

УДК 528.7: 528.44: 504.73:551.21
DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-4-555-573

Современное состояние растительного покрова вулкана Головнина по данным космических съемок (о. Кунашир, Курильские острова)

Мелкий В.А., Верхотуров А.А.

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б
E-mail: vamelkiy@mail.ru; ussr-91@mail.ru

Аннотация. Доступность и эффективность технологий аэрокосмического мониторинга дает возможность использовать его данные во многих направлениях научно-исследовательской деятельности. Вулканизм играет ведущую роль в формировании внешней оболочки Земли и растительного покрова, в частности. Растительный покров является чутким индикатором тенденций динамики процессов как эндогенных, так и экзогенных. Изменения его состояния могут служить внешними признаками изменений среды, которые могут быть зафиксированы при отсутствии возможности визуальных наблюдений или контактных измерений. Комплекс построек кальдеры вулкана Головнина является достаточно сложным объектом, который достоин внимательного изучения, во-первых, как действующий вулкан, во-вторых, как объект туристской привлекательности. В статье приведены результаты, полученные при исследовании растительного покрова вулкана, и картографические материалы, составленные на основании новых данных дистанционного зондирования Земли с применением геоинформационных технологий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, вулканизм, карта растительности, геоинформационное картографирование, геодезическая привязка снимков

Для цитирования: Мелкий В.А., Верхотуров А.А. 2022. Современное состояние растительного покрова вулкана Головнина по данным космических съемок (о. Кунашир, Курильские острова). Региональные геосистемы, 46(4): 555–573. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-4-555-573

Current State of the Vegetation Cover of Golovnin Volcano by Space Survey Data (Kunashir Island, Kuril Islands)

Vyacheslav A. Melkiy, Alexey A. Verkhoturov

Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
1B Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia
E-mail: vamelkiy@mail.ru; ussr-91@mail.ru

Abstract. Aerospace monitoring technologies make it possible to obtain a large amount of accessible and reliable information about state of the territory, which makes it possible to use this information in many areas of research activities. Volcanism plays a leading role in the formation of the Earth's outer shell, including vegetation cover. Vegetation cover is a sensitive indicator of trends in the dynamics of endogenous and exogenous processes. Changes in the state of vegetation can serve as external signs of changes in the environment, which can be record in the absence of visual observing or contact measurements. The complex of relief forms of the Golovnin's volcano caldera is a rather elaborate object that deserves careful researches, firstly, as active volcano, and secondly, as object of tourist attraction. The results, obtained during a comprehensive research of the vegetation cover of the volcano and cartographic materials compiled by new data using geoinformation technologies are presented in the article.

Keywords: remote sensing, volcanism, vegetation map, geoinformation mapping, geodetic snap of images



For citation: Melkiy V.A., Verkhoturov A.A. 2022. Current State of the Vegetation Cover of Golovnin Volcano by Space Survey Data (Kunashir Island, Kuril Islands). Regional Geosystems, 46(4): 555–573 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-4-555-573

Введение

На Земле нет процессов, которые оказывают более значительное воздействие на окружающую среду, чем магматические: вулканизм играет ведущую роль в формировании внешней оболочки (земной коры, гидросферы, атмосферы и биосферы) и служит определяющим фактором геоэкологического состояния экосистем [Братков и др., 2021]; загрязнение атмосферы твердыми и летучими продуктами может вызвать значительное похолодание на поверхности всей планеты или какого-либо ее полушария [Братков и др., 2022]; формирование геофизических полей обеспечивает энергетические условия, в которых могут существовать живые организмы.

Вулканическая деятельность оказывает довольно разнообразное влияние на растительный покров. Различают как отрицательное, так и положительное воздействие вулканических процессов на растительность. Среди негативных факторов, поражающих растения, выделяют катастрофические, которые приводят к гибели как отдельных деревьев, так и больших массивов растительных сообществ вследствие механических повреждений листовых пластин, веток и стволов при выпадении крупнообломочной тефры, при прохождении взрывных волн, а также в результате термических ожогов раскаленными газами или пирокластическим материалом во время извержений. Лавовые потоки сносят на своем пути всюкую растительность. Выпадение мощных слоев шлаков и пеплов уничтожает напочвенный, травяной и кустарниковый покров, а также наносит значительный урон лесным сообществам. Склоны построек активных вулканов зачастую представляют собой пустынные пространства. Большинство извержений продолжается несколько дней или недель. За это время направление господствующих ветров изменяется не так уж часто, поэтому отложение шлаков и пеплов происходит в каком-то определенном секторе вулкана. Растительность, включая крупные деревья, может быть уничтожена, как правило, на расстоянии 3–5 км от кратера в тех местах, где мощность отложений превышает 1 м [Гришин, 2019; Верхотуров, 2020; Гришин и др., 2021] (исключение: влк. Катмай, Аляска, 1912 г., где 1 м отложений выпал на расстоянии 40–45 км от эруптивного центра) [Болт и др., 1978].

Объекты и методы исследования

Объектом для исследования послужили данные космических съемок, которые использовались при изучении возможностей использования информации, получаемой при дешифрировании аэрокосмических изображений с целью составления карт состояния растительного покрова, подверженного воздействию проявлений вулканических процессов. Изучались космические снимки кальдеры вулкана Головнина (рис. 1), картографические материалы ее территории, проводились полевые геоботанические работы в границах различных ландшафтных единиц в пределах вулканической постройки.

В основу статьи положены результаты анализа космических снимков со спутника Sentinel-2, отражающих состояние растительного покрова вулканического комплекса кальдеры Головнина. При выполнении данного исследования осуществлялся выбор из ряда доступных космических снимков среднего пространственного разрешения систем Landsat 1–8 и Sentinel-2 за период с 1972 по 2022 г. [BEA-Science ..., 2022; EarthExplorer ..., 2022]. Снимки подбирались в период наибольшего развития фитомассы (июль – октябрь) с отсутствием или же незначительным перекрытием интересующего района облаками. Предварительная обработка снимков включала радиометрическую и атмосферную коррекцию изображения с использованием программного комплекса QGIS с использованием известных методик [Boyte et al., 2017; Byer, Jin, 2017; Nghiem et al., 2018; Nguyen et al., 2018; Zanter, 2018; Mancino et al., 2020].

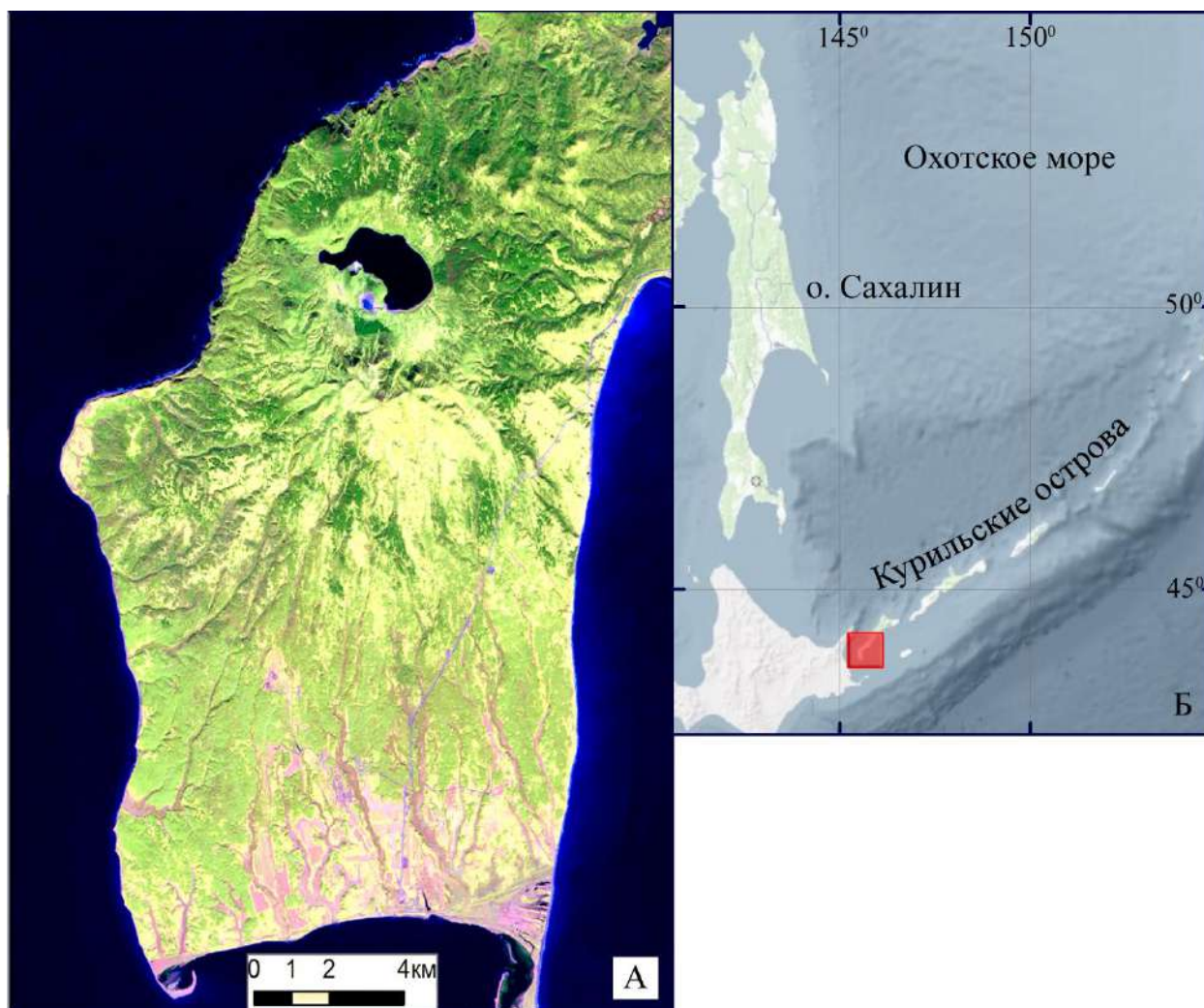


Рис. 1. Космический снимок кальдеры Головнина и ее местоположение на карте
Fig. 1. Space image of the Golovnin caldera and its location on the map

Дополнительно при проведении исследований использовались снимки высокого разрешения с доступных сервисов Bestmaps и GoogleEarth [Bestmaps..., 2022; GoogleEarth..., 2022]. Картографирование осуществлялось при помощи ArcGIS.

