

А.А. Верхотуров¹, В.А. Мелкий²

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГЕОСИСТЕМЫ ОСТРОВА РАЙКОКЕ (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

АННОТАЦИЯ

Извержения вулканов существенно трансформируют природные геосистемы, что в наибольшей степени характерно для таких компонентов, как рельеф местности, растительный и животный мир. Теоретическая значимость настоящего исследования заключается в получении новых знаний, способствующих более глубокому пониманию реакции природной среды на последствия вулканических извержений различного типа и мощности. Практическая значимость обусловлена возможностью использования полученных результатов при обосновании оценки вулканической опасности территорий и составлении соответствующих карт. Извержения вулкана Райкоке на одноименном острове редки, однако все зарегистрированные факты активности характеризуются как сильные и существенным образом изменяли облик острова. В исследовании использовались космические снимки со спутников Sentinel-2 и Landsat. Пространственная динамика береговой линии исследовалась на основе синтезированных изображений (NIR-SWIR-RED). В исследовании трансформации растительного покрова применялся временной ряд нормализованного относительного индекса растительности (NDVI). В работе проанализирован временной ход изменения площади острова Райкоке, максимальных и средних значений NDVI в его пределах с 1972 по 2021 гг., а также составлена карта-схема динамики компонентов геосистемы острова Райкоке. Травяная и травяно-кустарниковая растительность покрывала порядка 80 % от суммарной площади острова в 2018 г. Районы, лишенные растительного покрова, приурочены к крупным подвижным осыпным склонам, пляжу, краевым частям лавовых потоков по периметру острова, а также крупноглыбовым развалам дна кратера. По состоянию на 2021 г. сомкнутый растительный покров занимает не более 0,03 % от площади острова и фрагментарно расположен в центральной части южного склона, нижних частях восточного, северного и западного склона. Анализ эруптивной деятельности вулкана Райкоке и временного хода NDVI позволяет предположить, что потребуется порядка 100 лет для того, чтобы растительный покров занял площадь, сопоставимую с площадью до извержения 2019 г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геосистемы, вулканические извержения, вегетационный индекс, геоинформационный анализ, Райкоке

¹ Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Центр коллективного пользования, Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, *e-mail*: ussr-91@mail.ru

² Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, лаборатория вулканологии и вулканопасности, Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, *e-mail*: vamelkiy@mail.ru

Alexey A. Verkhoturov¹, Vyacheslav A. Melkiy²

GEOINFORMATION ANALYSIS OF THE SPATIAL VARIABILITY OF THE RAIKOKE ISLAND (KURIL ISLANDS) GEOSYSTEM

ABSTRACT

Volcanic eruptions significantly transform natural geosystems, which is most characteristic of components such as terrain, flora and fauna. The theoretical significance of this research lies in acquisition of new knowledge that contributes to a deeper understanding of response of natural environment to consequences of volcanic eruptions of various types and power. The practical significance is due to possibility of using the obtained results in substantiating assessment of volcanic hazard territories and compiling corresponding maps. Eruptions of the Raikoke volcano are rare, but all recorded facts of activity are characterized as strong, and significantly changed appearance of Raikoke Island. The research used satellite images from Sentinel-2 and Landsat satellites. Spatial dynamics of coastline was studied on the basis of synthesized images (NIR-SWIR-RED). In the research of vegetation transformation, time series of normalized relative vegetation index (NDVI) was used. We analysed the time course of changes in the area of Raikoke Island, the maximum and average NDVI values within its limits from 1972 to 2021, and also compiled a schematic map of the dynamics of the components of the geosystem of Raikoke Island. Grass and grass-shrub vegetation covered about 80 % of total area of island in 2018. The areas devoid of vegetation cover are confined to large mobile talus slopes, beach, marginal parts of lava flows around perimeter of the island, as well as large block mass collapse of crater floor. As of 2021, the closed vegetation cover occupies no more than 0,03 % of the island's area and is fragmentally located in central part of southern slope, lower parts of eastern, northern and western slopes. An analysis of eruptive activity of the Raikoke volcano and the time course of NDVI suggests that it will take about 100 years for vegetation cover occupy an area comparable to area before eruption of 2019.

