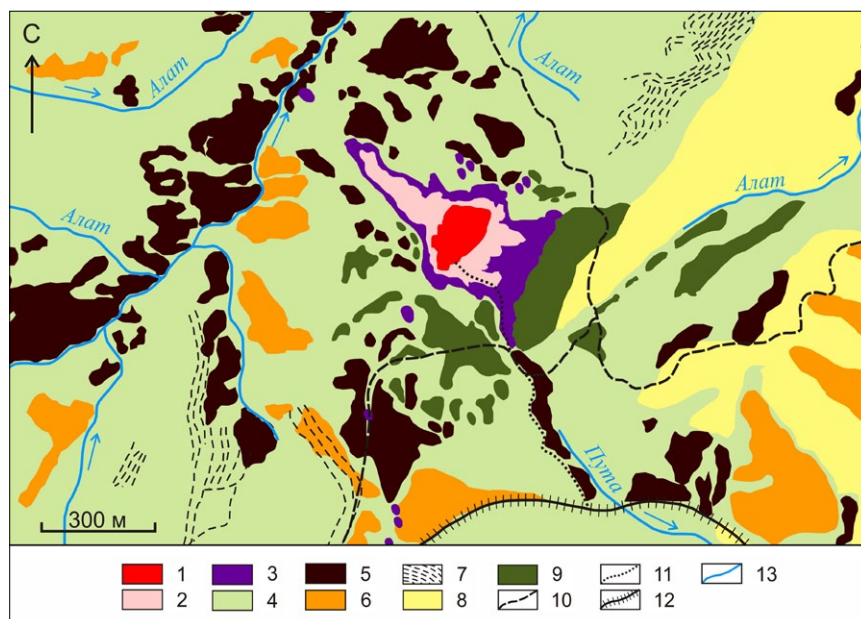


Рис 6. Полевая карта растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории по состоянию на 2018 г. 1 – грязевое поле после извержения 2011 г.; 2 – пионерное сообщество *Triglochin palustre*; 3 – сообщество *Phragmites australis* с участием разнотравья; 4 – смешанный мелколистный лес; 5 – березово-ольховые высокотравные леса; 6 – березово-ольховые бамбучниковые и вейниково-высокотравные леса; 7 – лесопосадки *Larix cajanderi*; 8 – редколесье с *Sasa kurilensis*; 9 – пихтово-еловый лес; 10 – просека; 11 – тропа, ведущая от железной дороги к грязевому полю; 12 – старая железная дорога (Южно-Сахалинск – Холмск); 13 – реки с притоками. Голубые стрелки – направление течения рек.

Fig. 6. Field map of the vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent territory as of 2018. 1 – mud field after the 2011 eruption; 2 – pioneer community of *Triglochin palustre*; 3 – *Phragmites australis* community with forbs; 4 – mixed small-leaved forest; 5 – birch-alder tall grass forests; 6 – birch-alder bamboo and reed grass-high grass forests; 7 – forest plantations of *Larix cajanderi*; 8 – woodlands with *Sasa kurilensis*; 9 – fir-spruce forest; 10 – clearing; 11 – trail leading from the railroad to the mud field; 12 – old railroad (Yuzhno-Sakhalinsk – Kholmsk); 13 – rivers with tributaries. Blue arrows show the direction of river flow.

что, в отличие от первичных сукцессий, которые происходят на застывших лавах магматических вулканов, на грязевых полях ЮСГВ доминируют сосудистые растения.

На расстоянии 100–150 м от грязевого поля сообщество *Triglochin palustre* сменяется сообществом тростника обыкновенного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steud.) с участием разнотравного компонента: подорожник обыкновенный (*Plantago major* L.), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.), осот полевой (*Sonchus arvensis* L.), анафалис жемчужный (*Anaphalis margaritacea* (L.) Benth. & Hook. F.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* (L.) Webb ex F.H. Wigg.), астра Глена (*Aster glehnii* F. Schmidt.), белокопытник японский (*Petasites amplus* Kitam.), бодяк камчатский (*Cirsium kamtschaticum* Lebed. ex DC) и др. В зоне контакта травянистых сообществ и леса по-

является подрост древесных растений, таких как береза каменная (*Betula ermanii* Cham.), береза плосколистная (*Betula platyphylla* Sukaczew), ива козья (*Salix caprea* L.), кустарник малина сахалинская (*Rubus sachalinensis* H. Lev.).

На удалении от грязевого поля в 180 м произрастает березово-ивово-ольховый лес с участием ели аянской (*Picea ajanensis* (Lindl. et Gord.) Fisch. ex Carr.), пихты сахалинской (*Abies sachalinensis* (F. Schmidt) Mast.) и лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr). Смешанный мелколистный лес занимает обширные пространства, участие *Picea ajanensis* и *Abies sachalinensis* в лесах фрагментарное и единичное. Березово-ольховые высокотравные ассоциации включают одновидовые синузии высокотравья, представленные какалией мощной (*Cacalia robusta* Tolm.), таволгой камчатской (*Filipendula camtschatica* (Pall.) Maxim.), *Petasites amplus*, а также кустарниковые синузии бересклета сахалинского (*Euonymus sachalinensis* (F. Schmidt.)). В березово-ольховых бамбучниковых ассоциациях синузии бамбучника курильского (*Sasa kurilensis* (Rupr.) Makino & Shibata) чередуются с вейниково-высокотравными синузиями. На очень небольших участках произрастают пихтово-еловые сообщества.

В результате деятельности грифонов и сальз, располагающихся в лесу, погибают деревья, в первую очередь хвойные – ели и пихты, а позже лиственные – березы и рябины. Наиболее устойчивы к деятельности грязевулканических проявлений в лесу особи ольхи пушистой (*Alnus hirsuta* (Spach) Rupr.). Продолжительная и достаточно регулярная активность грифонов и сальз может привести к гибели сначала отдельных деревьев, а затем и целых лесных сообществ. Затем на изверженной брекчии начинается первичная сукцессия,

образуются травянистые сообщества (такие места обозначены на рис. 6 фиолетовым цветом за пределами «тела» грязевого вулкана), постепенно сменяющиеся мелколистственным, а затем пихтово-еловым лесом [32].

Для классификации растительного покрова ЮСГВ был выбран спутниковый снимок от 05.10.2018 г. (Sentinel-2B), выгруженный через модуль SCP с официального сайта Геологической службы США*. Выбор спутника Sentinel обоснован научно-практическим опытом А.П. Карпачева [49, 50], который провел классификацию спутниковых снимков Landsat и Sentinel-2A в QGIS при помощи модуля SCP с целью выявления участков усохшего и нарушенного леса на территории Национального парка «Орловское полесье» (Орловская обл., Россия). Параметры видимых каналов космических снимков у Landsat составляют 30 м, а у Sentinel-2A – 10 м. Таким образом, результаты классификации снимка Sentinel-2A, представленные А.П. Карпачевым, являются более четкими. Поэтому для исследуемой нами территории ЮСГВ, площадью 11.5 км², целесообразно использование снимков спутника Sentinel. Область исследования для проведения классификации была определена приблизительно в 3.3 × 3.5 км, с расположением грязевого поля ЮСГВ в центре.

При выборе комбинации каналов спутникового снимка от 05.10.2018 г. (Sentinel-2B) нами учитывался опыт применения комбинации «искусственные цвета» (8–4–3) (рис. 7 А), используемый при классификации различных типов растительности и широко освещенный в литературе [41, 51–55]. Также была выбрана комбинация «естественные цвета» (4–3–2) (рис. 7 Б). Выбор А.П. Карпачева [50] – комбинация каналов 4–6–12 (рис. 7 В) – нами не использовался по причине худшего, чем две первые комбинации, разрешения. Согласно таблице, приведенной В.Д. Долгополовым [42], отражающей области спектра, диапазоны и пространственное разрешение съемочных систем TERRA/AQUA, Landsat 8, Sentinel-2A, разрешение каналов B2, B3, B4 и B8 спутника Sentinel-2A составляет 10 м, а каналов B6 и B12 – 20 м.

В качестве основы обучающей выборки для проведения контролируемой классифика-

ции была использована полевая карта (рис. 6). В целях упрощения визуального дешифрирования снимка был выбран композит каналов 4–3–2 (рис. 7 Б). Осенний спутниковый снимок для классификации растительного покрова является наиболее актуальным, так как позволяет визуально отделить листовенные породы деревьев от темнохвойных и лиственницы. Также учитывались особенности рельефа исследуемой территории. На спутниковом снимке (рис. 7 Б) визуально видны повышения и понижения рельефа местности, заметны тени от гор и холмов. Многообразие вариаций лесных сообществ на исследуемой территории делает спутниковый снимок очень богатым в цветовом отношении.