Построение цифровой модели рельефа (ЦМР) выполнялось по данным, полученным при съемках с шаттла при реализации миссии Radar Topography Mission (SRTM) в период с 11 по 22 февраля 2000 г., доставленных на Землю челноком «Индевор». Шаттл с 60-метровой мачтой был самым большим космическим кораблем, летавшим в космосе. Пространственное разрешение полученной модели составляет по горизонтали 30 м, по вертикали – около 15 м. Для радиолокационной интерферометрии при съемке использовали радар с синтетической апертурой C/X-диапазона SIR-C/X-SAR с фазово-когерентными датчиками, обеспечившими получение двух изображений одновременно [Farr, Kobric, 2011; Takaku et al., 2018]. Данные интерферометрических съемок собраны на сайте SRTM [SRTM data, 2022].

При исследованиях состояния растительного покрова большое внимание уделялось изучению карт территории, составленных ранее, которые послужили источником информации о состоянии растительности в момент проведения съемок и позволили выявить изменения, произошедшие ко времени выполнения полевых работ. При подготовке статьи использовались топографические карты масштабов от 1: 50 000 (федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-внедренческий центр геоинформа-



ционных систем и технологий» – ФГУП «ГОСГИСЦЕНТР») до 1:2 000 000 на данную территорию. Большая подборка разномасштабных карт как топографических, так и тематических размещена на сайте «Retromap» [Подробная карта мира ..., 2022].

Выявление особенностей растительного покрова производилось на основе наблюдений, выполненных во время полевых работ в кальдере Головнина, а также анализа карт и статей «Атласа Курильских островов» [2009], карты лесов мира, обновляемой Глобальной лесной вахтой [Global Forest..., 2022], а также ландшафтной карты мира [2022].

Полевые исследования растительных сообществ района проводилось на эталонных участках по проверенным методикам [Мелкий и др., 2020а, б; Мелкий и др., 2021]. Полевые описания имеют точную геодезическую привязку, обработаны, структурированы и подготовлены для использования.

Картографирование растительных сообществ производилось путем анализа космических снимков Sentinel-2, которые позволили выделить на изображениях классы, отличающиеся по спектральным признакам [Белова, Ершов, 2019; Fassnacht et al., 2019; Терехин, 2020]. Привязка контуров растительности к определенным интервалам высоты рельефа позволила оценить распределение типов лесов по высотным интервалам, выявленным по данным SRTM. Программные средства ГИС позволяют привязать полигоны по абсолютным высотам, крутизне склонов, экспозиции [Ukrainskiy et al., 2020].

Снимки, полученные по данным отдельных каналов сенсора, не дают возможности достаточно точно определить границу леса. Поэтому необходимо использовать различные аналитические методы определения растительных сообществ, отличающихся по спектральным характеристикам. Для определения границ различных лесных сообществ нами использовались следующие методы дешифрирования: 1) метод классификации; 2) метод соотношения спектральных каналов; 3) метод спектрального индекса [Мальшева, 2018; Maxwell et al., 2018; Hermosilla et al., 2018; Ховратович и др., 2019; Hart et al., 2019].

Во время исследования кальдеры Головнина стояла задача выявления индикационных характеристик растительного покрова. Интересовали в первую очередь возможности получения сведений об изменениях растительности при воздействиях вулканических процессов, определение тенденций динамики сукцессионных процессов, а также выявление длительности периода формирования коренных лесных систем на участках, где растительность была полностью сведена при извержениях.

В качестве оценочного средства состояния растительного покрова применялся нормализованный относительный вегетационный индекс (NDVI), рассчитываемый в ArcGIS, который хорошо зарекомендовал себя при использовании в различных климатических условиях [Братков, Атаев, 2017; Атаев и др., 2018; Jin et al., 2018; Xu et al., 2018; Sun et al., 2018; Зуев и др., 2019; Heck et al., 2019; Suvanto et al., 2019; Корзников и др., 2019; Верхогуров, 2020; Шарый и др., 2020; Гусев, 2022].

Результаты и их обсуждение

Кальдерный массив вулкана Головнина расположен на юге острова Кунашир и представляет собой две вложенные кальдеры, а также ряд небольших экструзивных куполов [Горшков, 1967; Новейший и современный ..., 2005], сложенных породами андезитодацитового или дацитового состава: 71,60 % – SiO_2 , 3,42 % – Na_2O , 1,54 % – K_2O [Мелкий, 2010]. Первое описание кальдеры выполнено Е.К. Мархининым [1959], им составлена подробная схема сольфатарных полей, исследованы физико-химические параметры термальных источников. Кальдерообразующее извержение произошло около 39 000 лет назад, что подтверждается радиоуглеродным датированием древесины из торфяника под слоем отложений в береговом обнажении Белозерского клифа (39200 ± 700 лет, ГИН-7901) [Разжигаева и др., 2000]. Можно предположить, что внутренняя кальдера образовалась позднее. Отло-

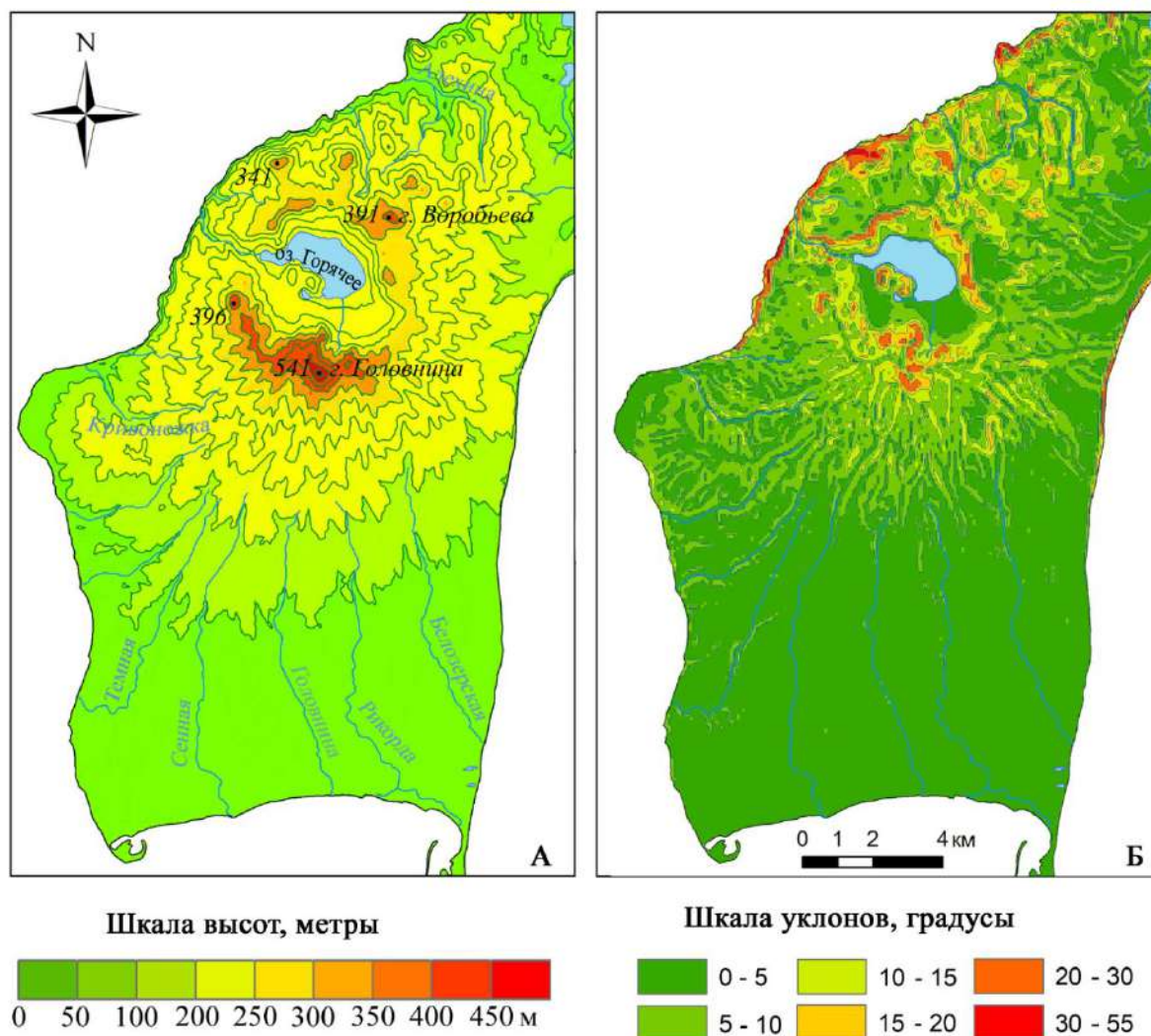


Рис. 3. Карта рельефа вулкана Головнина, построенная по данным SRTM и топографической карты масштаба 1: 100 000 (А) и схема уклонов в пределах его постройки
Fig. 3. Relief map of the Golovnin volcano, built according by the data of a SRTM and a topographic map at a scale of 1: 100,000 and slope scheme within its construction

Природные условия на юге острова Кунашир предопределяются географическим положением. Остров расположен в умеренном климатическом поясе северного полушария Земли с таежной растительностью.