KEYWORDS: geosystems, volcanic eruptions, vegetation index, geoinformation analysis, Raikoke

ВВЕДЕНИЕ

Вулканические процессы играют существенную роль в трансформации природных геосистем на протяжении всей истории Земли. В наибольшей степени изменениям подвергаются рельеф местности, растительный и животный мир [Teitscher, Fassnacht, 2018; Schutter et al., 2015]. Районы активного вулканизма потенциально опасны, как для населения, так и для инженерных объектов, поэтому их вовлечение в хозяйственное освоение весьма ограничено. В России к таким районам относится полуостров Камчатка и Курильские острова.

Настоящая работа является продолжением исследований, направленных на выявление масштабов изменчивости природных геосистем Курильских островов в результате периодических извержений вулканов, а также более глубокого понимания реакции природной среды в различных природно-климатических условиях на подобные проявления эндогенной геодинамики [Верхотуров, Мелкий, 2021; Мелкий и др., 2021; Верхотуров, 2020].

Стратовулкан Райкоке расположен в центральной части Курильского архипелага на одноименном острове (рис. 1). Координаты местоположения кратера 48°17'28" с.ш.

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Center for collective use, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, e-mail: ussr-91@mail.ru

² Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Volcanology and volcano hazard, 1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, e-mail: vamelkiy@mail.ru

153°15'09" в.д. Извержения вулкана редкие, однако характеризуются как сильные (Volcanic Explosivity Index (VEI) – 4 [Newhall, Self, 1982]). В историческое время зафиксированы сильные извержения вулкана в середине XVIII века, в 1778, 1924 и 2019 гг. [Дегтерев, Чибисова, 2019]. При этом извержение вулкана Райкоке 1778 года является одним из немногих трагических примеров на Курильских островах с зафиксированными человеческими жертвами [Горшков, 1967].

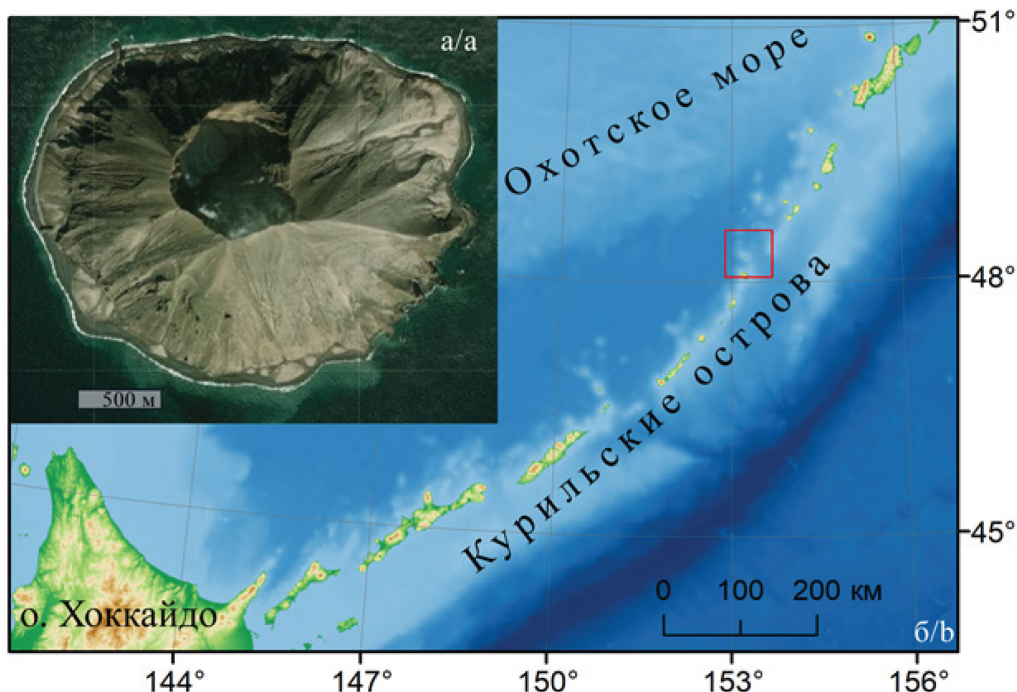


Рис. 1. Местоположение о. Райкоке на космическом снимке GeoEye
Fig. 1. Location of the Raikoke Island on GeoEye satellite image