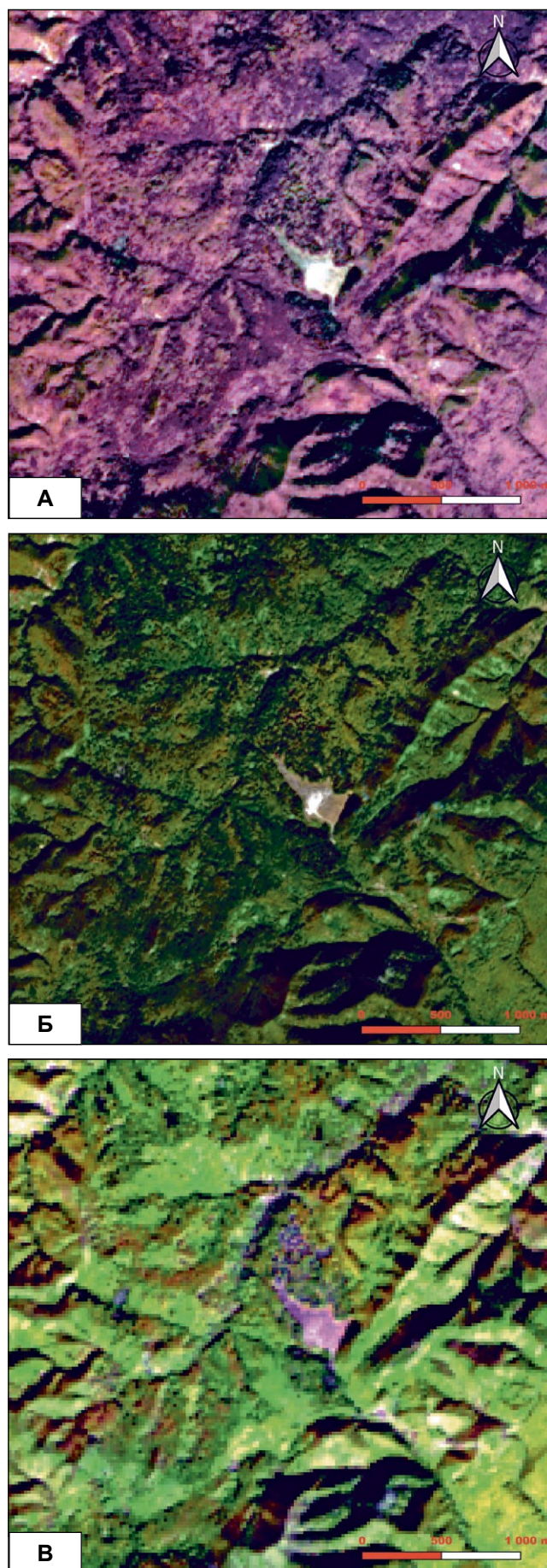
Так как алгоритмы с обучением используются, когда классов не очень много и они четко различаются на снимке [43], мы решили упростить классы растительности, которые определены на полевой карте. Это объясняется тем, что травянистые сообщества *Triglochin palustre* и *Phragmites australis* на спутниковом снимке имеют практически одинаковый цвет пикселей и для их классификации необходим снимок с более высоким разрешением, а разница между березово-ольховыми высокотравными лесами и березово-ольховыми бамбучниковыми ивейниково-высокотравными лесами на снимке не видна. Участки же с пихтово-еловым лесом, указанные на полевой карте, оказались покрыты тенью.

Таким образом, для проведения контролируемой классификации были определены 7 участков-эталонов (ROI – region of interest) (рис. 8):

- 1) отложения грязевулканической брекчии;
- 2) эродированные отложения грязевулканической брекчии, на которых произрастают травянистые сообщества;
- 3) смешанный мелколистственный лес с преобладанием *Betula ermanii* и *Betula platyphylla*;
- 4) смешанный мелколистственный лес с преобладанием *Abies sachalinensis* и *Larix cajanderi*;
- 5) редколесье с *Sasa kurilensis*;
- 6) редколесье с *Phragmites australis*;
- 7) пихтово-еловый лес.

Результат контролируемой классификации растительного покрова ЮСГВ, полученный при помощи SCP (рис. 9 А), частично совпа-

* United States Geological Survey (USGS). URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 05.09.2021).



дает с полевой картой. Три класса растительности, общие для полевой карты и результата контролируемой классификации (отложения грязевулканической брекчии, он же – грязевое поле после извержения 2011 г., редколесье с *Sasa kurilensis* и пихтово-еловый лес), на наш взгляд, классифицированы хорошо. «Тело» вулкана также практически полностью совпадает с полевой картой и снимком спутника Sentinel-2B (05.10.2018 г.) (рис. 9 Б). Вокруг «тела» грязевого вулкана четко обозначен переход травянистой растительности в редколесье с *Phragmites australis*. Красным контуром выделены места, классифицированные как эродированные отложения грязевулканической брекчии, на которых произрастают травянистые сообщества (рис. 9 А, Б). На снимке цвет пикселей таких участков визуально практически не отличается от цвета пикселей «тела» вулкана. Согласно результату классификации данные участки окружены редколесьем с *Phragmites australis*. Мы можем предположить, что древесная растительность на этих участках отсутствует, происходит процесс первичной сукцессии. Одной из причин этого явления может быть грифонная деятельность ЮСГВ, однако не исключены и оползневые процессы. Необходимо изучение данного вопроса в полевых условиях.

Также дополнительного уточнения требуют участки, покрытые тенью. Затененные участки в нашем случае классифицировались как смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Betula ermanii* и *Betula platyphylla*, смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Abies sachalinensis* и *Larix cajanderi* и пихтово-еловый лес. Это произошло по причине того, что темные пиксели попали в обучающую выборку участков-эталонов под номерами 3, 4 и 7. На наш взгляд, классификация растительного покрова затененных территорий, при отсутствии снимка с другого ракурса, возможна только путем проведения полевых исследований. В целом такой результат на данном этапе работы мы считаем приемлемым.

Рис. 7. Снимок Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории со спутника Sentinel-2B (05.10.2018 г.) в композитах каналов 8–4–3 (А), 4–3–2 (Б) и 4–6–12 (Б) [50].

Fig. 7. Image of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent territory from the Sentinel-2B satellite (October 5, 2018) in composites of channels 8–4–3 (A), 4–3–2 (B) and 4–6–12 (B) [50].

Рис. 8. Процесс проведения обучающей выборки в SCP (контролируемая классификация), представленный на спутниковом снимке Sentinel-2B (05.10.2018 г.) в композите каналов 4–3–2. Участки-эталоны (ROI) см. в тексте.

Fig. 8. The process of a training sampling in SCP (supervised classification), presented on the Sentinel-2B satellite image (October 5, 2018) in the composite of channels 4–3–2. Reference-sites (ROI) see in the text.

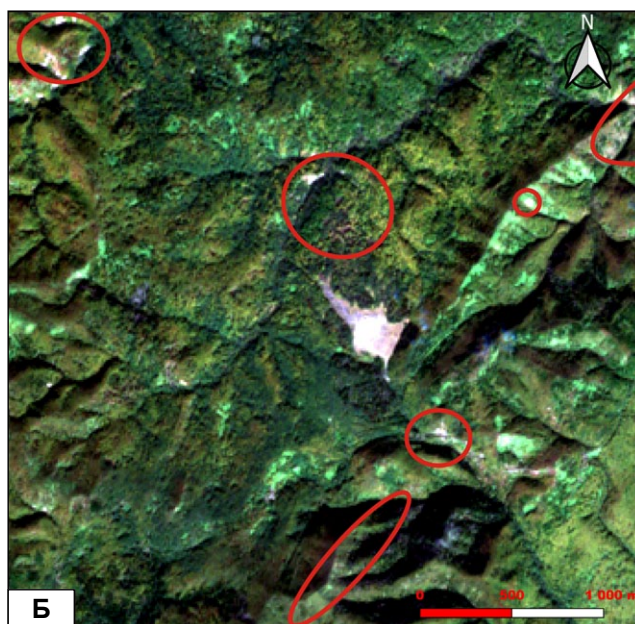
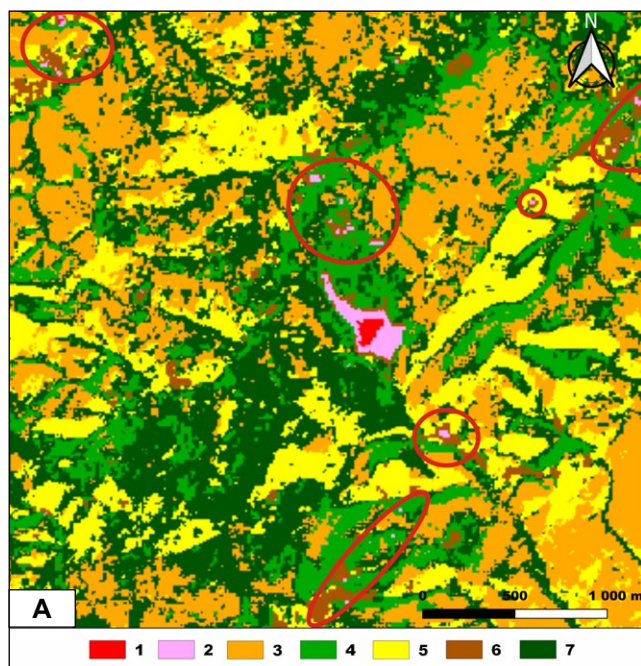
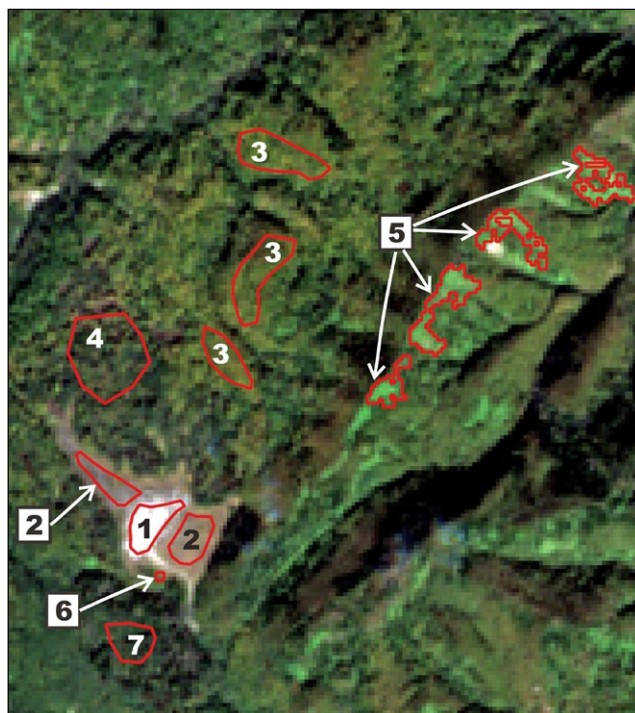