Для обеспечения хорошей дешифрируемости растительных сообществ использовались различные комбинации спектральных каналов 11-8-4 (SWIR-NIR-RED), либо 8-4-3 (NIR-RED-GREEN). Успешность выделения некоторых видов растительности в значительной степени зависит от сезона съемки. Для получения детальной характеристики породного состава лесов были использованы разносезонные снимки, причем наиболее информативными являлись снимки осеннего сезона, полученные в период окончания вегетации, пожелтения листвы и листопада (конец сентября). Использование разносезонных снимков позволило получить более детальную характеристику растительных сообществ, покрывающих вулканическую постройку.

В результате проведенной классификации при анализе космических снимков Sentinel-2 выделены 7 классов, из которых 6 – растительные сообщества, отличающиеся по спектральным признакам (рис. 4). Правильность выделения классов растительности подтверждена при проведении полевых геоботанических исследований.

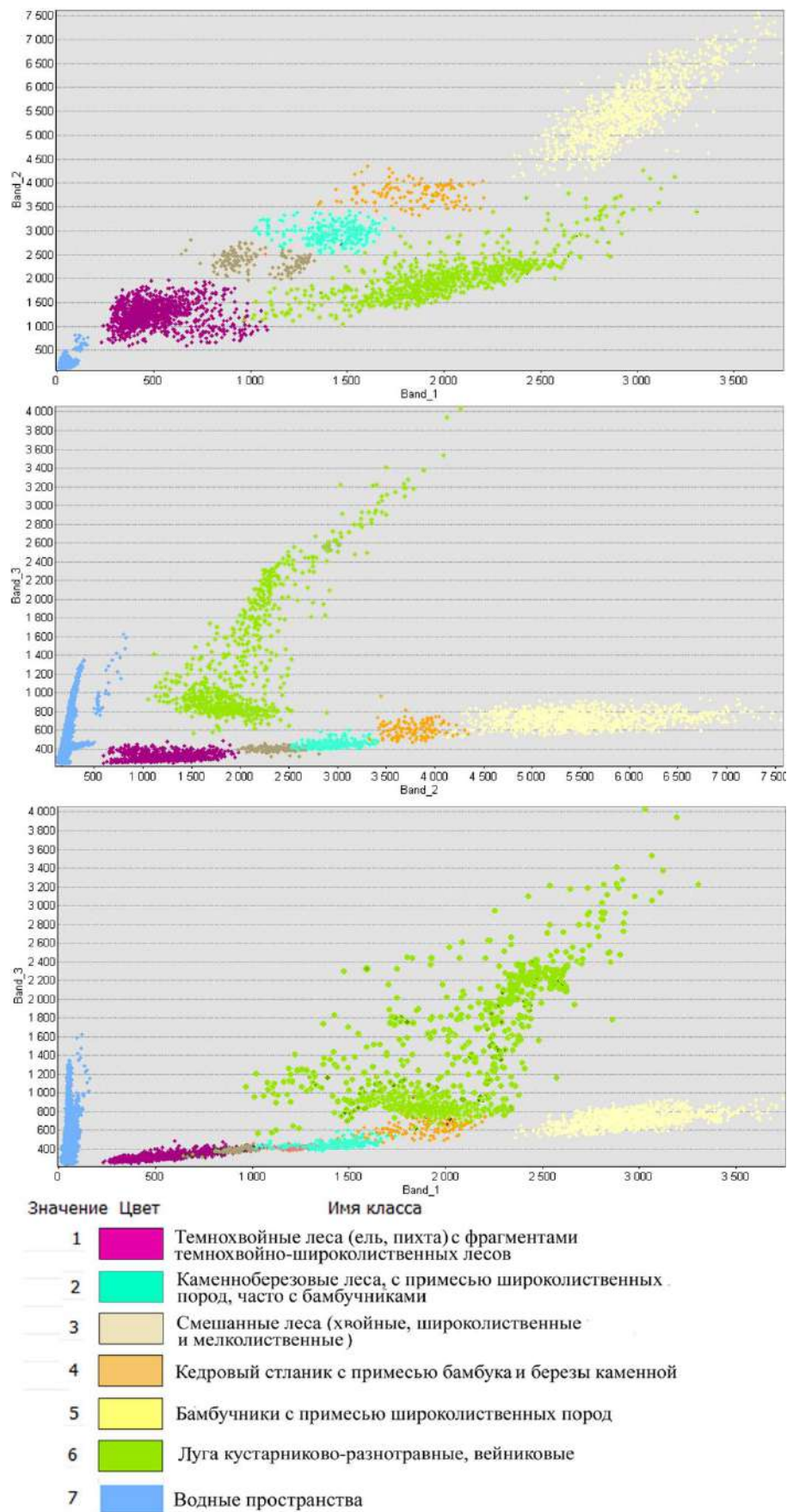


Рис. 4. Разделимость классов растительности вулкана Головнина на диаграмме рассеяния
Fig. 4. Separability of vegetation classes of the Golovnin volcano on the scattering diagram

Флора и растительность о. Кунашир отличается большим разнообразием, что обусловлено воздействием вулканических извержений, влиянием теплого и холодного течений, муссонной циркуляцией атмосферы. Богатый флористический состав острова представлен 883 видами высших сосудистых растений. Лесистость Кунашира составляет 61 %, среди них пихтово-еловые занимают 67–68 %, лиственные – 17 %, кедровый стланик – 16 % [Алексеева, 1992].

На вулкане Головина были выделены участки, покрытые следующими растительными сообществами:

- темнохвойными лесами;
- каменноберезовыми лесами;
- смешанными лесами;
- зарослями кедрового стланика;
- бамбучниками;
- луговыми сообществами.

Темнохвойные елово-пихтовые и пихтово-еловые леса (*Picea yezoensis*, *Abies sachalinensis*, иногда *Picea glehnii*) зеленомошно-кустарниковые, травяно-кустарниковые, зеленомошно-папоротниковые распространены преимущественно на склонах северной экспозиции (рис. 5а). Встречаются чистые ельники и пихтарники. Состав темнохвойных древостоев дополняют береза Эрмана (*Betula ermanii*), рябина смешанная (*Sorbus commixta* Hedl.), черемуха айнская или Сьори (*Padus ssiori* F. Schmidt), ильм горный (*Ulmus glabra*), встречается тис остроколючный (*Taxus cuspidata* Siebold & Zucc.). Подлесок состоит из кустов смородины широколистной (*Ribes latifolium* Jancz.), волчника иезского (*Daphne jezoensis* Maxim), бузины Зибольда (*Sambucus sieboldiana* (Miq.) Graebn.) и др. Травяной покров представлен майником камчатским (*Maianthemum kamtschaticum* Nakai), дереном (*Cornus alba* L.), кислицей заячьей (*Oxalis acetosella* L.) и др. Среди папоротников распространены щитовники амурский, австрийский и толстокорневищный (*Dryopteris amurensis* Takeda, *D. austriaca* Woyнар, *D. crassirhizoma* Nakai) и чистоеуст (*Osmunda* L.).

Каменноберезовые леса (*Betula ermanii*) в районе вулкана Головина не сформировали единый выраженный высотный растительный пояс: иногда они опускаются к морским берегам, а также вклиниваются в хвойные и широколиственные леса (рис. 5б). Местами в каменноберезовых лесах или редколесье встречаются куртины кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel). В подлеске каменноберезников преобладают бамбучники.