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Центральные Курилы наиболее труднодоступны для непосредственного посещения, поэтому научные исследования проводятся редкими экспедициями [Левин и др., 2010; Блох и др., 2021; Takahashi et al., 2002]. В этой связи наиболее доступным источником информации являются данные дистанционного зондирования Земли. В настоящем исследовании использовались космические снимки со спутников Sentinel-2¹, и Landsat², полученные в вегетационный период (с июля по сентябрь) с 1972 по 2021 гг.

Пространственная динамика береговой линии исследовалась на основе синтезированных изображений (NIR-SWIR-RED), позволяющих достаточно точно разделять водную поверхность и сушу. Для снимков Sentinel-2 это набор каналов – 8A-11-4, для Landsat-8 – 5-6-4. Изменение кромки кратера уверенно дешифрируется на космическом изображении Sentinel-2 в красной зоне спектра, характеризующемся высоким пространственным разрешением (10 м).

В исследовании трансформации растительного покрова применялся временной ряд нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) [Черепанов, 2011; Голубева и др., 2019]. Исходные данные подверглись процедуре атмосферной коррекции по методу The Dark Object Subtraction (DOS1), реализованному в модуле Semi-Automatic Classification Plugin программного пакета QGIS [Moravec et al., 2021].

¹ Sentinel-2. European Space Agency: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2> (дата обращения 8.02.2022).

² Landsat Missions. United States Geological Survey: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-satellite-missions> (дата обращения 10.02.2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения геоинформационного анализа изменений геосистемы острова Райкоке отобраны 9 безоблачных сцен. После проведения стандартных операций по алгоритму [Верхотуров, 2020] подготовки космоснимков был подготовлен временной ряд NDVI карт-схем, отражающий состояние основных компонентов геосистемы острова. Наиболее контрастные изменения наблюдаются на картах-схемах за 2018 и 2020 гг. (рис. 2).

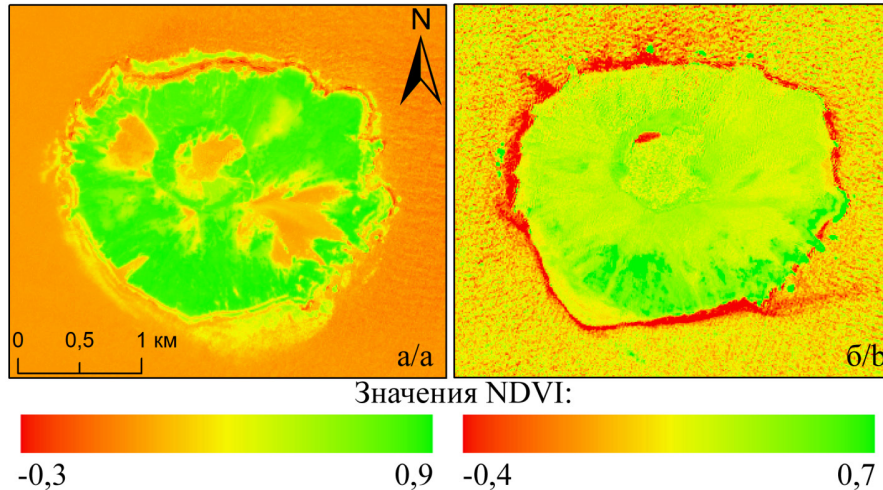


Рис. 2. Результаты расчета NDVI для территории острова Райкоке:
а – в 2018 г., б – 2020 г.