Рис. 9. Сравнение результата контролируемой классификации растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории, полученного при помощи SCP (А), и мультиспектрального снимка спутника Sentinel-2B (05.10.2018 г.) (Б). 1 – отложения грязевулканической брекчии; 2 – эродированные отложения грязевулканической брекчии, на которых произрастают травянистые сообщества; 3 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Betula ermanii* и *Betula platyphylla*; 4 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Abies sachalinensis* и *Larix cajanderi*; 5 – редколесье с *Sasa kurilensis*; 6 – редколесье с *Phragmites australis*; 7 – пихтово-еловый лес. Красным контуром обозначены места, на которых, предположительно, отсутствует древесная растительность.

Fig. 9. Comparison of the result of supervised classification of the vegetation cover of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent territory obtained using SCP (A) and the multispectral image from the Sentinel-2B satellite (October 5, 2018) (B). 1 – deposits of mud volcanic breccia; 2 – eroded deposits of mud volcanic breccia, on which herbaceous communities grow; 3 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Betula ermanii* and *Betula platyphylla*; 4 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Abies sachalinensis* and *Larix cajanderi*; 5 – woodlands with *Sasa kurilensis*; 6 – woodlands with *Phragmites australis*; 7 – fir-spruce forest. The red outline indicates places where there is presumably no tree vegetation.

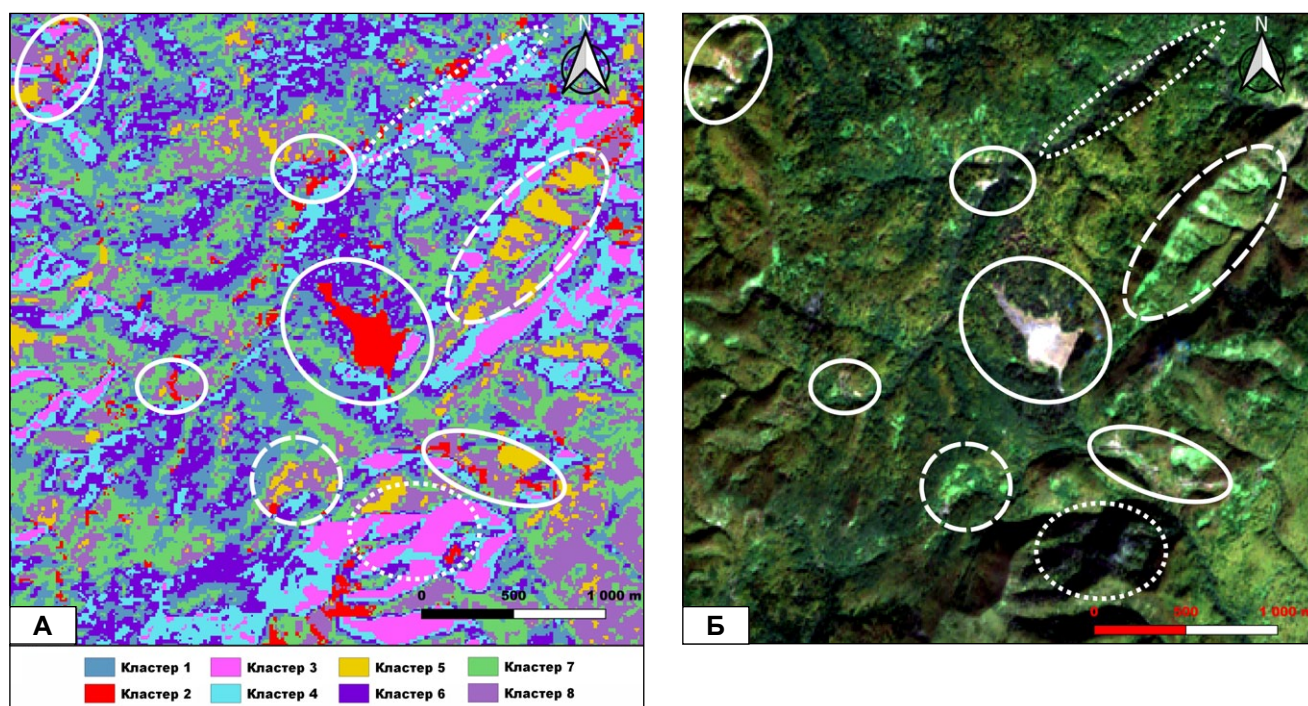


Рис. 10. Сравнение результата кластеризации растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории, полученного при помощи SCP (А), и мультиспектрального снимка спутника Sentinel-2B (05.10.2018 г.) (Б). Белым сплошным контуром обозначены места, на которых, предположительно, отсутствует древесная растительность, белым длинным штрихом – синузии *Sasa kurilensis*, произрастающие на открытых участках, пунктиром – затененные участки.

Fig. 10. Comparison of the result of clustering of the vegetation cover of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent territory obtained using SCP (A) and the multispectral image from the Sentinel-2B satellite (October 5, 2018) (Б). The white solid outline indicates places where there is presumably no tree vegetation, the white dashed outline – *Sasa kurilensis* synusia growing in open areas, and the white dotted outline – shaded areas.

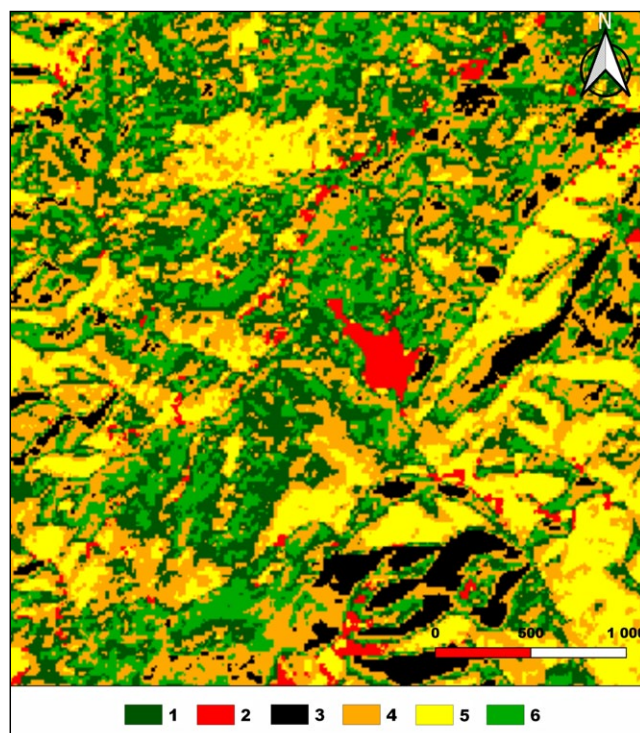
Неконтролируемую классификацию проводили с помощью алгоритма ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm), применяемого для более точной, многошаговой кластеризации. Алгоритм ISODATA использует минимальное спектральное расстояние для определения соответствующего кластера для каждого пиксела. Процесс начинается с назначения случайного (приближенного) среднего значения кластера и повторяется до тех пор, пока это значение не достигнет средней для каждого кластера величины исходных данных. Начальные средние значения кластеров распределяются равномерно вдоль центрального вектора спектрального пространства [44, 56]. Количество кластеров и число проведения итераций в SCP возможно выбирать самостоятельно. Мы выбрали 8 кластеров в связи с тем, что растительность ЮСГВ условно была поделена нами на 7 классов и плюс 1 кластер на затененные участки. Число итераций было определено в 10.