Смешанные леса на южных склонах вулканической постройки сформированы широколиственными лесообразующими породами: дубами кудрявым и зубчатым (*Quercus crispula* Blume; *Q. dentata* Thunb.), березами каменной (*Betula ermanii* Cham.) и плосколистной (*Betula pendula* Roth.), кленом Майра (*Acer mayrii* Schwer.). В хвойно-широколиственных лесах очень часто основными лесообразующими породами являются все те же – пихта сахалинская и ель иезская. В смешанных древостоях также встречаются бархат сахалинский (*Phellodendron sachalinense* F. Schmidt), черемуха айнская (*Padus ssiori* F. Schmidt), диморфант (*Kalopanax septemlobus* (Thunb.) Koidz.), вишни сахалинская и Максимовича (*Prunus kurilensis* Miyabe, *P. maximowiczii* Rupr.), ильмы горный и японский (*Ulmus laciniata*, *U. japonica*), рябина (*Sorbus commixta* Hedl.). Только на самом юге вулканической постройки встречаются редкие клен японский (*Acer japonicum* Thunb.), береза Максимовича (*Betula maximowicziana* Regel), ботрокариум спорный (*Bothrocaryum controversum* (Hemsl.) Rojark.), магнолия обратнаяцевидная (*Magnolia hypoleuca* Siebold & Zucc.). На южных склонах также отмечается широкое распространение лиан: винограда Куанье (*Vitis coignetiae* Pulliat ex Planch.), гортензии черешчатой (*Calyptanthus petiolaris* (Siebold & Zucc.) Nakai), актинидий Коломикта и острой (*Actinidia kolomikta* (Maxim.) Maxim., *A. arguta* Siebold & Zucc.), сумаха восточного (*Toxicodendron orientale* Greene), схизофрагмы гортензиевидной (*Schizophragma hydrangeoides* Siebold & Zucc.) и др. В подлеске смешанных лесов распространены бамбучники (рис. 5в) [Алексеева, 1992].



Рис. 5. Растительные сообщества на вулкане Головнина: а – темныхвойные елово-пихтовые леса; б – каменноберезовые леса; в – смешанные леса и бамбучники в кальдере; г – кедровый стланник у озера Кипящего. Фото В.А. Мелкого

Fig. 5. Plant communities on Golovnin Volcano: а – dark coniferous spruce-fir forests; б – stone birch forests; в – mixed forests and bamboo forests in the caldera; г – cedar elfin wood. Photo by V.A. Melkiy

Кедровый стланник (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) на вулкане Головнина формирует фоновое сообщество (рис. 5г). Вечнозеленый кустарник не образует на склонах вулкана сплошного высотного пояса, потому что высоты здесь небольшие. Стелющаяся форма стланника является приспособлением к выживанию в многоснежных районах с суровым климатом. Растение использует своеобразный механизм предзимнего полегания стволов на землю при понижении температуры воздуха. Весной стланник снова поднимается.

Одним из фоновых ландшафтных растений территории является бамбучник (см. рис. 5в), который представлен тремя видами: курильским или Сугавары (*Sasa kurilensis* (Rupr.) Makino & Shibata), синанским (*Sasa senanensis* f. *nobilis* Makino & Uchida), колосковым (*Sasa spiculosa* (J.A. Schmidt) Makino). Густота и высота бамбучника зависит от освещенности. На открытых участках он достигает высоты 2,5 м. При достаточно высокой сомкнутости крон в роще из ели Глена южнее оз. Кипящего бамбук не растет вовсе. В зарослях бамбука встречаются золотарник курильский (*Solidago kurilensis* (Juz.) Vorosch.), мелкопестник канадский (*Conyza canadensis* (L.) Cronquist), зверобой камчатский (*Hypericum kamtschaticum* Ledeb.).

Высокотравную растительность также можно отнести к ландшафтным сообществам вулкана Головнина, которые повсеместно занимают берега ручьев и рек в распадках, поверхности делювиально-пролювиальных отложений у подножья береговых уступов там, где достаточно хорошо удерживается влага. В составе этих сообществ присутствуют гречихи сахалинская (*Polygonum sachalinense* F. Schmidt) и Вейриха (*Polygonum weyrichii* F. Schmidt), шеломайник камчатский (*Filipendula camtschatica* (Pall.) Maxim.), крестовник коноплелист-

ный (*Senecio cannabifolius* Less.), какалия мощная (*Cacalia robusta* Tolm.), крапива плосколистная (*Urtica platyphylla* Wedd.), белокопытник широкий (*Petasites japonicus* Kitam.), дудник медвежий (*Angelica ursina* (Rupr.) Maxim), купырь лесной (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.) и др. Высота травяного покрова достигает высоты 3,5–4 м.

На морских прибрежных террасах, обрамляющих вулканическую постройку распространены: шиповник морщинистый (*Rosa rugosa* Thunb.), морянка бутерлаковидная (*Arenaria Ruppius* ex L.), колосняк мягкий (*Leymus mollis* (Trin.) Pilg.), чина японская (*Lathyrus japonicus* Willd.), осоки малорослая (*Carex pumila* Thunb.) и большеголовая (*Carex macrocephala* Willd. ex Spreng.), полынь Стеллера (*Artemisia stellerana* Bess.), галения (*Halenia corniculata* (L.) Cornaz), мертензия морская (*Mertensia maritima* (L.) Gray). Песчаные дюны занимают крестовник лжеарниковый (*Senecio pseudoarnica* Less.) и норичник Грея (*Scrophularia alata* A. Gray). На берегу можно встретить виноград (*Vitis coignetiae* Pulliat ex Planch.), сумач восточный (*Toxicodendron orientale* Greene), лимонник (*Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill.), малину мелколистную (*Rubus parvifolius* L.). На скалах растут крупка курильская (*Draba kurilensis* (Turcz.) N. Busch), нивяник курильский (*Leucanthemum kurilense* (Tzvelev) Vorosch.), камнеломка Форчуна (*Saxifraga fortunei* Hook.), лапчатка крупноцветковая (*Potentilla megalantha* Takeda), водосбор вееровидный (*Aquilegia flabellata* Siebold & Zucc.), первоцвет клинолистный (*Primula cuneifolia* Ledeb.), звездчатка иглицелистная (*Stellaria ruscifolia* D. F. K. Schltdl.), остролодочник вдавленный (*Oxytropis retusa* Matsum.), лигустикум Хультена (*Ligusticum hultenii* Fernald), вероника Шмидта (*Veronica schmidtiana* Rgl.) и др. На переувлажненных почвах на берегах водотоков и водоемов растут вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliata* L.), рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), сабельник болотный (*Comarum palustre* Lamb.). Около старых пней в лесах растет красника (*Vaccinium praestans* L.), на открытых пространствах – брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), на кочках болот – клюква (*Vaccinium oxycoccos* L.) [Алексеева, 1992].

Динамика состояния растительности на вулканах хорошо прослеживается с помощью данных аэрокосмических съемок [Ганзей, 2015; Teltscher, Fassnach, 2018; Biass et al., 2019]. Воздействие вулканических процессов на растительный покров различают непосредственное и косвенное. Непосредственное влияние на растительность может быть катастрофическим (приводит к гибели фитоценоза), сукцессионным (когда претерпевает изменения), и импульверизационным, связанным с привнесением в почву минеральных частиц, изменением состава атмосферы и компонентов биогеоценоза. Прямое воздействие проявлений вулканической деятельности: повреждение и уничтожение группировок растительности взрывной воздушной волной, отложениями взрывов, пирокластическими и лавовыми потоками, игнимбритовыми отложениями; запыление и повреждение надземных частей растений пирокластикой; повреждение растений агрессивными химическими соединениями. К полному уничтожению растительности приводят частые пеплопады. Активные вулканы обычно окружены безжизненными пространствами, покрытыми мощными отложениями вулканических пеплов и шлаков.

Импульверизационное косвенное влияние обусловлено преобразованием окружающей среды в результате изменения климатических факторов (снижение прихода лучистой энергии вследствие загрязнения атмосферы вулканической пылью, формирование специфического микроклимата в районе сольфатарных полей и около гидротермальных источников); трансформации почвенно-гидрологических условий (нарушение системы стока в результате отложения мощного пирокластического чехла и выпаживания почв новыми лавовыми потоками, изменение уровня грунтовых вод); изменения состава атмосферы (увеличение концентрации углекислого газа, хлористого водорода, сернистого газа и других химических соединений и элементов, уровня радиоактивности), которые приводят к нарушениям сложившихся отношений в биоценозе.

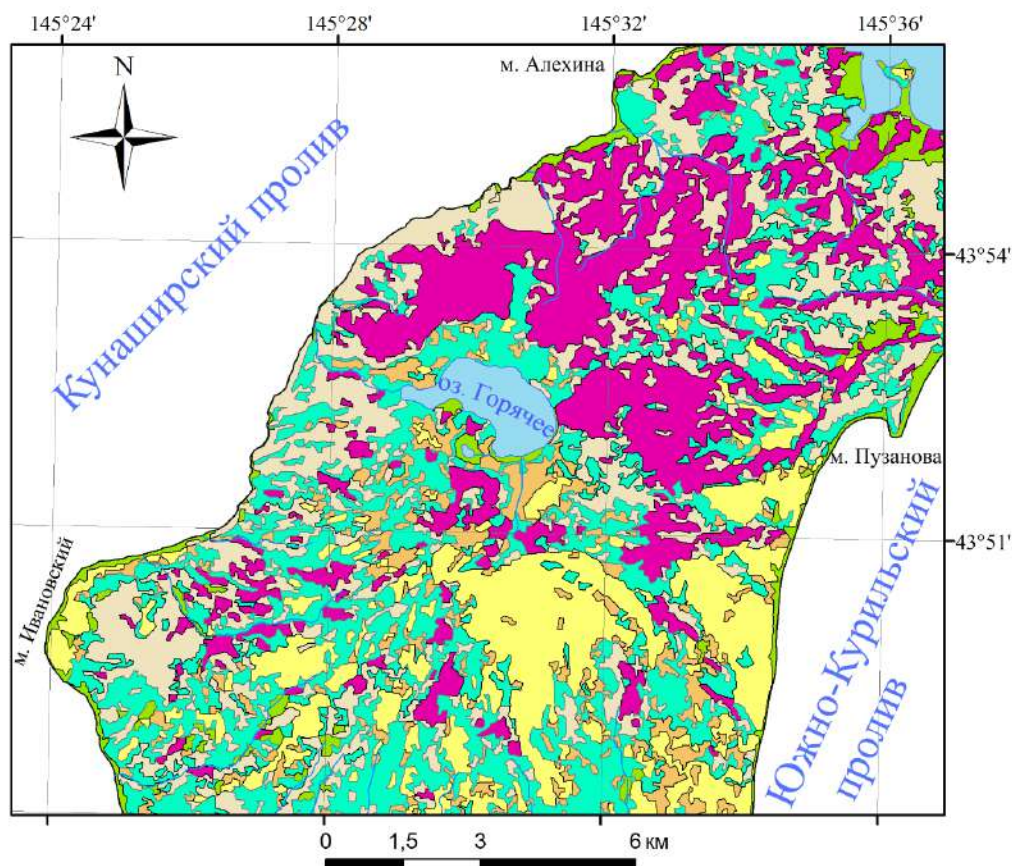
На площадках прогрева термальными водами внутри кальдеры Головинина отмечено пять сольфатарных полей с выходами термальных источников (около двадцати) [Жарков, 2014; Жарков, Козлов, 2016]. На периферии вулкана находятся две группы