Fig. 2. Results NDVI calculations for territory Raikoke Island:
a – in 2018, b – in 2020

В результате дешифрирования синтезированных снимков (NIR-SWIR-RED) векторизовано положение береговой линии острова Райкоке в каждом году исследуемого периода. В полученных границах острова производилась оценка изменчивости NDVI (рис. 3). На основе анализа хода средних значений вегетационного индекса с 1972 по 2018 гг. можно утверждать, что процесс природного восстановления растительного покрова на острове за 95 лет после крупного извержения 1924 года еще не был завершен. Так, площади, имеющие NDVI > 0,4 (здоровая и сомкнутая растительность), в 1972 г. составляли 2,95 км², 2000 г. – 3,09 км², а к 2018 – уже 3,53 км².

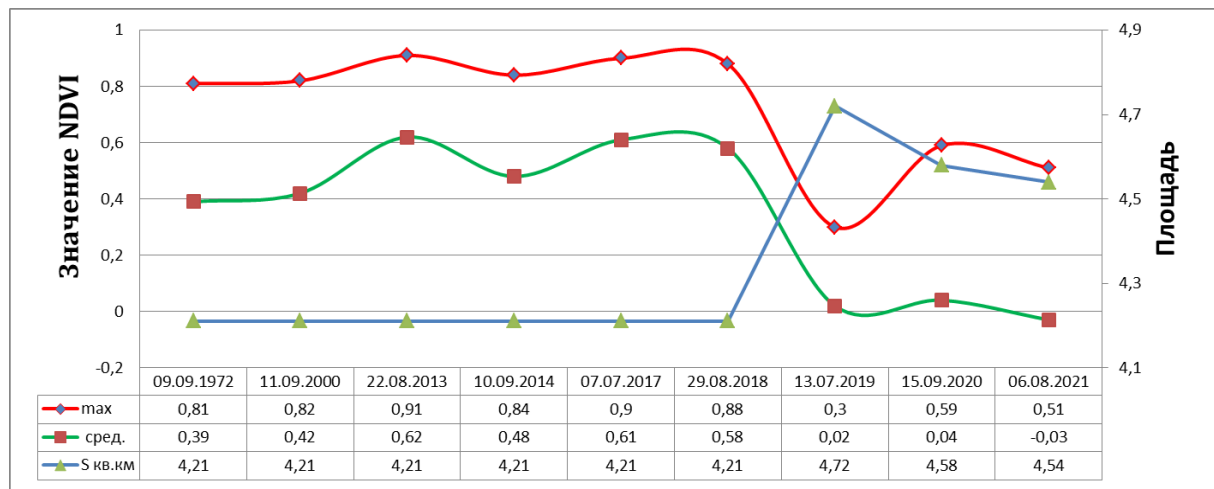
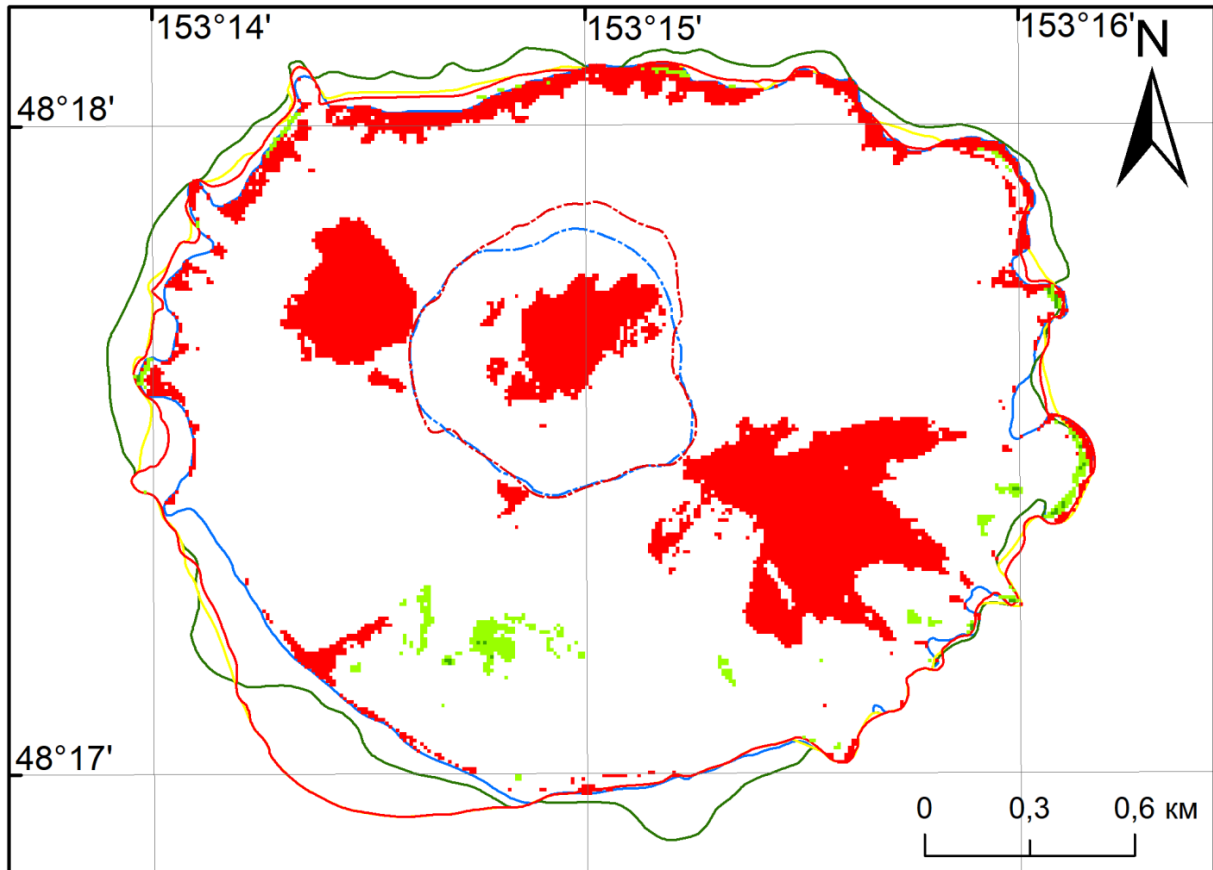