Результат проведения кластеризации спутникового снимка (рис. 10 А) частично совпадает с результатом контролируемой классификации (рис. 9 А), но классы растительности, определенные нами ранее, классифицированы не в полном объеме. Сравнивая полученные результаты двух типов классификации друг с другом, видим, что отложения грязевулканической брекчии, эродированные отложения грязевулканической брекчии, на которых произрастают травянистые сообщества, и редколесье с *Phragmites australis* SCP распознал как объекты одного типа (кластер 2). При увеличении количества кластеров мы вряд ли добились бы распознавания указанных сообществ в том же виде, как по результатам контролируемой классификации, потому что формирование кластеров происходит автоматически и мы получили бы слишком пестрое, нечитаемое изображение [56].

Сравнивая результат кластеризации со спутниковым снимком (рис. 10 Б), можно сказать, что в кластер 2 попали самые светлые

Рис. 11. Результат неконтролируемой классификации растительного покрова Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории, полученный при помощи SCP. 1 – пихтово-еловый лес; 2 – отложения грязевулканической брекчии; 3 – затененные участки; 4 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Betula ermanii* и *Betula platyphylla*; 5 – редколесье с *Sasa kurilensis*; 6 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Abies sachalinensis* и *Larix cajanderi*.

Fig. 11. Result of unsupervised classification of the vegetation cover of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and the adjacent territory obtained using SCP. 1 – fir-spruce forest; 2 – deposits of mud volcanic breccia; 3 – shaded areas; 4 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Betula ermanii* and *Betula platyphylla*; 5 – woodlands with *Sasa kurilensis*; 6 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Abies sachalinensis* and *Larix cajanderi*.



пиксели – «тело» грязевого вулкана и участки в лесу, на которых предположительно отсутствует древесная растительность. Хорошо различимы затененные участки (кластер 3) и синузии *Sasa kurilensis*, произрастающие на открытых участках, также заметные на спутниковом снимке (кластер 5).

Из кластеров 1, 4, 6, 7 и 8 путем визуального дешифрирования спутникового снимка и анализа полевой карты и результата контролируемой классификации мы попытались выделить три оставшихся класса лесной растительности. В результате реклассификации в SCP были объединены кластеры 4 и 7, 5 и 8; цвета кластеров были изменены (рис. 11). В результате неконтролируемой классификации растительного покрова ЮСГВ и прилегающей территории было распознано 5 классов растительности (не считая затененные участки). Как уже отмечалось выше, «тело» грязевого вулкана и травянистые сообщества практически совпали по форме и местоположению с аналогичными участками по контролируемой классификации. Кроме того, на наш взгляд, хорошо классифицировано редколесье с *Sasa kurilensis*. Остальные сообщества по результатам двух типов классификации совпали частично.

Мы векторизовали результаты двух типов классификации и рассчитали примерную

площадь каждого класса растительности на исследуемой территории. Согласно двум полученным результатам, на ЮСГВ и прилегающей территории преобладающим сообществом является смешанный мелколиственный лес. По результату контролируемой классификации его площадь составляет $\approx 5.27 \text{ км}^2$ (46 %), по неконтролируемой – его площадь больше, приблизительно 6.01 км^2 (52 %). Пихтово-еловый лес, наоборот, большее пространство занимает по контролируемой классификации – примерно 3.72 км^2 (32 %), а по неконтролируемой $\approx 2.47 \text{ км}^2$ (22 %). Редколесье с участием *Sasa kurilensis* для двух типов классификации имеет практически одинаковые значения площади – приблизительно 2.11 км^2 (18 %) согласно контролируемой классификации и 2 км^2 (17 %) – по неконтролируемой. Хотелось бы отметить, что различия между площадями лесных сообществ, за исключением несомкнутых лесных фитоценозов, по результатам контролируемой и неконтролируемой классификации невелики: 78 и 74 % соответственно.

Результат неконтролируемой классификации содержит информацию о затененных участках, площадь которых $\approx 0.74 \text{ км}^2$ (6 %). Как отмечалось выше, такие участки по результату контролируемой классификации были распознаны SCP как лесные сообщества.

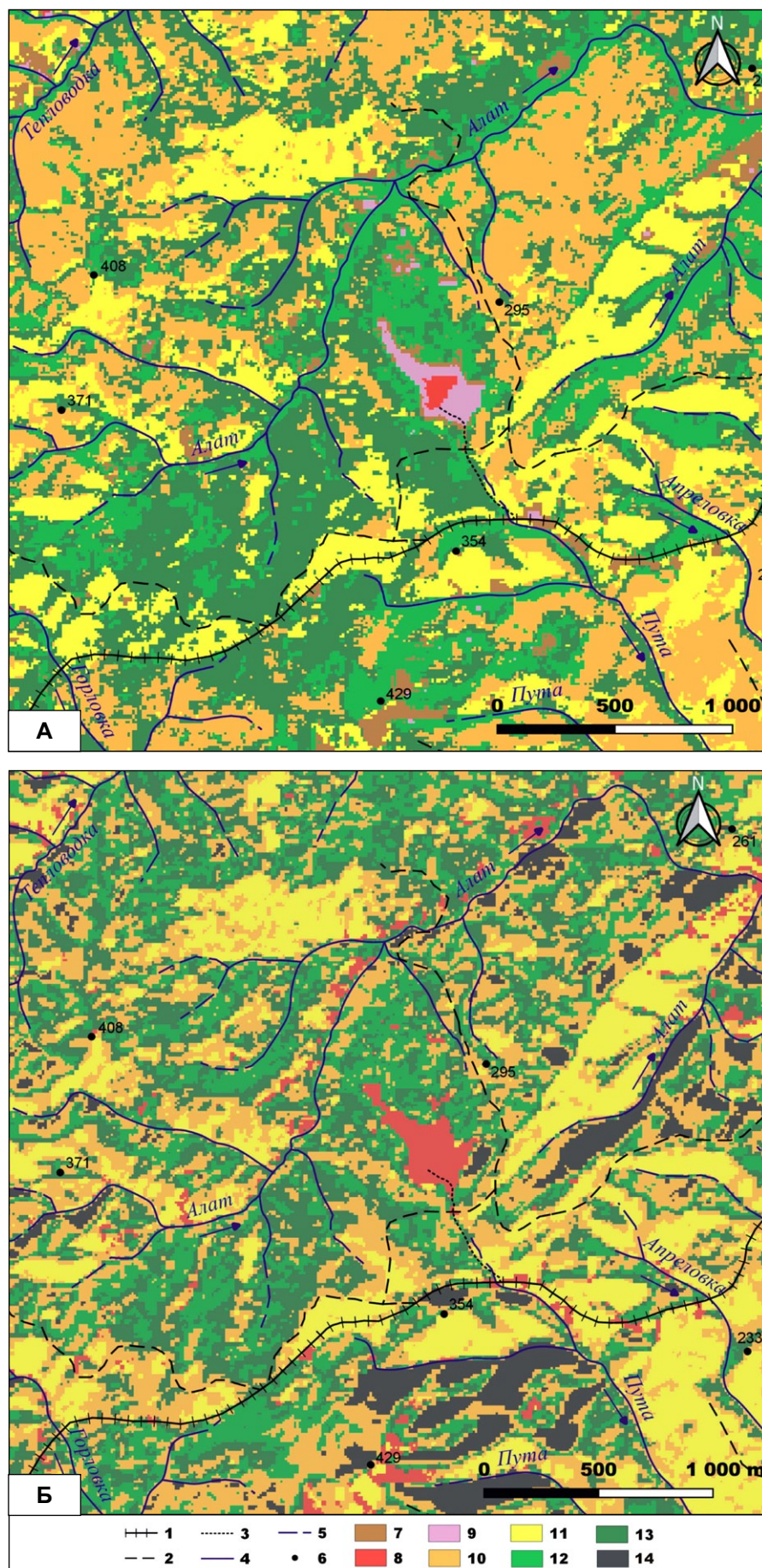


Рис. 12. Предварительные карты растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана и прилегающей территории, полученные в SCP в результате проведения контролируемой (А) и неконтролируемой (Б) классификации. 1 – старая железная дорога (Южно-Сахалинск – Холмск); 2 – просека; 3 – тропа, ведущая от железной дороги к грязевому полю; 4 – реки; 5 – истоки рек; 6 – основные высоты (261, 408, 295, 371, 354, 233 и 429 м); 7 – редколесье с *Phragmites australis*; 8 – отложения грязевулканической брекчии; 9 – эродированные отложения грязевулканической брекчии, на которых произрастают травянистые сообщества; 10 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Betula ermanii* и *Betula platyphylla*; 11 – редколесье с *Sasa kurilensis*; 12 – смешанный мелколиственный лес с преобладанием *Abies sachalinensis* и *Larix cajanderi*; 13 – пихтово-еловый лес; 14 – затененные участки. Синие стрелки – направление течения рек.