Алехинских термальных источников (северные и южные) и Внешнее сольфатарное поле. Температура сольфатар достигает 100 °С (на Центральном Западном поле – 102,5 °С) [Жарков, Козлов, 2016]. В газовом составе термальных источников и сольфатар преобладают CO₂, H₂S, N₂, HCl, SO₂. Сольфатарные поля практически лишены растительности. Ближе всех растений возле сольфатарных полей (10–15 м) произрастают отдельные особи спиреи Бовера (*Spiraea beauverdiana*), рейнгутрии или гречихи сахалинской (*Reynoutria sachalinensis* (Fr. Schmidt) Nakai). Растения имеет полную жизненность: цветут и плодоносят, видимых повреждений на листьях и стеблях растений нет [Вацерионова и др., 2021]. На площадках прогрева термальными водами внутри кальдеры, по мере удаления от сольфатарных полей, количество растений на единицу площади увеличивается: вместе с группами *Spiraea* и *Reynoutria* встречаются куртины шикши сибирской (*Empetrum sibiricum* V. Vassil.), багульника подбела (*Ledum hypoleucum* Kom.), овсяницы японской (*Festuca japonica* Makino) и др.

Термальные воды источников являются напорными и характеризуются преимущественно трещинно-жильным типом циркуляции. Температура воды на выходе от 60 до 95 °С. Химический состав вод довольно разнообразен: от субнейтральных и слабощелочных (pH = 6–8,5), гидрокарбонатно-сульфатных натриево-кальциевых до кислых (pH = 2–2,5), сульфатных натриевых, что объясняется сложными процессами взаимодействия в системе «вода–порода» [Shvartsev et al., 2018; Kharitonova et al., 2020]. В термальных водах практически всегда присутствуют SiO₂, Fe³⁺, Fe²⁺, Mg²⁺, Mn²⁺, Ca²⁺, Na⁺, Zn²⁺, Ga³⁺, Rb⁺, Sb³⁺, As³⁺ и гидротермальный α-кварц, которые привносятся при выщелачивании андезита в кислой среде водного раствора. Кислые (pH = 2,5), хлоридно-сульфатные натриевые воды оз. Кипящего в местах выхода сольфатар имеют температуру до 90 °С. Почва вблизи источников всегда прогрета до 15–35 °С, что обеспечивает формирование своеобразных фитоценозов и ландшафтов: трава и зеленые мхи растут здесь круглый год, вегетационный период кустарничков, кустарников и древесной растительности также растянут во времени [Нешатаева и др., 2021]. Растительность плотно заселяет поверхностный слой почвы [Вацерионова и др., 2021].

Воздействие вулканических процессов в последние тысячелетия на растительный покров окрестностей вулкана Головнина в разных направлениях было довольно разнообразным, что нашло отражение на карте растительности (рис. 6). Склоны вулкана в северном и восточном направлениях от кальдеры покрывают темнохвойные леса, которые были изменены в меньшей степени, чем растительность на других склонах. Распределение лесов в юго-восточном секторе вулкана показывает наличие существенного воздействия вулканических процессов на растительность. В пределах юго-западного сектора наблюдается заселение территории темнохвойными и лиственными породами, что свидетельствует о завершающих стадиях растительных сукцессий и длительном отсутствии значительных повреждений древостоев.

Сведение растительного покрова на отдельных участках, быстрое заселение пионерной растительностью, а затем и древесными видами, приводит к увеличению ландшафтного разнообразия, и, как следствие, пейзажно-эстетической привлекательности ландшафтов. Использование туристско-ресурсного потенциала вулканогенных объектов Курильских островов представляет большой интерес. Развитие транспортного сообщения, расширение всесезонного использования гостиниц и техническое обеспечение путешествий в зимний период позволит существенно усилить значение туризма в отраслевой специализации экономического развития островов.



Условные обозначения

- Темнохвойные леса (ель, пихта), местами лиановые, с фрагментами темнохвойно-широколиственных лесов
- Каменноберезовые леса, с примесью широколиственных пород, часто с бамбучниками
- Смешанные леса (хвойные, широколиственные и мелколиственные породы)
- Кедровый стланник с примесью бамбука курильского и березы каменной
- Бамбучники с примесью широколиственных пород, куртин кедрового стланника
- Безлесные территории, луга кустарниково-разнотравные, вейниковые

Рис. 6. Карта распространения растительных сообществ на вулкане Головнина
Fig. 6. A map of the prevalence of plant communities on the Golovnin volcano

Заключение

Восстановление растительного покрова по составу до коренных хвойных бореальных лесов, характерных для климатических условий юга Курильских островов, на рыхлых вулканических отложениях после полного уничтожения может продолжаться несколько сотен лет, а на поверхности лавовых потоков – даже тысячелетий. Состав и структура растительного покрова постройки вулкана Головнина хранят следы катастрофических извержений, которые произошли много веков назад.

Распределение темнохвойных лесов в пределах постройки вулкана Головнина свидетельствует о том, что катастрофическому воздействию в последние тысячелетия подвергались биогеоценозы южного и в меньшей степени юго-восточного секторов: восстановление лесных коренных сообществ не завершилось по настоящее время (сплошное покрытие отсутствует).

Изменения растительного покрова внутри кальдеры и за ее бортом в юго-восточном секторе представляются наиболее молодыми. В этом направлении, вероятнее всего, происходило распространение продуктов последних извержений, произошедших на вулкане. Характер распространения смешанных лесов в юго-западном секторе вулкана предопределен отсутствием существенного воздействия вулканических процессов на растительность. В пределах сектора наблюдается значительное мозаичное заселение территории темнохвойными и лиственными породами. В меньшей степени воздействию вулканических процессов в последние тысячелетия подвергался растительный покров склонов северной экспозиции постройки вулкана. Увеличение ландшафтного разнообразия в результате воздействия вулканических процессов на растительность только повышает привлекательность вулкана Головнина как объекта для туристских путешествий.

Список источников

- Атлас Курильских островов. 2009. Под ред. Комедчикова Н.Н. и др., отв. ред.-карт. Федорова Е.Я. М., Дизайн. Информация. Картография; Владивосток, Феория, 516 с.
- Братков В.В., Заурбеков Ш.Ш., Мелкий В.А., Вазарханов А.А. 2021. Геоэкология. М., КНОРУС, 282 с.
- Братков В.В., Луговской А.М., Мелкий В.А., Верхотуров А.А. 2022. Метеорология и климатология. М., КНОРУС, 240 с.
- ВЕГА-Science: уникальный инструмент научного анализа данных спутниковых наблюдений (ИКИ РАН). Электронный ресурс. URL: <http://sci-vega.ru> (дата обращения 05.07.2022).
- Ландшафтная карта мира, разработанная в рамках проекта openstreetmap.org. Электронный ресурс. URL: http://retromap.ru/0420098_z13_43.857987,505.54404&leftwm=1 (дата обращения 05.07.2022).
- Малышева Н.В. 2018. Основы автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков лесов с использованием ГИС. М., МЭСХ, 136 с.
- Подробная карта мира – v.2 (до 1:50K) 1980-х годов. Электронный ресурс. URL: http://retromap.ru/161985_43.855697,145.51219 (дата обращения 05.07.2022).
- BestMaps.ru. URL: <https://bestmaps.ru/map/esri/sat/15/43.8641/145.5033> (accessed: 05.07.2022).
- EarthExplorer. United States Geological Survey (USGS). Electronic resource. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (accessed: 05.07.2022).
- Global Forest Watch. Electronic resource. URL: <https://www.globalforestwatch.org/map/> (accessed: 05.07.2022).
- GoogleEarth. Electronic resource. URL: <https://earth.google.com/> (accessed: 05.07.2022).
- SRTM data. Consortium for Spatial Information CGIAR. 2004–2022. Electronic resource. URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/> (accessed: 05.07.2022).