Рис. 3. Временной ход изменения площади острова Райкоке, максимальных и средних значений NDVI в его пределах

Fig. 3. The time course of changes area of the Raikoke Island, maximum and average NDVI values within its boundaries

Согласно работе [Takahashi et al., 2002] до извержения 2019 года флора острова насчитывала 68 видов сосудистых растений. По нашим оценкам травяная и травяно-кустарниковая растительность покрывала порядка 80 % от суммарной площади острова в 2018 г. Районы, лишённые растительного покрова, приурочены к крупным подвижным осыпным склонам северо-западной и юго-восточной экспозиции, к пляжу и к краевым частям лавовых потоков по периметру острова, а также наблюдаемым отдельным оползневым склонам. Во внутрикратерной зоне – крутые, с осыпями склоны, крупноглыбовые развалы дна. Средние значения NDVI с 2013 по 2018 гг. варьировали в интервале 0,48–0,62. Колебание максимальных значений вегетационного индекса не превышает 0,09.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Изменение растительного покрова

■ непокрытые растительностью площади в 2018 г. (NDVI < 0,2)

Площади, занимаемые растительностью в 2021 г.

■ NDVI - 0,2-0,4

■ NDVI > 0,4

Изменение положения береговой линии

2018

2020

2019

2021

Изменения кромки кратера

2018

2021

Рис. 4. Динамика компонентов геосистемы острова Райкоке

Fig. 4. Dynamics geosystem components of the Raikoke Island

Извержение 2019 года оказало катастрофическое воздействие на растительный покров острова Райкоке, что отражено в средних значениях NDVI, которые составили

всего 0,02. На тех же немногих участках, на которых растительность сохранилась, значения вегетационного индекса снизились до 0,3 вследствие угнетения вулканическим пеплом. Это предположение косвенно подтверждается увеличением максимальных значений NDVI на этих участках (до 0,59) в последующие два года. Аналогичная ситуация наблюдалась на ранее исследованной территории, прилегающей к вулкану Тятя на острове Кунашир [Мелкий и др., 2021]. По состоянию на 2021 г. сомкнутый растительный покров занимает 0,00131 км², что составляет не более 0,03 % от площади острова, и фрагментарно расположен в центральной части южного склона, нижних частях восточного, северного и западного склона.