Fig. 12. Preliminary maps of the vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano and adjacent territory, obtained in SCP as a result of supervised (A) and unsupervised (B) classification. 1 – old railroad (Yuzhno-Sakhalinsk – Kholmsk); 2 – clearing; 3 – trail leading from the railroad to the mud field; 4 – rivers; 5 – the sources of the rivers; 6 – major elevations (261, 408, 295, 371, 354, 233 and 429 m); 7 – woodlands with *Phragmites australis*; 8 – deposits of mud volcanic breccia; 9 – eroded deposits of mud volcanic breccia, on which herbaceous communities grow; 10 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Betula ermanii* and *Betula platyphylla*; 11 – woodlands with *Sasa kurilensis*; 12 – mixed small-leaved forest with a predominance of *Abies sachalinensis* and *Larix cajanderi*; 13 – fir-spruce forest; 14 – shaded areas. Blue arrows show the direction of river flow.

Остальные три класса растительности контролируемой классификации являются одним общим классом для неконтролируемой. Отложения грязевулканической брекчии и травянистые сообщества по контролируемой классификации занимают $\approx 0.09 \text{ км}^2$ (1 %), а редколесье с *Phragmites australis* $\approx 0.32 \text{ км}^2$ (3 %), по неконтролируемой $\approx 0.30 \text{ км}^2$ (3 %). В данном случае различия между площадями также несущественны.

На карты-схемы с результатами по обоим типам классификации растительного покрова ЮСГВ и прилегающей территории, полученные при помощи SCP, были нанесены топографические объекты: старая железная дорога (Южно-Сахалинск – Холмск), просека, тропа, ведущая от железной дороги к грязевому полю, реки (Тепловодка, Алат, Апреловка, Пута, Горловка) с их истоками и притоками и основные точки высот. Полученные предварительные карты растительности ЮСГВ и прилегающей территории в масштабе 1 : 50 000 (рис. 12) нуждаются в полевом уточнении. Несмотря на то что площади классов растительности по двум классификациям практически совпадают, нельзя сказать то же самое о местоположении лесных сообществ. Однако в двух случаях просматривается четкое разделение редколесья и травянистых сообществ. В ходе натурных работ необходимо обследовать затененные участки и участки за пределами центра ЮСГВ, где, предположительно, отсутствует древесная растительность. Тем не менее мы считаем, что предварительные карты растительности ЮСГВ и прилегающей территории, полученные при помощи методов ДЗЗ (рис. 12), могут быть использованы для оценки динамики растительности и ландшафта в целом.

Таким образом, для целей крупномасштабного картографирования территорий общей площадью не более 10–13 км², отличающихся сложной мозаичной структурой фитоценоза и среднегорным типом рельефа, подходят оба метода полуавтоматической классификации, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Неконтролируемую классификацию, на наш взгляд, лучше проводить на первичном этапе работ, перед проведением полевых исследований. Кластеры, выделенные по спектральным характеристикам, да-

дут возможность приблизительно определить классы растительности, а также участки, требующие детального исследования полевыми методами. Контролируемую классификацию целесообразнее проводить после полевого исследования интересующей территории, когда имеется достаточно информации о растительности и существует возможность наиболее точно произвести обучающую выборку. Кроме того, возможна гибридная классификация, совмещающая лучшие результаты от контролируемой и неконтролируемой классификаций. Данный опыт может быть применен для создания карт растительности других грязевых вулканов и иных природных объектов, занимающих аналогичную площадь.

Заключение

В результате проведенной нами работы по разработке карты-схемы растительности Южно-Сахалинского грязевого вулкана с использованием методов визуального и автоматического дешифрирования космических снимков и натурных наблюдений нам удалось систематизировать и дополнить известные ранее данные об эруптивной деятельности вулкана и оценить ее влияние на ландшафтную обстановку. Границы последнего извержения ЮСГВ 2020 г. показывают, как существенно с течением времени меняется ландшафт центральной части вулкана.

По результатам полуавтоматической классификации растительного покрова ЮСГВ при помощи модуля SCP в QGIS мы установили, что методы контролируемой и неконтролируемой классификаций приемлемы для крупномасштабного картографирования и изучения динамики древесной растительности ландшафтов для территорий площадью не более 10–13 км², имеющих сложную структуру растительных сообществ. По результатам обоих типов классификации были рассчитаны площади каждого класса растительности на исследуемой территории. Оказалось, что эти площади по результатам двух классификаций близки. Созданы две предварительные карты растительности ЮСГВ и прилегающей территории по спутниковым данным, являющиеся промежуточным итогом работы, но позволяющие уже в настоящее время оценивать состояние растительности. Уточнения, которые необходимо провести для улучшения карт, –

это классификация участков травянистой растительности, участков без растительности и затененных участков. Мы считаем, что неконтролируемую классификацию целесообразнее применять до проведения полевого обследования интересующей территории, а контролируемую – после.

Спутниковый мониторинг активности ЮСГВ имеет важное прикладное значение, поскольку вулкан является опасным природным объектом и в то же время памятником природы, привлекательным для туристов. При помощи спутникового мониторинга можно оперативно отслеживать эруптивную деятельность ЮСГВ, оценивать ее влияние на растительность. Это позволит более детально подойти к анализу растительности как в эруптивном центре вулкана, так и в нескольких километрах от него, проследить сукцессионный процесс, а также определить точное место проведения полевых работ в перспективе. Кроме того, спутниковый мониторинг позволяет оценить рекреационную нагрузку на ЮСГВ.

Список литературы

1. Шабанов Н.В., Бартаев С.А., Ерошенко Ф.В., Плотиных Д.Е. **2018**. Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 15(4): 166–178. <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178>
2. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В. **2018**. Мониторинг вулканической активности на Курильских островах: 15 лет деятельности группы SVERT. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 259–266. <http://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.259-266>
3. Верхотуров А.А. **2020**. Анализ изменения состояния экосистем на острове Атласова (Курильские острова). *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*, 25(3): 139–150. <http://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150>
4. Мелкий В.А., Верхотуров А.А., Братков В.В. **2021**. Оценка воздействия эксплозивных извержений вулкана Тятя (о. Кунашир, Курильские острова) на растительный покров по данным дистанционного зондирования Земли. *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*, 65(2): 184–193.
5. Teltscher K., Fassnacht F.E. **2018**. Using multispectral Landsat and Sentinel-2 satellite data to investigate vegetation change at Mount St. Helens since the great volcanic eruption in 1980. *J. of Mountain Science*, 15(9): 1851–1867. <http://doi.org/10.1007/s11629-018-4869-6>
6. Schutter A.D., Kervyn M., Canters F., Bosshard-Stadlin S.A., Songo M.A., Mattsson H.B. **2015**. Ash fall impact on vegetation: a remote sensing approach of the Oldoinyo Lengai 2007–08 eruption. *J. of Applied Volcanology*, 4(15): 1–18. <http://doi.org/10.1186/s13617-015-0032-z>
7. Мишурицкий Д.В., Ершов В.В., Жарков Р.В., Копанина А.В., Козлов Д.Н., Лебедева Е.В., Абдуллаева И.В., Власова И.И., Михалев Д.В. **2018**. Геолого-геоморфологические и ландшафтно-экологические особенности Пугачевского грязевого вулкана как основа для организации и информационного сопровождения туристического маршрута (остров Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 2(4): 398–408. <http://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.398-408>
8. Мишурицкий Д.В., Лебедева Е.В. **2020**. Геолого-геоморфологические особенности грязевого вулканизма о. Сахалин как основа познавательной рекреационной деятельности. В кн.: *Рельеф и природопользование: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием VIII Щукинские чтения, 28 сент. – 1 окт. 2020, Москва. М.: МГУ*, с. 453–460.
9. Лебедева Е.В., Мишурицкий Д.В. **2021**. Особенности строения и развития рельефа Южно-Сахалинского грязевого вулкана (о-в Сахалин). *Геоморфология*, 52(1): 75–85. <http://doi.org/10.31857/S0435428121010090>
10. Korznikov K.A. **2017**. Vegetation dynamics at two mud volcanoes of Sakhalin Island (Russia): comparison of chronosequences. *Botanica Pacifica*, 6(2): 13–20. <http://doi.org/10.17581/bp.2017.06203>
11. Иванов А.Ю., Матросова Е.Р., Кучейко А.Ю., Филимонова Н.А., Евтушенко Н.В., Терлеева Н.В., Либина Н.В. **2020**. Поиск и обнаружение естественных нефтепроявлений в морях России по данным космической радиолокационной съемки. *Исследование Земли из Космоса*, 5: 43–62. <http://doi.org/10.31857/S0205961420050061>
12. Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., Beloborodov D.E., Gaydalenok O.V. **2020**. Mud volcanism at the Taman Peninsula: multiscale analysis of remote sensing and morphometric data. *Remote Sensing*, 12(22): 3763. <http://doi.org/10.3390/rs12223763>
13. Лаврова О.Ю., Уваров И.А., Крашенинникова Ю.С. **2021**. Спутниковые наблюдения извержения грязевого вулкана на о. Дашлы в Каспийском море 4 июля 2021 г. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 18(3): 332–336. <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-332-336>
14. Santagata T. **2017**. Monitoring of the Nirano mud volcanoes Regional Natural Reserve (North Italy) using unmanned aerial vehicles and terrestrial laser scanning. *J. of Imaging*, 3(42). <http://doi.org/10.3390/jimaging3040042>
15. Beselly S.M., Wegen M., Grueters U., Reyns J., Dijkstra J., Roelvink D. **2021**. Eleven years of mangrove-mudflat dynamics on the mud-volcano-induced prograding delta in East Java, Indonesia: Integrating UAV and satellite imagery. *Remote Sensing*, 13(6): 1084. <http://doi.org/10.3390/rs13061084>
16. Brighenti F., Carnemolla F., Messina D., Guidi G.D. **2021**. UAV survey method to monitor and analyze geological hazards: the case study of the mud volcano of Villaggio Santa Barbara, Caltanissetta (Sicily). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21: 2881–2898. <http://doi.org/10.5194/nhess-21-2881-2021>
17. Lio K., Furuya M. **2018**. Surface deformation and source modeling of Ayaz-Akhtarma mud volcano, Azerbaijan, as detected by ALOS/ALOS-2 InSAR. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5: 61. <http://doi.org/10.1186/s40645-018-0220-7>
18. Agustawijaya D.S., Karyadi K., Krisnayanti B.D., Sutanto S. **2017**. Rare earth element contents of the Lusi mud: An attempt to identify the environmental origin of the hot mudflow in East Java – Indonesia. *Open Geosciences*, 9: 689–706. <http://doi.org/10.1515/geo-2017-0052>
19. Mazzini A., Svensen H., Akhmanov G.G., Aloisi G., Planke S., Malthé-Sørensen A., Istadi B. **2007**. Triggering and dynamics evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia. *Earth and Planetary Science Letters*, 261: 375–388. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.001>