Список литературы

- Алексеева Л.М. 1992. Мир растений. Южные Курильские острова. Южно-Сахалинск, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 259 с.
- Атаев З.В., Братков В.В., Гаджибеков М.И. 2018. Сезонная и многолетняя динамика полупустынных ландшафтов Северо-Западного Прикаспия (на примере можжевельного урочища «Буруны» Терско-Кумской низменности). Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 12(4): 34–48. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-4-34-48
- Белова Е.И., Ершов Д.В. 2019. Исследование возможности оценки возобновления лесной растительности после сплошных рубок по спутниковым данным LANDSAT (на примере Брянского Полесья). Вопросы лесной науки, 2(4): 1–20. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-20
- Болт Б.А., Хорн У.Л., Макдоналд Г.А., Скотт Р.Ф. 1978. Геологические стихии. Пер. с англ. Б.А. Борисова. Под ред. Н.В. Шебакина. М., Мир, 440 с.
- Братков В.В., Атаев З.В. 2017. Оценка влияния современных климатических условий на природно-территориальные комплексы северо-восточного Кавказа (по материалам дистанционного зондирования Земли). Мониторинг. Наука и технологии, 2(31): 6–14.



- Вацерионова Е.О., Копанина А.В., Власова И.И. 2021. Структура коры однолетнего стебля *Spiraea beauverdiana* (Rosaceae) в условиях сольфатарных полей вулкана кальдеры Головнина (остров Кунашир, южные Курильские острова). Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН, 25: 1–15. DOI: 10.17581/bbgi2501
- Верхотуров А.А. 2020. Анализ изменений состояния экосистем на острове Атласова (Курильские острова). Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий), 25(3): 139–150. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150
- Ганзей К.С. 2015. Сценарии изменения ландшафтного разнообразия островов под воздействием вулканизма. Доклады академии наук, 461(3): 338–342. DOI: 10.7868/S0869565215090182
- Горшков Г.С. 1967. Вулканизм Курильской островной дуги. М., Наука, 287 с.
- Гришин С.Ю. 2019. Основные тенденции динамики растительности на территории, испытавшей воздействие катастрофического извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (Камчатка). Известия Русского географического общества, 151(5): 32–47. DOI: 10.31857/S0869607121050049
- Гришин С.Ю., Перепелкина П.А., Бурдуковский М.Л., Лазарев А.Г. 2021. Пеплопад вулкана Шивелуч (Камчатка) 29 августа 2019 г. и его воздействие на растительность. Известия Русского географического общества, 153(5): 34–47. DOI: 10.31857/S0869607121050049
- Гусев А.П. 2022. NDVI как индикатор климатогенных реакций геосистем (на примере юго-востока Беларуси). Региональные геосистемы, 46(2): 200–209. DOI 10.52575/27127443-2022-46-2-200-209
- Жарков Р.В. 2014. Термальные источники Южных Курильских островов. Владивосток, Дальнаука, 378 с.
- Жарков Р.В., Козлов Д.Н. 2016. Современная поствулканическая активность в кальдере Головнина (о. Кунашир, Курильские о-ва). Мониторинг. Наука и технологии, 1(26): 12–18.
- Зуев В.В., Короткова Е.М., Павлинский А.В. 2019. Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982–2015 гг. по данным спутниковых наблюдений. Исследование Земли из космоса, 6: 66–76. DOI: 10.31857/S020596142019666-76
- Казаков А.И., Веселов О.В., Козлов Д.Н. 2021. Статистический анализ распределения продуктов фреатического извержения в кальдере вулкана Головнина (о. Кунашир, Курильские острова). Геосистемы переходных зон, 5(1): 14–26. DOI: 10.30730/gtrz.2021.5.1.014-026
- Корзников К.А., Кислов Д.Е., Крестов П.В. 2019. Моделирование биоклиматического ареала крупнотравных сообществ северо-восточной Азии. Экология, 3: 196–204. DOI: 10.1134/S0367059719030090
- Мархинин Е.К. 1959. Вулканы острова Кунашир. Труды лаборатории вулканологии АН СССР, 17: 64–110.
- Мелкий В.А. 2010. Петрогенезис железо-титан-оксидных минералов в вулканических комплексах Большой Курильской гряды. Южно-Сахалинск, СахГУ, 144 с.
- 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. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 65(2): 184–193. DOI: 10.30533/0536-101X-2021-65-2-184-193
- Мелкий В.А., Верхотуров А.А., Братков В.В. 2020а. Влияние климата на состояние северной части елово-пихтовой подзоны темнохвойных бореальных лесов острова Сахалин. Региональные геосистемы, 44(4): 415–431. DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-4-415-431
- Мелкий В.А., Братков В.В., Верхотуров А.А., Долгополов Д.В. 2020б. Динамика вулканогенных ландшафтов острова Кунашир (Курильские острова). Мониторинг. Наука и технологии, 2(44): 31–41. DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2020.44.005>
- Нешатаева В.Ю., Якубов В.В., Кузьмина Е.Ю., Потемкин А.Д., Кириченко В.Е. 2021. Очерк флоры и растительности окрестностей термальных источников побережья лагуны Тинтикун (Олюторский залив Берингова моря). Ботанический журнал, 106(12): 1204–1226. DOI: 10.31857/S0006813621120061
- Новейший и современный вулканизм на территории России. 2005. Лаверов Н.П., Добрецов Н.Л., Богатилов О.А., Бондур В.Г. и др. / Отв. ред. Н.П. Лаверов. М., Наука, 604 с.
- Разжигаета Н.Г., Гребенникова Т.А., Базарова В.Д., Сулержицкий Л.Д., Мохова Л.М., Ганзей Л.А., Пушкар В.С., Чернов А.В. 2000. Континентальный поздний плейстоцен о. Кунашир (Курильские острова). Тихоокеанская геология, 19(2): 73–86.

- Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Гурьянов В.Б. 2017. Вулканическая активность на Курильских островах в XXI в. Вестник Дальневосточного отделения Российской Академии Наук, 1(191): 51–61.
- Терехин Э.А. 2020. Многолетняя динамика спектрально-отражательных свойств участков лесовосстановления в лесах юга Среднерусской возвышенности. Региональные геосистемы, 44(2): 210–220. DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-2-210-220
- Ховратович Т.С., Барталев С.А., Кашницкий А.Б. 2019. Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 16(4): 102–110. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110
- Шарый П.А., Шарая Л.С., Сидякина Л.В. 2020. Связь NDVI лесов и характеристик климата Волжского бассейна. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 17(4): 154–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163
- Belousov A., Belousova M., Kozlov D. 2017. Strong Hydrothermal Eruption 600 BP Inside Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kurile arc. In: 19th EGU General Assembly, EGU 2017: Proceedings from the conference held 23–28 April 2017, Vienna, Austria: 7596.
- Biass S., Bonadonna C., Houghton B.F. 2019. A Step-by-Step Evaluation of Empirical Methods to Quantify Eruption Source Parameters from Tephra-Fall Deposits. Journal of Applied Volcanology, 8, 1. DOI: 10.1186/s13617-018-0081-1
- Boyte S., Wylie B., Rigge M., Dahal D. 2017. Fusing MODIS with Landsat-8 Data to Downscale Weekly Normalized Difference Vegetation Index Estimates for Central Great Basin Rangelands, USA. GIScience and Remote Sensing, 55(3): 376–399. DOI: 10.1080/15481603.2017.1382065
- Byer S., Jin Y. 2017. Detecting Drought-Induced Tree Mortality in Sierra Nevada Forests with Time Series of Satellite Data. Remote Sensing, 9: 14–17. DOI: 10.3390/rs9090929
- Farr T.G., Kobrick M. 2011. Shuttle Radar Topography Mission Produces a Wealth of Data. Eos, Transactions American Geophysical Union, 81(48): 583–585. DOI: 10.1029/EO081i048p00583.
- Fassnacht F.E., Schiller C., Kattenborn T., Zhao X., Qu J.A. 2019. Landsat-Based Vegetation Trend Product of the Tibetan Plateau for the Time-Period 1990–2018. Scientific Data, 6(78): 1–11. DOI: 10.1038/s41597-019-0075-9
- Hart E., Sim K., Kamimura K., Meredieu C., Guyon D., Gardiner B. 2019. Use of Machine Learning Techniques to Model Wind Damage to Forests. Agricultural and Forest Meteorology, 265: 16–29. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.10.022
- Heck E., de Beurs K.M., Owsley B.C., Henebry G.M. 2019. Evaluation of the MODIS Collections 5 and 6 for Change Analysis of Vegetation and Land Surface Temperature Dynamics in North and South America. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 156: 121–134. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.07.011
- Hermosilla T., Wulder M., White J., Coops N., Hobart G. 2018. Disturbance-Informed Annual Land Cover Classification Maps of Canada's Forested Ecosystems for a 29-Year Landsat Time Series. Canadian Journal of Remote Sensing, 44(1): 67–87. DOI: 10.1080/07038992.2018.1437719
- Jin Y., Liu X., Chen Y., Liang X. 2018. Land-Cover Mapping Using Random Forest Classification and Incorporating NDVI Time-Series and Texture: a Case Study of Central Shandong. International Journal of Remote Sensing, 39(23): 1–21. DOI: 10.1080/01431161.2018.1490976
- Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Chudaev O.V., Shand P., Funikova V.V. 2020. Major and Trace Element Geochemistry of CO₂-Rich Groundwater in the Volcanic Aquifer System of the Eastern Sikhote-Alin (Russia). Environmental Earth Sciences, 79: 55. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8697-y>
- Mancino G., Ferrara A., Padula A., Nolè A. 2020. Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment. Remote Sensing, 12(2): 291. DOI: 10.3390/rs12020291
- Maxwell A.E., Warner T.A., Fang F. 2018. Implementation of Machine-Learning Classification in Remote Sensing: An Applied Review. International Journal of Remote Sensing, 39(9): 2784–2817. DOI: 10.1080/01431161.2018.1433343
- Nghiem V.T., Nguyen M.N., Tran V.A., Do T.P.T. 2018. Study Method for Testing Image Quality of Optical Remote Sensing Satellite of Vietnam. Journal of Applied Mathematics and Computation, 2(9): 357–365. DOI: 10.26855/jamc.2018.09.001