Пространственные изменения компонентов геосистемы острова Райкоке наглядно отражены на карте (рис. 4). Положение береговой линии с 1972 по 2018 гг. оставалось без видимых изменений. Однако после извержения 2019 г., сопровождавшегося выбросом твердого материала, который аккумулировался по всему периметру надводной части вулкана, наблюдалось увеличение площади острова на 12 % (0,51 км²). Эти значения вполне соотносятся с результатами, полученными [Романюк, Дегтерев, 2020; Гришин и др., 2021]. Объем отложений на острове по сведениям [Гришин и др., 2021; Белоусов, Белоусова, 2021] оценивается в 0,05 – 0,06 км³. Вследствие дальнейшей активизации абразионных процессов и переноса осадочного материала вдольбереговыми течениями в последующие годы отмечается существенная перестройка очертаний береговой линии. Так к 2021 г. было размыто 0,18 км² суши. Также на космических снимках Sentinel-2 заметно увеличение размеров кромки кратера (до 95 м) в северном и северо-восточном направлении.

ВЫВОДЫ

Катастрофические извержения вулканов на таких небольших островах, как остров Райкоке, способны коренным образом изменять их облик, что главным образом отражается на биоте и перестройке рельефа.

Использование разновременных космических снимков среднего разрешения позволяет анализировать динамику отдельных компонентов островных геосистем. Процесс природного восстановления растительного покрова на острове за 95 лет после крупного извержения 1924 года еще не завершен. Площади, занятые сомкнутым растительным покровом, в 1972 г. составляли 2,95 км², в 2000 г. – 3,09 км², в 2018 – 3,53 км². Извержение 2019 года оказало катастрофическое воздействие на растительный покров острова Райкоке, который составляет в 2021 г. не более 0,03 % от площади острова и фрагментарно расположен в центральной части южного склона, нижних частях восточного, северного и западного склона.

После извержения 2019 г. пирокластический материал аккумулировался по всему периметру надводной части вулкана, что привело к увеличению площади острова на 12 %. В дальнейшем в ходе абразионных процессов отмечается существенная перестройка очертаний береговой линии, и к 2021 г. было размыто 0,18 км² новообразованной суши.

Анализ эруптивной деятельности вулкана Райкоке и временного хода NDVI позволяет предположить, что потребуется порядка 100 лет для того, чтобы растительный покров занял площадь, сопоставимую с площадью до извержения 2019 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Пирокластические отложения и механизм эксплозивного извержения 2019 г. вулкана Райкоке (Курильские острова). Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 29–30 марта 2021 года. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2021. С. 10–13.

2. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А. Вулканический массив Райкоке (Курильская островная дуга). Вулканология и сейсмология, 2021. № 4. С. 61–80. DOI: 10.31857/S0203030621030020.
3. Верхотуров А.А. Анализ изменений состояния экосистем на острове Атласова (Курильские острова). Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 2020. Т. 25. № 3. С. 139–150. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150
4. Верхотуров А.А., Мелкий В.А. Геоинформационный анализ изменчивости состояния природной среды после извержений вулкана Чикурачки по данным дистанционного зондирования земли. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2021. Т. 27. № 1. С. 292–303. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-292-303.
5. Голубева Е.И., Каширина Е.С., Новиков А.А., Глухова А.В. Использование индекса NDVI для геоэкологической оценки особо охраняемых природных территорий на примере города Севастополя. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М: Издательство Московского университета, 2019. Т. 25. Ч. 1. С. 320–331. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-320-331.
6. Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 287 с.
7. Гришин С.Ю., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Аиер А., Козырев И.А. Эксплозивное извержение острова-вулкана Райкоке (Курилы) в 2019 г.: пирокластические отложения и их воздействие на рельеф и экосистемы. Вулканология и сейсмология, 2021. № 6. С. 30–42. DOI: 10.31857/S0203030621050023.
8. Дегтерев А.В., Чибисова М.В. Извержение вулкана Райкоке в июне 2019 г. (о. Райкоке, центральные Курильские острова). Геосистемы переходных зон, 2019. Т. 3. № 3. С. 304–309. DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.3.304-309.
9. Левин Б.В., Мелекесцев И.В., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г., Кравчуновская Е.А., Избеков П.Э., Дегтерев А.В., Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Чибисова М.В., Власова И.И., Гурьянов В.Б., Коротеев И.Г., Харламов А.А., Макиннес Б. Экспедиция «Вулкан Пик Сарычева – 2010» (Курильские острова). Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 152–159.
10. Мелкий В.А., Верхотуров А.А., Братков В.В. Оценка воздействия эксплозивных извержений вулкана Тятя (о. Кунашир, Курильские острова) на растительный покров по данным дистанционного зондирования Земли. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2021. Т. 65. № 2. С. 184–193. DOI: 10.30533/0536-101X-2021-65-2-184-193.
11. Романюк Ф.А., Дегтерев А.В. Изменение конфигурации береговой линии о. Райкоке после эксплозивного извержения 21–25 июня 2019 г. (центральные Курильские острова). Геосистемы переходных зон, 2020. Т. 4. № 3. С. 351–358. DOI: 10.30730/gtrz.2020.4.3.351-358.
12. Черепанов А.С. Вегетационные индексы. Геоматика, 2011. № 2. С. 98–102.
13. Moravec D., Komárek J., López-Cuervo Medina S., Molina I. Effect of Atmospheric Corrections on NDVI: Intercomparability of Landsat8, Sentinel-2, and UAV Sensors. Remote Sens, 2021, V. 13. P. 3550. DOI: 10.3390/rs13183550.
14. Newhall C.G., Self S. The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. Journal of Geophysical Research, 1982. V. 87 (C2). P. 1231–1238. DOI: 10.1029/jc087ic02p01231
15. Schutter A., Kervyn M., Canters F., Bosshard-Stadlin S.A., Songo M.A.M., Mattsson H.B. Ash fall impact on vegetation: a remote sensing approach of the Oldoinyo Lengai 2007–08 eruption. Journal of Applied Volcanology, 2015. V. 4. No 15. P. 1–18. DOI: 10.1186/s13617-015-0032-z.
16. Takahashi H., Barkalov V.Y., Gage S., Joneson S., Ilushko M., Zhuravlev Y.N. A floristic study of the vascular plants of Raikoke, Kuril Islands. Acta Phytotax. Geobotanica, 2002. V. 53(1). P. 17–33.

17. *Teltscher 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. *Journal of Mountain Science*, 2018. V. 15. Iss. 9. P. 1851–1867. DOI: 10.1007/s11629-018-4869-6.

REFERENCES

1. *Belousov A.B., Belousova M.G.* Pyroclastic sediments and mechanism of 2019 explosive eruption of the Raikoke volcano (Kuril Islands). *Volcanism and associated processes: Proceedings of the XXIV Annual Scientific Conference dedicated to the Day of Volcanologist, Petropavlovsk-Kamchatsky, March 29–30, 2021. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2021. No. 3. P. 10–13. (in Russian).*
2. *Blokh Yu.I., Bondarenko V.I., Dolgal A.S., Novikova P.N., Petrova V.V., Pilipenko O.V., Rashidov V.A., Trusov A.A.* The Raikoke Volcanic Massif, Kuril Island Arc. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2021, No. 4, P. 61–80. (in Russian). DOI: 10.1134/S0742046321030027.
3. *Cherepanov A.S.* Vegetative indexes. *Geomatics*, 2011. No 2. P. 98-102. (in Russian).
4. *Degterev A.V., Chibisova M.V.* The eruption of Raikoke volcano in June of 2019 (Raikoke Island, Central Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon (Geosystems of Transition Zones)*, 2019. V. 3. No. 3. P. 304–309. (in Russian). DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.3.304-309.
5. *Golubeva E.I., Kashirina E.S., Novikov A.A., Glukhova E.V.* Using the NDVI index for geo-ecological estimation of specially protected natural territories by the example of Sevastopol. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: Moscow University Press, 2019. V. 25. Part 1. P. 320–331. (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-320-331.*
6. *Gorshkov G.S.* *Volcanism of the Kuril Island Arc. Moscow: Nauka, 1967. 287 p. (in Russian).*
7. *Grishin S.Yu., Belousov A.B., Belousova M.G., Auer A., Kozyrev I.A.* The 2019 explosive eruption of Raikoke volcano (Kurile Islands): pyroclastic deposits and their impact on the relief and ecosystems. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2021. No. 6. P. 30–42. (in Russian). DOI: 10.31857/S0203030621050023.
8. *Levin B.W., Melekestsev I.V., Rybin A.V., Razzhigaeva N.G., Kravchunovskaya E.A., Izbekov P.E., Degterev A.V., Zharkov R.V., Kozlov D.N., Chibisova M.V., Vlasova I.I., Guryanov V.B., Koroteev I.G., Kharlamov A.A., Macinness B.* The expedition "Peak Sarychev Volcano-2010" (The Kuril Islands). *Vestnik of the FEB RAS*, 2010. No. 6. P. 152–159. (in Russian).
9. *Melkiy V.A., Verhoturov A.A., Bratkov V.V.* Assessment impact of Tyatya volcano explosive eruptions (Kunashir Island, Kuril Islands) on the vegetation cover basing on the Earth's remote sensing data. *Izvestia vuzov "Geodesy and Aerophotosurveying"*, 2021. V. 65. No. 2. P. 184–193. (in Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-2-184-193.
10. *Moravec D., Komárek J., López-Cuervo Medina S., Molina I.* Effect of Atmospheric Corrections on NDVI: Intercomparability of Landsat8, Sentinel-2, and UAV Sensors. *Remote Sens*, 2021, V. 13. P. 3550. DOI: 10.3390/rs13183550.
11. *Newhall C.G., Self S.* The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 1982. V. 87 (C2). P. 1231–1238. DOI: 10.1029/jc087ic02p01231.
12. *Romanyuk F.A., Degterev A.V.* Transformation of the coastline of Raikoke Island after the explosive eruption on June 21–25, 2019 (Central Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon (Geosystems of Transition Zones)*, 2020, V. 4, No. 3, P. 351–358. (in Russian). DOI: 10.30730/gtr.2020.4.3.351-358.
13. *Schutter A., Kervyn M., Canters F., Bosshard-Stadlin S.A., Songo M.A.M., Mattsson H.B.* Ash fall impact on vegetation: a remote sensing approach of the Oldoinyo Lengai 2007–08 eruption. *Journal of Applied Volcanology*, 2015. V. 4. No 15. P. 1–18. DOI: 10.1186/s13617-015-0032-z.

14. *Takahashi H., Barkalov V.Y., Gage S., Joneson S., Ilushko M., Zhuravlev Y.N.* A floristic study of the vascular plants of Raikoke, Kuril Islands. *Acta Phytotax. Geobotanica*, 2002. V. 53(1). P. 17–33.
 15. *Teltscher 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. *Journal of Mountain Science*, 2018. V. 15. Iss. 9. P. 1851–1867. DOI: 10.1007/s11629-018-4869-6.
 16. *Verkhoturov A.A.* Analysis of changes in the State of ecosystems on Atlasova Island (Kuril Islands). *Vestnik SGUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, Vol. 25, No. 3, P. 139–150. (in Russian). DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150.
 17. *Verkhoturov A.A., Melkiy V.A.* Geoinformation analysis of variability state of the natural environment after eruption of the Chikurachki volcano by remote sensing data. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. No. 1. P. 292–303. (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-292-303.
-