20. Мельников О.А., Ершов В.В. **2010**. Грязевой (газоводолито-кластитовый) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследования. *Вестник ДВО РАН*, 6: 87–93.
21. Ершов В.В. **2015**. Проблемы и методы геомониторинга и оценки опасности грязевулканической деятельности. В кн.: *Анализ, прогноз и управление рисками в современном мире: Материалы 9-й Междунар. науч.-практ. конф. «ГЕОРИСК-2015», 13–14 окт. 2015, Москва*. М.: РУДН, т. 2: 458–463.
22. Cyranoski D. **2007**. Indonesian eruption: muddy waters. *Nature*, 445: 812–815. <http://doi.org/10.1038/445812a>
23. Kopanina A.V., Shvidskaya K.A. **2021**. Possibility of using satellite-based monitoring for large-scale mapping and research of dynamics of mud volcanic landscapes. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012040. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012040>
24. Мельников О.А. **2002**. Южно-Сахалинский газоводолито-кластитовый («грязевой») вулкан – уникальный объект Природы на Дальнем Востоке России: путеводитель экскурсии на вулкан для участников междунар. науч. симп. 24–28 сент. 2002, Южно-Сахалинск. Южно-Сахалинск: ИМГиГ СахНЦ ДВО РАН, 48 с.
25. Ершов В.В., Никитенко О.А. **2017**. Изотопный и химический состав вод Южно-Сахалинского грязевого вулкана (по результатам опробования 2009 и 2010 годов). *Изв. высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион*, 4(1): 110–120. <http://doi.org/10.23683/0321-3005-2017-4-1-110-120>
26. Корзников К.А. **2014**. Растительные сообщества Южно-Сахалинского грязевого вулкана. *Вестник Томского государственного университета. Биология*, 1(25): 56–65.
27. Ustyugov G.V., Ershov V.V. **2021**. Mud volcanism as a dangerous phenomenon for oil and gas facilities. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012030. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012030>
28. Никитенко О.А., Ершов В.В. **2020**. Гидрогеохимическая характеристика проявлений грязевого вулканизма на острове Сахалин. *Геосистемы переходных зон*, 4(3): 321–335. <http://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.321-335.336-350>
29. Никитенко О.А., Ершов В.В., Перстнева Ю.А., Бондаренко Д.Д., Балогланов Э.Э., Аббасов О.Р. **2018**. Вещественный состав продуктов деятельности грязевых вулканов Сахалина и Азербайджана: сравнительный анализ. *Геосистемы переходных зон*, 2(4): 346–358. <http://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.346-358>
30. Никитенко О.А., Ершов В.В. **2021**. Возможности гидрогеохимической типизации флюидных систем. *Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 332(8): 109–125.
31. Sokol E.V., Kokh S.N., Nekipelova A.V., Abersteiner A., Seryotkin Y.V., Ershov V.V., Nikitenko O.A., Deviatiiarova A.S. **2021**. Ge-Hg-Rich sphalerite and Pb, Sb, As, Hg, and Ag sulfide assemblages in mud volcanoes of Sakhalin Island, Russia: An insight into possible origin. *Minerals*, 11: 1186. <http://doi.org/10.3390/min11111186>
32. Kopanina A.V. **2019**. Vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano as an indicator of activity. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324: 012032. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012032>
33. Ершов В.В., Копанина А.В. **2017**. Химический состав водных вытяжек из почв грязевулканических ландшафтов. В кн.: *География: развитие науки и образования. Ч. I: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. LXX Герценовские чтения, посвящ. году экологии в России, 220-летию Герценовского ун-та, 85-летию факультета географии, 145-летию со дня рождения профессора Владимира Петровича Буданова, 20–23 апр. 2017, Санкт-Петербург*. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, с. 142–147.
34. Kopanina A.V., Talskikh A.I., Vlasova I.I., Kotina E.L. **2022**. Age-related pattern in bark formation of *Betula ermanii* growing in volcanic environments from southern Sakhalin and Kuril Islands (Northeast Asia). *Trees*, 36(3): 915–939. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02257-x>
35. Копанина А.В., Лебедева Е.В., Власова И.И. **2018**. Особенности восстановления растительности после извержения 1907 г. кальдеры Ксудач на юге Камчатского полуострова. *Изв. РАН. Серия географическая*, 6: 57–69. <http://doi.org/10.1134/S2587556618060092>
36. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I., Talskikh A.I. **2020**. Structural traits of woody plants and geomorphological conditions to the vegetation recovery at Ksudach caldera (Southern Kamchatka) since the explosive eruption in 1907. *J. of Mountain Science*, 17(7): 1613–1635. <http://doi.org/10.1007/s11629-019-5583-8>
37. Talskikh A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2019**. Structural features of the bark in young stems of *Betula ermanii* Cham. in the conditions of Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano (Sakhalin Island). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324: 012032. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012033>
38. Тальских А.И., Копанина А.В., Власова И.И. **2021**. Структурные особенности коры *Betula ermanii* (Betulaceae) в ландшафтах морских побережий и активных вулканов Дальнего Востока России. *Растительные ресурсы*, 57(2): 124–144. <http://doi.org/10.31857/S0033994621020096>
39. Rúa L., Bright P., Gall-Queguineur G. **2020**. *QGIS for census and survey mapping: training manual*. Oceania: Pacific Community (SPC), 91 p.
40. Congedo L. **2021**. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *The J. of Open Source Software*, 6(64): 3127. <http://doi.org/10.21105/joss.03172>
41. Курбатский Д.В. **2005**. Интерпретация комбинации каналов данных Landsat TM/ETM+. URL: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (дата обращения: 23.12.2021).
42. Долгополов Д.В. **2021**. Методика обнаружения водных объектов в зоне трубопроводов при паводках по данным космического мониторинга. *Мониторинг. Наука и технология*, 1(47): 75–83. <http://doi.org/10.25714/MNT.2021.47.009>
43. Малышева Н.В. **2018**. *Основы автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков лесов с использованием ГИС: учеб. пособие*. М.: МЭСХ, 136 с.
44. Лурье И.К., Косиков А.Г. **2003**. *Теория и практика цифровой обработки изображений*. М.: Научный мир, 168 с.
45. Мельников О.А., Сабиров Р.Н. **1999**. Новые данные о современном состоянии и былой активности Южно-Сахалинского газоводогрязевого вулкана (о. Сахалин). *Тихоокеанская геология*, 18(3): 37–46.
46. Сайто Ф. **1928**. [Грязевые вулканы близ железной дороги Тоёхара–Маока на Южном Сахалине]. *Тиогаку Дэзасси*, 40(477): 1–5 (На яп. яз.). Цит. по: Сайто Ф. Грязевые вулканы близ железной дороги «Тоёхара–Маока» на Южном Сахалине. Перевод с яп. З.И. Кургановой. Машинопись. Новоалександровск, СахКНИИ СО АН СССР, 1959 г. (Южно-Сахалинск, б-ка ИМГиГ ДВО РАН).
47. Шенников А.П. **1964**. *Введение в геоботанику*. Л.: ЛОЛГУ, 448 с.