- Nguyen M.N., Tran V.A., Nghiem V.T., Do T.P.T. 2018. Method of quality validation for Vietnam's optical remote sensing based on test sites (polygon). Processing Vietnamese National Science and Technology Conference Surveying and Mapping, 5 October 2018 Hanoi, Vietnam: 401–409
- Shvartsev S.L., Tokarenko O.G., Zippa E.V., Sun Z., Gao B., Borzenko S.V. 2018. Geochemistry of the Thermal Waters in Jiangxi Province, China. *Applied Geochemistry*, 96: 113–130. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.06.010
- Siebert L., Simkin T., Kimberly P. 2011. *Volcanoes of the World*. 3rd edn. Smithsonian Institution, Washington DC. University of California, Berkeley, 551 p.
- Sun C., Fagherazzi S., Liu Y. 2018. Classification Mapping of Salt Marsh Vegetation by Flexible Monthly NDVI Time-Series Using Landsat Imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 213: 61–80. DOI: 10.1016/j.ecss.2018.08.007
- Suvanto S., Peltoniemi M., Tuominen S., Strandström M., Lehtonen A. 2019. High-Resolution Mapping of Forest Vulnerability to Wind for Disturbance-Aware Forestry. *Forest Ecology and Management*, 453: 117619. DOI: 10.1101/666305
- Takaku J., Tadono T., Tsutsui K., Ichikawa M. 2018. Quality Improvements of 'AW3D' Global DSM Derived from Alos Prism. In: *IGARSS 2018 – 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 04 November 2018, Spain, Valencia: 1612–1615. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518360
- 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. *Journal Mountain Science*, 15: 1851–1867. DOI: 10.1007/s11629-018-4869-6
- Ukrainskiy P., Terekhin E., Lisetskii F., Zelenskaya E., Gusarov A. 2020. The Influence of Relief on the Density of Light-Forest Trees within the Small-Dry-Valley Network of Uplands in the Forest-Steppe Zone of Eastern Europe. *Geosciences (Switzerland)*, 10(11): 1–18. DOI: 10.3390/geosciences10110420
- Xu H., Qi S., Gong P., Liu C., Wang J. 2018. Long-Term Monitoring of Citrus Orchard Dynamics Using Time-Series Landsat Data: a Case Study in Southern China. *International Journal of Remote Sensing*, 39(22): 8271–8292. DOI: 10.1080/01431161.2018.1483088
- Zanter K. 2018. *Landsat 8 Surface Reflectance Code (LASRC) Product Guide*. Department of the Interior U.S.: 34 p.

References

- Alekseeva L.M. 1992. *Mir rasteniy. Yuzhnyye Kuril'skiye ostrova* [World of plants. Southern Kuril Islands]. Yuzhno-Sakhalinsk, Publ. Institut morskoy geologii i geofiziki DVO RAN, 259 p.
- Atayev Z.V., Bratkov V.V., Gadzhibekov M.I. 2018. Seasonal and Long-Term Dynamics of the Northwest Pre-Caspian Semi-Desert Landscapes (Exemplified by Juniper Tract "Buruny" of the Terek-Kuma Lowland). *Dagestan State Pedagogical University. Journal. Natural and Exact Sciences*, 12(4): 34–48 (in Russian). DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12 -4-34-48
- Belova E.I., Ershov D.V. 2019. Using LANDSAT Time Series for Assessing Reforestation on Clear Cuts in Bryansk Region. *Forest Science Issues*, 2(4): 1–20 (in Russian). DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-4-1-20
- Bolt B.A., Horn W.L., McDonald G.A., Scott R.F. 1978. *Geologicheskiye stikhii* [Geological Hazards]. Transl. from English. B.A. Borisov. Ed. N.V. Shebalin. Moscow, Publ. Mir, 440 p.
- Bratkov V.V., Ataev Z.V. 2017. Evaluation of the Influence of Current Climatic Conditions on the Natural Territorial Complexes of the North-Eastern Caucasus (Based on the Earth's Remote Sensing Data). *Monitoring. Science and Technologies*, 2(31): 6–14 (in Russian).
- Vatserionova E.O., Kopanina A.V., Vlasova I.I. 2021. The Structure of the Bark of the Annual Stem of *Spiraea Beauverdiana* (Rosaceae) in the Conditions of the Solfatar Fields of the Golovnin Volcano's Caldera (Kunashir, South Kuril Islands). *Byulleten' Botanicheskogo sada-instituta DVO RAN*, 25: 1–15 (in Russian). DOI: 10.17581/bbgi2501
- Verkhoturov A.A. 2020. Analysis of Changes in the State of Ecosystems on Atlasov Island (Kuril Islands). *Vestnik of SGUGT (Siberian State University of Geo-Systems and Technologies)*, 25(3), 139–150 (in Russian). DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150
- Ganzey K.S. 2015. *Stsenarii izmeneniya landshaftnogo raznoobraziya ostrovov pod vozdeystviyem vulkanizma* [Scenarios of Changes in the Landscape Diversity of the Islands Under the Influence of Volcanism]. *Doklady akademii nauk*, 461 (3): 338–342. DOI: 10.7868/S0869565215090182

- Gorshkov G.S. 1967. Vulkanizm Kurilskoy ostrovnoy dugi [Volcanism of the Kurile island arc]. Moscow, Publ. Nauka, 287 p.
- Grishin S.Yu. 2019. The Main Trends in the Dynamics of Vegetation in the Territory Affected by the Catastrophic Eruption of Bezmyanny Volcano on March 30, 1956 (Kamchatka). Proceedings of the Russian Geographical Society, 151(5): 32–47 (in Russian). DOI: 10.31857/S0869-6071151532-47
- Grishin S.Yu., Perepelkina P.A., Burdukovsky M.L., Lazarev A.G. 2021. Ashfall of Shiveluch Volcano (Kamchatka) on August 29, 2019 and Its Impact on Vegetation. Proceedings of the Russian Geographical Society, 153(5): 34–47 (in Russian). DOI: 10.31857/S0869607121050049
- Gusev A.P. 2022. NDVI as an Indicator of Climatogenic Responses of Geosystems (on the Example of the South-East of Belarus). Regional Geosystems, 46(2): 200–209 (in Russian). DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-200-209
- Zharkov R.V. 2014. Termalnyye istochniki Yuzhnykh Kurilskikh ostrovov [Thermal springs of the South Kuril Islands]. Vladivostok, Publ. Dalnauka: 378 p.
- Zharkov R.V., Kozlov D.N. 2016. Modern Post-Volcanic Activity in the Golovnin Caldera (Kunashir Island, Kuril Islands). Monitoring. Science and Technology, 1(26): 12–18 (in Russian).
- Zuev V.V., Korotkova E.M., Pavlinskiy A.V. 2019. Climate-Related Changes in the Vegetation Cover of the Taiga and Tundra of Western Siberia in 1982–2015 According to Satellite Observations. Earth Observation and Remote Sensing, 6: 66–76 (in Russian). DOI: 10.31857/S0205-96142019666-76
- Kazakov A.I., Veselov O.V., Kozlov D.N. 2021. Statistical Analysis of the Distribution of Phreatic Eruption Products in the Caldera of the Golovnin Volcano (Kunashir Island, Kuril Islands). Geosystems of Transition Zones, 5(1): 14–26 (in Russian). DOI: 10.30730/gtr.2021.5.1.014-026
- Korznikov K.A., Kislov D.E., Krestov P.V. 2019. Modeling the Bioclimatic Range of Tall Herb Communities in Northeastern Asia. Russian Journal of Ecology, 50(3): 241–248. DOI: 10.1134/S1067413619030093
- Markhinin E.K. 1959. Vulkany ostrova Kunashir [Volcanoes of Kunashir Island]. Trudy laboratorii vulkanologii AN SSSR, 17: 64–110.
- Melkiy V.A. 2010. Petrogenesis zhelezo-titan-oksidnykh mineralov v vulkanicheskikh kompleksakh Bolshoy Kurilskoy gryady [Petrogenesis of iron-titanium oxide minerals in the volcanic complexes of the Greater Kuril Ridge]. Yuzhno-Sakhalinsk, Publ. SakhGU, 144 p.
- Melkiy V.A., Verkhoturov 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. Geodesy and Aerial Photography, 65(2): 184–193 (in Russian). DOI: 10.30533/0536-101X-2021-65-2-184-193
- Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Bratkov V.V. 2020a. Climate Influence on the State of the Northern Part of the Spruce-Fir Subzone of the Dark Coniferous Boreal Forests of Sakhalin Island. Regional Geosystems, 44(4): 415–431 (in Russian). DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-4-415-431
- Melkiy V.A., Bratkov V.V., Verkhoturov A.A., Dolgoplov D.V. 2020b. Dynamics of Volcanogenic Landscapes of Kunashir Island (Kuril Islands). Monitoring. Science and Technology, 2(44): 31–41 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2020.44.005>
- Neshataeva V.Yu., Yakubov V.V., Kuzmina E.Yu., Potemkin A.D., Kirichenko V.E. 2021. Outline of Flora and Vegetation of the Tintikun Lagoon Hot Springs (Olutorsky Bay of Bering Sea). Botanical Journal, 106(12): 1204–1226 (in Russian). DOI: 10.31857/S0006813621120061
- Modern and Holocene Volcanism in Russia. 2005. Laverov N.P., Dobretsov N.L., Bogatkov O.A., Bondur V.G. et al. Ed. by N.P. Laverov. Moscow, Publ. Nauka, 604 p. (in Russian).
- Razjigaeva N.G., Grebennikova T.A., Bazarova V.D., Sulerzhitsky L.D., Mokhova L.M., Ganzeiy L.A., Pushkar V.S., Chernov A.V. 2000. Terrestrial Late Pleistocene deposits of the Kunashiri Islands, Kurile Islands. Geology of the Pacific Ocean, 19(2): 73–86 (in Russian).
- Rybin A.V., Chibisova M.V., Degterev A.V., Guryanov V.B. 2017. Volcanic Eruptions in the Kuril Islands During XXI Century. Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 1(191): 51–61 (in Russian).
- Terekhin E.A. 2020. Spectral Response Dynamics of the Reforestation Sites in Forests of the South of Central Russian Upland. Regional Geosystems, 44(2): 210–220 (in Russian). DOI 10.18413/27127443-2020-44-2-210-220
- Khovratovich T.S., Bartalev S.A., Kashnitsky A.B. 2019. Forest Change Detection Based on Sub-Pixel Estimation of Crown Cover Density Using Bitemporal Satellite Data. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 16(4): 102–110 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110