48. Степановских А.С. **2017**. *Общая экология: учебник для вузов*. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 687 с.
49. Карпачев А.П. **2016**. *Опыт классификации космоснимка Landsat с помощью Semi-Automatic Classification Plugin в QGIS*. URL: https://gis-lab.info/qa/landsat_qgis_scp.html (дата обращения: 21.12.2021).
50. Карпачев А.П. **2017**. *Опыт классификации космоснимка Sentinel-2A с помощью Semi-Automatic Classification Plugin в QGIS*. URL: <https://gis-lab.info/qa/qgis-sacp-sentinel-2a.html> (дата обращения: 21.12.2021).
51. Комаров А.А., Суханов П.А., Кирсанов А.Д. **2018**. Тестовые мониторинговые полигоны как инструмент для идентификации данных дистанционного зондирования Земли. В кн.: *Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве: Материалы II Всерос. науч. конф. с междунар. участием, 26–28 сент. 2018, Санкт-Петербург*. СПб.: АФИ, с. 139–145. <http://doi.org/10.25695/agrophysica.2018.2.18778>
52. Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. **2020**. *Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учеб. пособие*. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-de-shifirovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> (дата обращения: 15.12.2021).
53. Шихов А., Маракулин Я. **2012**. *Оценка последствий лесных пожаров в 2010 г. в Пермском крае*. URL: gis-lab.info/qa/fires-perm.html (дата обращения: 07.08.2021).
54. Мартынова М.В., Султанова Р.Р., Габделхаков А.К., Рахматуллин З.З., Одинцов Г.Е. **2020**. *Оценка зарастания сельскохозяйственных земель древесными породами по спутниковым данным Landsat на примере участка Бакалинского района Республики Башкортостан*. URL: <https://inter.volgatex.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forests-ecosystems-in-a-changing-climate/> (дата обращения: 02.12.2021).
55. Чашин А.Н. **2018**. *Основы обработки спутниковых снимков в QGIS: учеб.-метод. пособие*. Пермь: ИПЦ «ПрокрестЪ», 47 с.
56. Зубков И.А., Скрипачев В.О. **2006**. *Применение алгоритмов неконтролируемой классификации при обработке данных ДЗЗ. В кн.: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов): материалы Четвертой Всерос. открытой ежегодной конф., 13–17 ноября 2006, Москва*. М.: ИКИ РАН, с. 57–62.
- SGUGiT = *Vestnik SSUGT*, 25(3): 139–150. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150>
4. Melkiy V.A., Verhoturov A.A., Bratkov V.V. **2021**. Assessment impact of Tyatya volcano explosive eruptions (Kunashir Island, Kuril Islands) on the vegetation cover basing on the Earth's remote sensing data. *Izv. vuzov. Geodeziya i aerophotos'yomka = Izv. vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 65(2): 184–193. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Teltscher K., Fassnacht F.E. **2018**. Using multispectral Landsat and Sentinel-2 satellite data to investigate vegetation change at Mount St. Helens since the great volcanic eruption in 1980. *J. of Mountain Science*, 15(9): 1851–1867. <http://doi.org/10.1007/s11629-018-4869-6>
6. Schutter A.D., Kervyn M., Canters F., Bosshard-Stadlin S.A., Songo M.A., Mattsson H.B. **2015**. Ash fall impact on vegetation: a remote sensing approach of the Oldoinyo Lengai 2007–08 eruption. *J. of Applied Volcanology*, 4(15): 1–18. <http://doi.org/10.1186/s13617-015-0032-z>
7. Mishurinskij D.V., Ershov V.V., Zharkov R.V., Kopani-na A.V., Kozlov D.N., Lebedeva E.V., Abdullaeva I.V., Vlasova I.I., Mikhalev D.V. **2018**. Geological-geomorphological and landscapes-ecological features of the Pugachev Mud Volcano as a basis for organization and information support of the tourist route (Sakhalin Island). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 398–408. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.398-408>
8. Mishurinskij D.V., Lebedeva E.V. **2020**. [Geological and geomorphological features of mud volcanism on Sakhalin as a basis for cognitive recreational activities]. In: *[Relief and nature management: Proceedings of the All-Russian conference with international participation VIII Shchukin readings, 28 Sept. – 1 Oct. 2020, Moscow]*. Moscow: MSU, p. 453–460. (In Russ.).
9. Lebedeva E.V., Mishurinskii D.V. **2021**. Features of structure and development of the relief of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano (Sakhalin Is.). *Geomorfologia = Geomorphology*, 52(1): 75–85. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.31857/S0435428121010090>
10. Korznikov K.A. **2017**. Vegetation dynamics at two mud volcanoes of Sakhalin Island (Russia): comparison of chronosequences. *Botanica Pacifica*, 6 (2): 13–20. <http://doi.org/10.17581/bp.2017.06203>
11. Ivanov A.Yu., Matrosova E.R., Kucheiko A.Yu., Filimonova N.A., Evtushenko N.V., Terleeva N.V., Libina N.V. **2020**. Search and detection of natural oil seeps in the Russian seas using spaceborne SAR imagery. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 5: 43–62. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.31857/S0205961420050061>
12. Skrypitsyna T.N., Florinsky I.V., Beloborodov D.E., Gaydalenok O.V. **2020**. Mud volcanism at the Taman Peninsula: multiscale analysis of remote sensing and morphometric data. *Remote Sensing*, 12(22): 3763. <http://doi.org/10.3390/rs12223763>
13. Lavrova O.Yu., Uvarov I.A., Krashenninnikova Yu.S. **2021**. Satellite observations of the eruption of a mud volcano on the Dashly Island in the Caspian Sea on July 4, 2021. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 18(3): 332–336. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-332-336>
14. Santagata T. **2017**. Monitoring of the Nirano mud volcanoes Regional Natural Reserve (North Italy) using unmanned aerial vehicles and terrestrial laser scanning. *J. of Imaging*, 3(42). <http://doi.org/10.3390/jimaging3040042>
15. Beselly S.M., Wegen M., Grueters U., Reyns J., Dijkstra J., Roelvink D. **2021**. Eleven years of mangrove-mudflat dy-

References

1. Shabanov N.V., Bartalev S.A., Eroshenko F.V., Plotnikov D.E. **2018**. Development of capabilities for remote sensing estimate of Leaf Area Index from MODIS data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 15(4): 166–178. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178>
2. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V. **2018**. Monitoring of volcanic activity in the Kuril Islands: 15 years of work SVERT group. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 259–266. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.259-266>
3. Verhoturov A.A. **2020**. Analysis of changes in the state of ecosystems on Atlasova Island (Kuril Islands). *Vestnik*

- namics on the mud-volcano-induced prograding delta in East Java, Indonesia: Integrating UAV and satellite imagery. *Remote Sensing*, 13(6): 1084. <http://doi.org/10.3390/rs13061084>
16. Brighenti F., Carnemolla F., Messina D., Guidi G.D. **2021**. UAV survey method to monitor and analyze geological hazards: the case study of the mud volcano of Villaggio Santa Barbara, Caltanissetta (Sicily). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21: 2881–2898. <http://doi.org/10.5194/nhess-21-2881-2021>
 17. Lio K., Furuya M. **2018**. Surface deformation and source modeling of Ayaz-Akhtarma mud volcano, Azerbaijan, as detected by ALOS/ALOS-2 InSAR. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5: 61. <http://doi.org/10.1186/s40645-018-0220-7>
 18. Agustawijaya D.S., Karyadi K., Krisnayanti B.D., Sutanto S. **2017**. Rare earth element contents of the Lusi mud: An attempt to identify the environmental origin of the hot mudflow in East Java – Indonesia. *Open Geosciences*, 9: 689–706. <http://doi.org/10.1515/geo-2017-0052>
 19. Mazzini A., Svensen H., Akhmanov G.G., Aloisi G., Planke S., Malthé-Sørensen A., Istadi B. **2007**. Triggering and dynamics evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia. *Earth and Planetary Science Letters*, 261: 375–388. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.001>
 20. Mel'nikov O.A., Ershov V.V. **2010**. Mud (gas-water-lithoclastite) volcanism of the Sakhalin Island: history, results and prospects in research. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the FEB RAS*, 6: 87–93. (In Russ., abstr. in Engl.).
 21. Ershov V.V. **2015**. Problems and methods for geomonitoring and hazard assessment of mud volcanic activity. In: *Analysis, prediction and management of natural risks in the modern world: Materials of the 9th International scientific and pract. conf. «GEORISK-2015», 13–14 October, 2015, Moscow*. Moscow: RUDN University, vol. 2: 458–463. (In Russ., abstr. in Engl.).
 22. Cyranoski D. **2007**. Indonesian eruption: muddy waters. *Nature*, 445: 812–815. <http://doi.org/10.1038/445812a>
 23. Kopanina A.V., Shvidskaya K.A. **2021**. Possibility of using satellite-based monitoring for large-scale mapping and research of dynamics of mud volcanic landscapes. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012040>
 24. Mel'nikov O.A. **2002**. [Yuzhno-Sakhalinsk gas-water-lithoclastic (mud) volcano as a unique object of nature in the Russian Far East: a guidebook for excursions to the volcano for participants in the International scientific symposium, 24–28 Sept. 2002, Yuzhno-Sakhalinsk]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG SakhNC DVO RAN [IMGIG SakhSC FEB RAS], 48 p. (In Russ.).
 25. Ershov V.V., Nikitenko O.A. **2017**. Isotopic and chemical composition of waters of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano (sampling in 2009 and 2010). *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region*, 4(1): 110–120. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.23683/0321-3005-2017-4-1-110-120>
 26. Korznikov K.A. **2014**. Plant communities of the Yuzhno-Sakhalinsk mud volcano. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University J. of Biology*, 1(25): 56–65. (In Russ., abstr. in Engl.).
 27. Ustyugov G.V., Ershov V.V. **2021**. Mud volcanism as a dangerous phenomenon for oil and gas facilities. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 946: 012030. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012030>
 28. Nikitenko O.A., Ershov V.V. **2020**. Hydrogeochemical characteristics of mud volcanism manifestations on Sakhalin Island. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(3): 321–350. (In Russ. & Engl.). <http://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.321-335.336-350>
 29. Nikitenko O.A., Ershov V.V., Perstneva J.A., Bondarenko D.D., Baloglanov E.E., Abbasov O.R. **2018**. Substance composition produced by mud volcanoes of Sakhalin Island and Azerbaijan: the first comparison. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(4): 346–358. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.4.346-358>
 30. Nikitenko O.A., Ershov V.V. **2021**. Possibility of hydrogeochemical classification of fluid systems. *Izv. Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bull. of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 332(8): 109–125. (In Russ., abstr. in Engl.).
 31. Sokol E.V., Kokh S.N., Nekipelova A.V., Abersteiner A., Seryotkin Y.V., Ershov V.V., Nikitenko O.A., Deviatiiarova A.S. **2021**. Ge-Hg-Rich sphalerite and Pb, Sb, As, Hg, and Ag sulfide assemblages in mud volcanoes of Sakhalin Island, Russia: An insight into possible origin. *Minerals*, 11: 1186. <http://doi.org/10.3390/min11111186>
 32. Kopanina A.V. **2019**. Vegetation of the Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano as an indicator of activity. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324: 012032. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012032>
 33. Ershov V.V., Kopanina A.V. **2017**. [The chemical composition of water extracts from the soils of mud volcanic landscapes]. In: *Geography: development of science and education. Pt. I: Materials of the annual International scientific and practical conference LXX Herzen readings, 20–23 April, 2017, St.-Petersburg*. St.-Petersburg: The Herzen University, p. 142–147. (In Russ.).
 34. Kopanina A.V., Talskikh A.I., Vlasova I.I., Kotina E.L. **2022**. Age-related pattern in bark formation of *Betula ermanii* growing in volcanic environments from southern Sakhalin and Kuril Islands (Northeast Asia). *Trees*, 36(3): 915–939. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02257-x>
 35. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I. **2018**. Features of vegetation restoration after the eruption of 1907 Ksudach caldera in the south of the Kamchatka Peninsula. *Izv. Rossiiskoi akademii nauk. Seriya Geograficheskaya*, 6: 57–69. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.1134/S2587556618060092>
 36. Kopanina A.V., Lebedeva E.V., Vlasova I.I., Talskikh A.I. **2020**. Structural traits of woody plants and geomorphological conditions to the vegetation recovery at Ksudach caldera (Southern Kamchatka) since the explosive eruption in 1907. *J. of Mountain Science*, 17(7): 1613–1635. <http://doi.org/10.1007/s11629-019-5583-8>
 37. Talskikh A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2019**. Structural features of the bark in young stems of *Betula ermanii* Cham. in the conditions of Yuzhno-Sakhalinsky mud volcano (Sakhalin Island). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324: 012032. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012033>
 38. Talskikh A.I., Kopanina A.V., Vlasova I.I. **2021**. Structural features of *Betula ermanii* (Betulaceae) in coastal and active volcanic landscapes of the Russian Far East. *Rastitelnye Resursy*, 57(2): 124–144. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.31857/S0033994621020096>
 39. Rúa L., Bright P., Gall-Queguineur G. **2020**. *QGIS for census and survey mapping: training manual*. Oceania: Pacific Community (SPC), 91 p. (In Russ. & Engl.).
 40. Congedo L. **2021**. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *The J. of Open Source Software*, 6(64): 3127. <http://doi.org/10.21105/joss.03172>

41. Kurbatskiy D.V. **2005**. [Interpretation of Landsat TM/ETM+ data channel combination]. URL: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html> (accessed 23.12.2021). (In Russ.).
42. Dolgoplov D.V. **2021**. Methods for detecting water objects in the pipelines zone during floods based on space monitoring data. *Monitoring. Nauka i tehnologii = Monitoring. Science and Technologies*, 1(47): 75–83. (In Russ., abstr. in Engl.).
43. Malysheva N.V. **2018**. *Fundamentals of automated interpretation of aerospace images of forests using GIS: a tutorial*. Moscow: MESKH, 136 p. (In Russ.).
44. Lurie I.K., Kosikov A.G. **2003**. [Theory and practice of digital image processing]. Moscow: Nauchnyy mir [Scientific World], 168 p. (In Russ.).
45. Mel'nikov O.A., Sabirov R.N. **1999**. [New data on the current state and former activity of the Yuzhno-Sakhalinsk gas-water-mud volcano (Sakhalin Island)]. *Tikhookeanskaya geologiya = Geology of the Pacific Ocean*, 18(3): 37–46. (In Russ.).
46. Saito F. **1928**. [Mud volcanoes near the Toyohara-Maoka railway in South Sakhalin]. *Chigaku Zashi*, 40(477): 1–5 (In Japanese). Cited from: Saito F. [Mud volcanoes near the Toyohara-Maoka railway in South Sakhalin]. Transl. from Japanese by Z.I. Kurganova. Typescript. Novoaleksandrovsk, SakhKNII SB AS USSR, 1959. (Yuzhno-Sakhalinsk, Library of IMGG FEB RAS). (In Russ.).
47. Shennikov A.P. **1964**. [Introduction to geobotany]. Leningrad: LOLGU [Leningrad Order of Lenin State University], 448 p. (In Russ.).
48. Stepanovskikh A.S. **2017**. [General Ecology: Textbook for higher educational institutions]. Moscow: UNITY-DANA, 687 p. (In Russ.).
49. Karpachev A.P. **2016**. [Landsat satellite image classification experience using Semi-Automatic Classification Plugin in QGIS]. URL: https://gis-lab.info/qa/landsat_qgis_scp.html (accessed 21.12.2021). (In Russ.).
50. Karpachev A.P. **2017**. [Sentinel 2A satellite image classification experience using Semi-Automatic Classification Plugin in QGIS]. URL: <https://gis-lab.info/qa/qgis-sacp-sentinel2a.html> (accessed 21.12.2021). (In Russ.).
51. Komarov A.A., Sukhanov P.A., Kirsanov A.D. **2018**. Test monitoring polygons as a tool for the identification of remote sensing data. In: [The use of the Earth remote sensing in agriculture: materials of the All-Russian scientific conf. with international participation, 26–28 Sept. 2018, St.-Petersburg]. St.-Petersburg: Agrophysical Research Institute, p. 139–145. (In Russ., abstr. in Engl.). <http://doi.org/10.25695/agrophysica.2018.2.18778>
52. Shikhov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S. **2020**. [Thematic interpretation and interpretation of space images of medium and high spatial resolution: textbook]. (In Russ.). URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretatsiyakosmicheskikh-snimkov.pdf>. (accessed 15.12.2021).
53. Shikhov A., Marakulin Ya. **2012**. [Assessment of the aftermath of forest fires in 2010 in the Perm Territory]. (In Russ.). URL: gis-lab.info/qa/fires-perm.html (accessed 07.08.2021).
54. Martynova M.V., Sultanova R.R., Gabdelkhakov A.K., Rakhmatullin Z.Z., Odintsov G.E. **2020**. [Estimation of overgrowth of agricultural lands by tree species according to Landsat satellite data on the example of the site of the Bakalinsky district of the Republic of Bashkortostan]. (In Russ.). URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forests-ecosystems-in-a-changing-climate/> (accessed 02.12.2021).
55. Chashchin A.N. **2018**. [QGIS satellite image processing basics: a tutorial]. Permian: IPC «Prokrost», 47 p. (In Russ.).
56. Zubkov I.A., Skripachiov V.O. **2006**. [Application of unsupervised classification algorithms in the processing of remote sensing data]. In: [Current problems in remote sensing of the Earth from space (physical foundations, methods and technologies for monitoring the environment, natural and anthropogenic objects): Proceedings of the All-Russian Open Annual Conference, 13–17 November 2006, Moscow]. Moscow: IKI RAN, p. 57–62. (In Russ.).

Об авторах

Швидская Кристина Александровна (<https://orcid.org/0000-0002-1380-3545>), ведущий специалист лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, kristina66689@mail.ru

Копанина Анна Владимировна (<https://orcid.org/0000-0001-5354-3584>), кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, anna_kopanina@mail.ru

About the Authors

Shvidskaya, Kristina A. (<https://orcid.org/0000-0002-1380-3545>), Leading Specialist, Laboratory of plant ecology and geoecology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, kristina66689@mail.ru

Kopanina, Anna V. (<https://orcid.org/0000-0001-5354-3584>), Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Head of the Laboratory of plant ecology and geoecology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, anna_kopanina@mail.ru

Поступила в редакцию 03.05.2022
После рецензирования 29.07.2022
Принята к публикации 05.08.2022

Received 3 May 2022
Revised 29 July 2022
Accepted 5 August 2022