- Shary P.A., Sharaya L.S., Sidiyakina L.V. 2020. The Relation of Forest NDVI to Climate in Volga Basin. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 17(4): 154–163 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-154-163
- Belousov A., Belousova M., Kozlov D. 2017. Strong Hydrothermal Eruption 600 BP Inside Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kurile arc. In: 19th EGU General Assembly, EGU 2017: Proceedings from the conference held 23–28 April 2017, Vienna, Austria: 7596.
- Biass S., Bonadonna C., Houghton B.F. 2019. A Step-by-Step Evaluation of Empirical Methods to Quantify Eruption Source Parameters from Tephra-Fall Deposits. Journal of Applied Volcanology, 8, 1. DOI: 10.1186/s13617-018-0081-1
- Boyte S., Wylie B., Rigge M., Dahal D. 2017. Fusing MODIS with Landsat-8 Data to Downscale Weekly Normalized Difference Vegetation Index Estimates for Central Great Basin Rangelands, USA. GIScience and Remote Sensing, 55(3): 376–399. DOI: 10.1080/15481603.2017.1382065
- Byer S., Jin Y. 2017. Detecting Drought-Induced Tree Mortality in Sierra Nevada Forests with Time Series of Satellite Data. Remote Sensing, 9: 14–17. DOI: 10.3390/rs9090929
- Farr T.G., Kobrick M. 2011. Shuttle Radar Topography Mission Produces a Wealth of Data. Eos, Transactions American Geophysical Union, 81(48): 583–585. DOI: 10.1029/EO081i048p00583
- Fassnacht F.E., Schiller C., Kattenborn T., Zhao X., Qu J.A. 2019. Landsat-Based Vegetation Trend Product of the Tibetan Plateau for the Time-Period 1990–2018. Scientific Data, 6(78): 1–11. DOI: 10.1038/s41597-019-0075-9
- Hart E., Sim K., Kamimura K., Meredieu C., Guyon D., Gardiner B. 2019. Use of Machine Learning Techniques to Model Wind Damage to Forests. Agricultural and Forest Meteorology, 265: 16–29. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.10.022
- Heck E., de Beurs K.M., Owsley B.C., Henebry G.M. 2019. Evaluation of the MODIS Collections 5 and 6 for Change Analysis of Vegetation and Land Surface Temperature Dynamics in North and South America. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 156: 121–134. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.07.011
- Hermosilla T., Wulder M., White J., Coops N., Hobart G. 2018. Disturbance-Informed Annual Land Cover Classification Maps of Canada's Forested Ecosystems for a 29-Year Landsat Time Series. Canadian Journal of Remote Sensing, 44(1): 67–87. DOI: 10.1080/07038992.2018.1437719
- Jin Y., Liu X., Chen Y., Liang X. 2018. Land-Cover Mapping Using Random Forest Classification and Incorporating NDVI Time-Series and Texture: a Case Study of Central Shandong. International Journal of Remote Sensing, 39(23): 1–21. DOI: 10.1080/01431161.2018.1490976
- Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Chudaev O.V., Shand P., Funikova V.V. 2020. Major and Trace Element Geochemistry of CO₂-Rich Groundwater in the Volcanic Aquifer System of the Eastern Sikhote-Alin (Russia). Environmental Earth Sciences, 79: 55. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8697-y>
- Mancino G., Ferrara A., Padula A., Nolè A. 2020. Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment. Remote Sensing, 12(2): 291. DOI: 10.3390/rs12020291
- Maxwell A.E., Warner T.A., Fang F. 2018. Implementation of Machine-Learning Classification in Remote Sensing: An Applied Review. International Journal of Remote Sensing, 39(9): 2784–2817. DOI: 10.1080/01431161.2018.1433343
- Nghiem V.T., Nguyen M.N., Tran V.A., Do T.P.T. 2018. Study Method for Testing Image Quality of Optical Remote Sensing Satellite of Vietnam. Journal of Applied Mathematics and Computation, 2(9): 357–365. DOI: 10.26855/jamc.2018.09.001
- Nguyen M.N., Tran V.A., Nghiem V.T., Do T.P.T. 2018. Method of quality validation for Vietnam's optical remote sensing based on test sites (polygon). Processing Vietnamese National Science and Technology Conference Surveying and Mapping, 5 October 2018 Hanoi, Vietnam: 401–409.
- Shvartsev S.L., Tokarenko O.G., Zippa E.V., Sun Z., Gao B., Borzenko S.V. 2018. Geochemistry of the Thermal Waters in Jiangxi Province, China. Applied Geochemistry, 96: 113–130. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.06.010
- Siebert L., Simkin T., Kimberly P. 2011. Volcanoes of the World. 3rd edn. Smithsonian Institution, Washington DC. University of California, Berkeley, 551 p.

- Sun C., Fagherazzi S., Liu Y. 2018. Classification Mapping of Salt Marsh Vegetation by Flexible Monthly NDVI Time-Series Using Landsat Imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 213: 61–80. DOI: 10.1016/j.ecss.2018.08.007
- Suvanto S., Peltoniemi M., Tuominen S., Strandström M., Lehtonen A. 2019. High-Resolution Mapping of Forest Vulnerability to Wind for Disturbance-Aware Forestry. *Forest Ecology and Management*, 453: 117619. DOI: 10.1016/666305.
- Takaku J., Tadono T., Tsutsui K., Ichikawa M. 2018. Quality Improvements of ‘AW3D’ Global DSM Derived from Alos Prism. In: *IGARSS 2018 – 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 04 November 2018, Spain, Valencia: 1612–1615. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518360.
- 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. *Journal Mountain Science*, 15: 1851–1867. DOI: 10.1007/s11629-018-4869-6.
- Ukrainskiy P., Terekhin E., Lisetskii F., Zelenskaya E., Gusarov A. 2020. The Influence of Relief on the Density of Light-Forest Trees within the Small-Dry-Valley Network of Uplands in the Forest-Steppe Zone of Eastern Europe. *Geosciences (Switzerland)*, 10(11): 1–18. DOI: 10.3390/geosciences10110420.
- Xu H., Qi S., Gong P., Liu C., Wang J. 2018. Long-Term Monitoring of Citrus Orchard Dynamics Using Time-Series Landsat Data: a Case Study in Southern China. *International Journal of Remote Sensing*, 39 (22): 8271–8292. DOI: 10.1080/01431161.2018.1483088.
- Zanter K. 2018. Landsat 8 Surface Reflectance Code (LASRC) Product Guide. Department of the Interior U.S.: 34 p.

*Поступила в редакцию 22.08.2022;
поступила после рецензирования 19.09.2022;
принята к публикации 27.09.2022*

*Received August 22, 2022;
Revised September 19, 2022;
Accepted September 27, 2022*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Верхотуров Алексей Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра коллективного пользования, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav A. Melkiy, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the laboratory of Volcanology and volcanic hazard of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Alexey A. Verkhoturov, Ph.D. Technical Sciences, Senior Researcher of Center for collective use, Institute of marine Geology and Geophysics of the FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia