



# Определение дешифровочных признаков проявлений эффузивной вулканической деятельности для выявления ее воздействия на территории

**В.А. Мелкий<sup>1</sup>✉, А.А. Верхотуров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия  
✉ vamelkiy@mail.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Определение дешифровочных признаков проявлений эффузивной вулканической деятельности для выявления ее воздействия на территории // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 2. С. 93–107. DOI:10.30533/GiA-2025-016.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** эффузивный вулканизм, дистанционное зондирование, дешифрирование космических снимков, риск, геоинформационное картографирование

**АННОТАЦИЯ** Цель работы — выявление характерных для лавовых потоков базальтового и андезитобазальтового состава дешифровочных признаков проявлений эффузивной деятельности вулканов. В статье приведены данные исследования распространения вулканогенных отложений на территории, прилегающей к эруптивному центру. Эффузивная деятельность характерна для вулканов, магматический расплав которых имеет базальтовый или андезитобазальтовый состав. Тип эффузивных извержений зависит от газонасыщенности магмы: более вязкий, насыщенный оксидом кремнезема расплав взрывается сильнее. Относительно спокойное истечение жидкой базальтовой магмы через край кратера свойственно гавайскому и трещинному типам извержений. С увеличением кремнекислотности магмы взрывной разброс происходит с большей силой, на поверхности потоков образуются конусы. Извержения андезитобазальтовой магмы чаще всего могут быть отнесены к стромболианскому типу, при котором вулкан периодически выбрасывает бомбы, лапилли и пеплы песчаной и более мелких размерностей. Для работы использовались материалы полевых исследований, космические снимки низкого и среднего пространственного разрешения, полученные при съемках со спутников Landsat, «Канопус», Sentinel, данные цифровой аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов. Аэрокосмические снимки позволили достаточно точно проанализировать изменения в состоянии поверхностей лавовых потоков различного состава. В результате дешифрирования проявлений вулканической деятельности эффузивного

типа создан классификатор дешифровочных признаков этих проявлений и выработаны критерии их формализации для автоматизированного дешифрирования. Определение проявлений деятельности, характерной для того или иного вулкана, позволяет отнести его очаги к типу М (мантийному) или К (коровому), установить тектоническое положение постройки и геодинамический режим, которыми определяется опасность эффузивных и эксплозивных извержений. Более детальные исследования требуют применения беспилотных летательных аппаратов. Результаты дешифрирования аэрокосмических снимков, отражающих проявления эффузивной деятельности вулканов, позволили определить основные дешифровочные признаки этих проявлений и выявить критерии их формализации для дальнейшей автоматизации процесса их распознавания, определения уровня вулканопасности и планирования землепользования.

## 1 Введение

В процессе полевых исследований эффузивной деятельности ряда вулканов Курильских островов и Камчатки были накоплены материалы о проявлениях, наиболее характерных для поверхностей изливающихся лавовых потоков. Анализ состояния поверхностей, а также данные, полученные при наблюдениях другими исследователями эффузивных извержений различных вулканов Земли, позволил составить относительно ясную картину внешнего облика проявлений, свойственных поверхности лавовых потоков определенного петрохимического состава, характерных для вулканов типов К (корового) или М (мантийного), зависящих от геодинамического режима тектонической структуры, глубинности и масштабности очагов<sup>1,2</sup>.

Характеру проявлений эффузивной деятельности вулканов посвящено большое количество работ<sup>3,4</sup> [1, 2]. Основная опасность от эффузивной вулканической деятельности — покрытие территории лавовыми потоками. За последнюю тысячу лет распространение потоков лавы на любом квадратном километре поверхности Земли происходит в среднем один раз в 720 лет<sup>5</sup>. Вероятность этого возрастает с приближением территории к рифтовым зонам и островодужным системам, где лавовые потоки представляют угрозу как для жизни, так и для имущества людей.

## 2 Материалы и методы

В качестве материала для выполнения оценочных работ послужили доступные снимки с космических аппаратов Landsat и Sentinel-2, различающиеся техническими характеристиками, в том числе различным набором каналов

- 
- 1 Сывороткин В.Л., Русинова С.В., Дриль С.И. Роль геодинамического режима в формировании четвертичных вулканитов Курильской островной дуги // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 1990. № 5. С. 91–96.
  - 2 Melkiy V.A., Osipenko A.B., Rostovtseva Yu.V. A Model of the Earth's Crust Evolution in the Pacific-Type Island Arcs Based on Study of the Fe-Ti-Oxides // Abstracts European Union of Geosciences (EUG 9). Strasbourg, France, 23–27 March 1997. Terra Nova. 1997. Vol. 9. P. 475.
  - 3 Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка) / отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 637 с.
  - 4 Певзнер М.М., Мелекесцев И.В., Волынец О.Н. и др. Южный Черпук и Северный Черпук — крупнейшие голоценовые моногенные вулканические формы Срединного хребта Камчатки (Россия) // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 22–32.
  - 5 Болт Б.А., Хорн У.Л., Макдоналд Г.А. и др. Геологические стихии / пер. с англ. М.: Мир, 1978. 439 с.

среднего пространственного разрешения систем, за период с 1980 по 2024 год, разномасштабные топографические карты, цифровая модель рельефа SRTM (англ. Shuttle Radar Topography Mission). Для работы использовались снимки среднего пространственного разрешения (10–100 м по ГОСТ Р 59478-2021), которые пригодны для создания моделей и картографических изображений масштабов 1 : 50 000 – 1 : 150 000. Разрешение этих изображений при условии хорошего качества и в отсутствие облаков позволяет определить характер поверхности лавовых потоков.

В настоящее время при исследованиях лавовых потоков все чаще применяются хорошо изученные методы аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов, которые предоставляют координатно- и высотно-привязанную информацию о состоянии поверхности с пространственным разрешением 0,02–0,07 м [3, 4].

Для анализа растровых изображений используется множество способов, позволяющих выявить текстурные особенности отдельных сегментов снимков [5]. В проведенном исследовании выполнялась подготовка космических снимков к обработке и дальнейшим преобразованиям посредством применения функционала ГИС: обработки растров, векторизации и определения пространственно-количественных показателей (рис. 1) [6].

Методологическая платформа моделирования любых процессов, протекающих в природно-техногенных системах, всегда базируется на знаниях предметной области изучаемых объектов. В настоящее время разработаны концепции, теоретические основы, технологические решения для геоинформационного обеспечения мониторинга застраиваемых земель [7], систем трубопроводного транспорта для совершенствования их безопасной эксплуатации [8], эффективного использования земельных ресурсов [9], экономически целесообразных способов сбора высокоточных данных [10]. Методология моделирования вулканической деятельности опирается на выявление признаков проявлений, свойственных извержениям разной энергетики, выраженных индексом эксплозивности (англ. Volcanic Explosivity Index, VEI) [11].

**Рис. 1** 

Технологическая схема подготовки и обработки материалов для ведения мониторинга территорий, подверженных воздействию эффузивных вулканов (по [6] с изменениями)

**Fig. 1**

Technological scheme of preparation and processing of materials for monitoring territories exposed to effusive volcanoes (according to [6] with changes)



## 3 Результаты и обсуждение

### 3.1 Эффузивная вулканическая деятельность и ее геодинамические условия

В рифтовых зонах линейные извержения происходят вдоль трещин, раскрывающихся во время сильных землетрясений, при этом изливаются горячие магматические расплавы ( $T \geq 1600$  °C) щелочно-базальтового состава. Океанический рифтовый вулканизм представлен исландским типом, хотя он распространен в основном не в подводных, а в наземных условиях. Лучше всего изучены исторические эффузивные линейные извержения в Исландии<sup>6,7</sup>.

Ярким проявлением эффузивной вулканической деятельности являются ареальные излияния лав. Ареальные эффузивные вулканические образования возникают в разломных зонах планетарного ранга и относятся к М-вулканам (мантийным). Как отмечает В.Л. Сывороткин, среди продуктов деятельности этих вулканов преобладают базальтоиды и андезитобазальты [12].

Эффузивный вулканизм также встречается в пределах океанических литосферных плит, где он образует отдельные острова или целые архипелаги в регионах с океанической литосферой. Наиболее изученным примером может служить цепь Гавайских островов в центральной части Тихого океана. Достаточно много действующих вулканов эффузивного типа располагается в стороне от рифтовых систем: в Атлантическом океане — острова Зеленого Мыса и Канарские, в Тихом — Галапагосские.

Заметную роль рифтогенез играет на ранних стадиях формирования островных дуг. Разломообразование сопровождается вертикальными смещениями по сбросам и надвигам, а также сдвигам. Системы разломов влияют на размещение хребтов слабого вулканизма эффузивного типа, который приводит к образованию лавовых плато<sup>8</sup>. В пределах Курильской островной дуги выделяется лавовое плато г. Фрегат на о. Кунашир. Вулканическая деятельность эффузивного типа проявляется также в континентальных рифтовых зонах. Крупноареальные базальтоидные ассоциации известны на севере Сибирской платформы и Главном поле траппов Декана.

Горячие потоки лавы, вышедшей из жерла, устремляются вниз по склонам, и на их поверхности образуется вязкая корка («кожа»), насыщенная газами ( $H_2S$ , CO,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$  и др.). Лава, текущая под «кожей», создает повышенное гидростатическое давление и время от времени разрывает корку, высоко приподнимая ее в виде сводов.

Активнейшей территорией на Земле, подверженной эффузивной вулканической деятельности, является остров Гавайи, состоящий из пяти слитых вместе крупных щитовых вулканов, в том числе Мауна-Лоа и Килауэа. Вулкан Мауна-Лоа (№ 332020<sup>9</sup>) представляет собой лавовый щит высотой до 4170 м, длиной 90 км и шириной 50 км, сложенный многочисленными лавовыми потоками мощностью в несколько метров. Вулкан проявляет активность в среднем каждые 3,5 года. Склоны его исключительно пологие. Центры извержений приурочены к местам пересечения главных систем продольных и поперечных разломов<sup>10</sup>.

6 Sapper K. Vulkankunde. Stuttgart: J. Engelhorn's Nachf., 1929. 300 p.

7 Thorarinsson S. The Lakigigar eruption of 1783 // Bulletin of Volcanology. 1969. Vol. 33. P. 910–921.

8 Сывороткин В.Л., Русинова С.В., Дриль С.И. Роль геодинамического режима в формировании четвертичных вулкаников Курильской островной дуги // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 1990. № 5. С. 91–96.

9 Siebert L., Simkin T., Kimberly P. Volcanoes of the World. 3rd ed. Berkeley: University of California Press, 2010. 568 p.

10 Mulliken K.M., Tilling R.I., Swanson D.A. Eruptions of Hawaiian Volcanoes – Past, Present, and Future / U.S. Geological Survey General Information Product 117. 2010. 67 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pubs.usgs.gov/gip/117/gip117.pdf> (дата обращения: 15.10.2024).

На вершине Мауна-Лоа расположен обширный кратер обрушения, периметр и глубина которого периодически изменяются. Наиболее крупное извержение было отмечено в 1950 году. Объем изверженной лавы был оценен в 450 млн м<sup>3</sup><sup>11</sup>.

Извержения базальтовой лавы из кратеров или чаще всего из раскрывшихся трещин отличаются относительно спокойным излиянием. Лава жидкая, подвижная, легко отдающая содержащиеся в ней газы. Крупные лавовые потоки наблюдались на вулкане Мауна-Лоа в 1880–1881 годах, когда поток прошел 48 км, а в 1859 году горячая лава из трещины прошла до берега моря, удаленного на 50 км<sup>12</sup>. Свободно текущий в начале излияния лавовый ручей очень быстро замедляет скорость с удалением от источника и покрывается вязкой коркой. Эта корка сминается, сдвигается текущей под ней лавой и застывает напоподобие тонкого покрова льда, под которым течет расплав.

Лавовые потоки даже на одном вулкане перемещаются с разной скоростью. На начальных стадиях извержения изливается наиболее горячая лава (типа пахо-эхэ), которая в дальнейшем, после выпадения некоторых минералов ранней высокотемпературной стадии кристаллизации, становится более кремнекислой, вязкой и хрупкой ('а'-лава)<sup>13</sup>. Скорость лавовых потоков может достигать 18 м/с. Поток Мауна-Лоа (о. Гавайи) в 1950 году достиг океана за 3 часа<sup>14</sup>. Расстояние, которое проходит лавовый поток, зависит от скорости и продолжительности извержения, наклона и вязкости потока (рис. 2<sup>15</sup>).

**Рис. 2** 

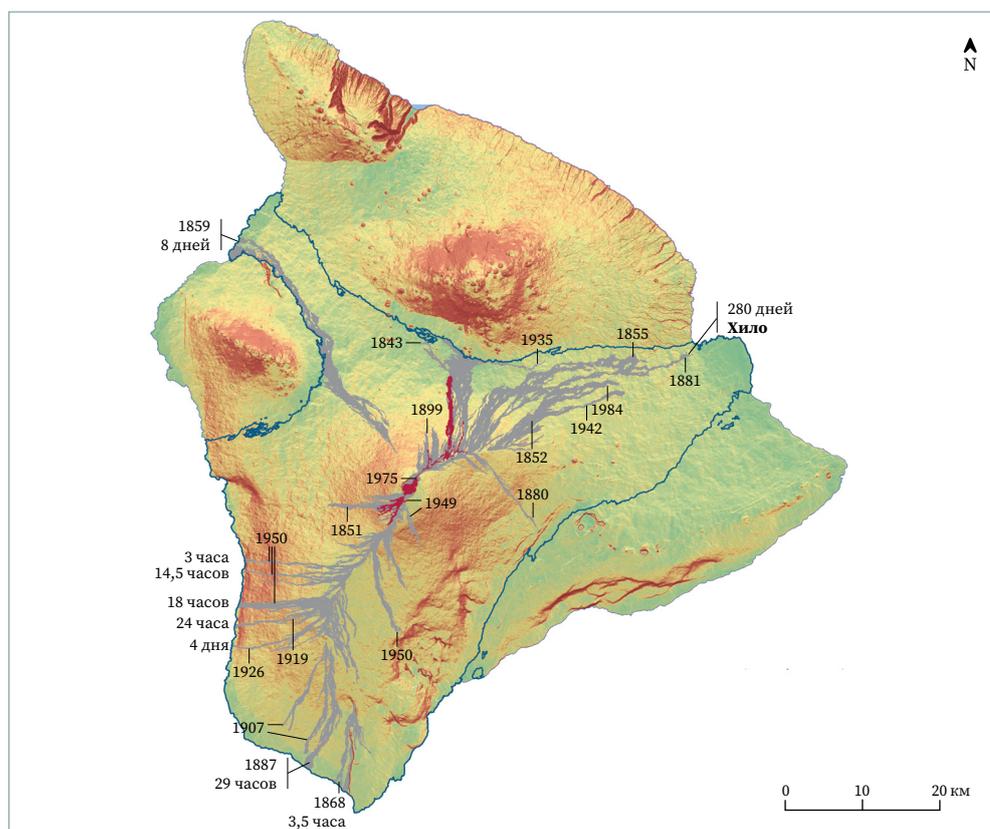
Схема времени прохождения лавовых потоков вулкана Мауна-Лоа с 1823 г. от трещины до берега океана (по данным сайта USGS с изменениями)

**Fig. 2**

Scheme of the passage time of lava flows from the Mauna Loa volcano after 1823 from crack to the ocean shore (by website USGS data with changes)

**Условные обозначения**

-  граница Мауна-Лоа
-  лавовые потоки
-  лавовые потоки 2012



- 11 Lockwood J.P., Lipman P.W. Holocene eruptive history of Mauna Loa volcano // *Volcanism in Hawaii* / Decker R.W., Wright T.L., Stauffer P.H. (eds.). Washington: USG Printing Office, 1987. P. 509–535.
- 12 Global Volcanism Program, 2023. Report on Mauna Loa (United States) / Bennis K.L., Venzke E. (eds.) // *Bulletin of the Global Volcanism Network*. Vol. 48. No. 1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://volcano.si.edu/showreport.cfm?doi=10.5479/si.GVP.BGVN202301-332020> (дата обращения: 15.10.2024).
- 13 Buchwaldt R. AA-Lava // Bobrowsky P.T. (ed). *Encyclopedia of Natural Hazards*. Dordrecht: Springer, 2013. P. 1.
- 14 Пичугина Т.Б. Метаморфозы лавы // *Вокруг света*. 2007. № 2. С. 6–14.
- 15 Slope map of Mauna Loa, including lava flows erupted since 1823 / USGS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.usgs.gov/media/images/map-post-1823-lava-flows-erupted-mauna-loa-gray-and-numbe> (дата обращения: 15.10.2024).

**Рис. 3** 

Лавовые поля вулкана Толбачик

**Fig. 3**

Lava fields of Tolbachik volcano



Наиболее известные примеры медленных эффузивных извержений отмечались на Везувии в периоды с 1891 по 1894 год и с 1895 по 1899 год<sup>16</sup>. Медленным извержениям предшествует энергичная деятельность с выбросами лавы, или терминальная эффузия. Из-за продолжающихся подземных толчков на склоне горы сверху вниз раскрывается трещина, открывающая новый выход лаве. Лава проникает в трещину и выходит на склоне горы на все более и более низких уровнях. Уровень лавы в жерле быстро опускается, а выбросы лавы (или эффузивная деятельность) в вершинном кратере прекращаются и переходят в сильные ритмичные выбросы парогазовой смеси.

Лава, обогащенная газом, дает преимущественно клинкерную неровную поверхность. Истечение лавы прекращается, нижняя часть трещины закрывается застывшей лавой. Уровень лавы в жерле снова начинает подниматься до тех пор, пока она снова не найдет выход в верхней части трещины. Так поэтапно снизу вверх закрывается трещина.

Извержения исландского типа наблюдались в ходе Большого Толбачинского трещинного извержения (БТТИ)<sup>17</sup>. Эффузивная деятельность начиналась с раскрытия трещины, вдоль которой из небольших кратеров били лавовые фонтаны, воздвигая невысокие конусы из шлаков и пепла. Эруптивная деятельность ограничивалась немногими кратерами, после чего начиналось истечение лавы. Подобного рода деятельность повторилась на вулкане Толбачик в 2012–2013 годах (рис. 3<sup>18</sup>).

В начале БТТИ на Северном прорыве наблюдалась трещина длиной до 300 м, в пределах которой действовали четыре жерла, выбрасывающие бомбы и шлаки. Лава впервые появилась в виде красного пятна размером 20×30 м. По данным С.А. Федотова, А.М. Чиркова, А.П. Хренова, на первом лавовом потоке Северного прорыва, когда фронт потока находился на расстоянии 3 км от конуса, эффективная вязкость составила  $1 \times 10^7$  Пз. Еще через сутки вязкость, измеренная по продвижению фронта потока, составила  $2 \times 10^7$  Пз.

### 3.2 Внешние проявления эффузивной деятельности и дешифровочные признаки

Эффузивная деятельность гавайского типа хорошо изучена на ранних стадиях БТТИ и извержения Толбачика в 2012–2013 годах. В результате эффузивных излияний формировались поверхности лавовых потоков, которые после застывания долгое время свидетельствуют о характере произошедших событий. Формы поверхности лавовых потоков в зависимости от вязкости и рода

16 Ритман А. Вулканы и их деятельность / пер. с нем. Л.Г. Кваша; под ред. и с предисл. В.И. Влодавца. М.: Мир, 1964. 437 с.

17 Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка) / отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 637 с.

18 Activity Slows at Tolbachik (Landsat 8, Сканиер OLI, September 9, 2013). Landsat Image Gallery. Режим доступа: [https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/82000/82066/klyuchevskaya\\_oli\\_2013252\\_lrg.jpg](https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/82000/82066/klyuchevskaya_oli_2013252_lrg.jpg) (дата обращения: 15.08.2024).

течения весьма различны. Образования на поверхности лавовых потоков, а также текстура рисунка отражают физические свойства лавы, которые зависят от химического состава. Преобладание характерных пластичных либо хрупких деформаций поверхностей позволяет выделить лавы пахоэхоэ (гладкие волнистые) и 'а'а (обломочные и шлаково-мелкоглыбовые). В случае излияния горячих потоков ( $T \geq 1100$  °С) с небольшой вязкостью ( $(1 \div 2) \times 10^4$  Пз) скорость течения на небольшом расстоянии от изливающих конусов постоянна, при этом образуется относительно ровная поверхность, которая позволяет считать лаву гладкой волнистой (рис. 4а)<sup>19</sup>. Поверхности потоков определяются условиями кристаллизации текущей жидкости: формируются нитчатые, игольчатые, кружевные структуры, которые застывают, когда лопаются газовые пузырьки.

При увеличении крутизны склона течение ускоряется, затвердевшая поверхностная масса, образовавшаяся вследствие остывания, разрывается на плоские глыбы и превращается в плоскую плитообразную корку с грубой, часто рубчатой поверхностью. Лава несет эти пластины за собой, иногда опрокидывая их. При этом поверхность подвержена преимущественно хрупким разрушениям и соответствует реологическим свойствам плоскоглыбовой или пластинчатой лавы (рис. 4б)<sup>20</sup>. Если под коркой потока скорость течения уменьшается, то глыбы в потоке образуют нагромождения и заторы.

Если движение замедляется еще до полного затвердения корки, то корка сдавливается в направлении течения и сминается. Только что образовавшиеся складки, особенно в середине потока, волочатся дальше и дугообразно

**Рис. 4** ⬇

Поверхности лавы в потоках различной температуры вязкости

**Fig. 4**

Lava surfaces in flows of different viscosity temperatures

Гладкая волнистая лава влк. Толбачик (фото Е.В. Касперского) / Smooth wavy lava of Tolbachik volcano (photo by E.V. Kaspersky)



Плоскоглыбовая плитчатая или пластинчатая лава вулкана Фаградальсфьядль, Исландия (фото Т. Грипачевска) / Flat-headed slab or plate lava of volcano Fagradalsfjall, Iceland (photo by T. Gripachevska)



Канатная лава на влк. Толбачик (фото А. Петруся) / Rope lava on Tolbachik volcano (photo by A. Petrus)



Глыбовая лава на влк. Мауна-Лоа (фото Мастерок.жж.рф) / Blocky lava on Mauna Loa volcano (Photo by masterok.livejournal.com)



19 Касперский Е.В. Толбачик. Сжечь все. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eugene.kaspersky.ru/2013/04/05/tolbachik-szhech-vsyo> (дата обращения: 15.08.2024).  
 20 Norén Anders. Has Iceland entered a new volcanic era? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://all-things-nordic.com/2023/07/27/has-iceland-entered-a-new-volcanic-era/> (дата обращения: 15.08.2024).

изгибаются. Так образуются известные канатные лавы. «Канаты» тем толще, чем больше вязкость «кожи» (рис. 4в)<sup>21</sup>.

Из вязких лав газы не могут выделиться так легко, и расплав до затвердевания остается относительно богатым газом. В этом случае возникают формы поверхности, которые обычно объединяют в понятие глыбовой лавы. Настоящая глыбовая лава образуется только в момент излияния вязких лав, которые быстро покрываются толстой коркой. Фронт потоков, затвердевая, растрескивается, и сквозь трещины выдавливается лава, застывая в причудливых формах в виде крупных глыб, лепешкообразных и шарообразных тел (рис. 4г)<sup>22,23</sup> [13]. Специфические формы базальтовых лавовых покровов, наблюдавшиеся в Толбачинском долу при БТТИ, обусловлены сложными реологическими свойствами магм. Такими формами, в частности, являются ступени лавовых потоков и пещеры в них<sup>24</sup>.

При снижении температуры из расплава выпадают оливины, пироксены, ульвешпинелиды: увеличивается вязкость лавы, возрастает способность к хрупким разрушениям, и, как следствие, ее можно отнести к типу 'а'. Различные условия течения лавовых потоков приводят к образованию разнообразных форм на их поверхности. Наблюдалось некоторое возрастание эффективной вязкости (в 2–3 раза) при уменьшении расхода: вблизи Второго конуса Северного прорыва Толбачика она составляла в среднем  $2 \times 10^6$  Пз<sup>25</sup>. При дальнейшем увеличении вязкости на поверхности лавовых потоков могут образовываться такие структуры течения, как складки сжатия, валы коробления, хребты сдавливания, трещины растяжения. Большое разнообразие поверхностей лавовых потоков наблюдалось на вулкане Кудрявый (о. Итуруп).

В лавах средней вязкости на поверхности образуются кучи шлаковых, округлых обломков, которые называют обломочной (шлаково-глыбовой) лавой, иногда даже глыбовой (рис. 4г)<sup>26</sup>. Крупноглыбовая отдельность потока наблюдалась на вулкане Безымянный. Наиболее крупные глыбы (до 10–15 м в поперечнике) приурочены к краевым частям потока, образуют бортовые валы андезитового потока, на несколько метров возвышающиеся над основной поверхностью, сложенной более мелкими обломками [14].

Нередко вдоль бортов потоков на поверхности прослеживается серия продольных волнообразных складок сжатия высотой до 0,5 м, сложенных полосами несортированных угловатых обломков с занозистой и шероховатой поверхностью. Образование таких складок связано с пульсационной подачей лавового материала из кратера. Хребты сдавливания обычно тянутся вдоль потоков на 25–30 м, каждый из них имеет ширину 5–8 м и возвышается над поверхностью потока на 7–12 м. Эти образования были более пологи в направлении движения потоков и возникали при сильном боковом давлении на движущийся поток вязкой лавы.

Если лавовые потоки, покрытые очень толстой шлаковой коркой, текут по уступам местности, то корка разламывается, в образовавшиеся поперечные трещины проникает еще текущая лава внутренней части потока и застывает в них в виде жилообразных лавовых клиньев. Большие валы коробления образуются в заключительную стадию застывания потоков благодаря

21 Петрусь А. Филиал Мордора. Лавовые поля Толбачика. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://mirputeshestvij.mediasole.ru/filial\\_mordora\\_lavovye\\_polya\\_tolbachika](https://mirputeshestvij.mediasole.ru/filial_mordora_lavovye_polya_tolbachika) (дата обращения: 15.08.2024).

22 Гавайские вулканы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://masterok.livejournal.com/105805.html> (дата обращения: 15.08.2024).

23 Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Вулкан Толбачик: гавайские извержения на Камчатке // Природа. 2013. Т. 10. № 1178. С. 59–67.

24 Андреев В.Н., Гусев Н.А., Ковалев Г.Н. и др. Динамика лавовых потоков Южного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. // Бюллетень вулканологических станций. 1978. № 55. С. 18–26.

25 Ванде-Кирков Ю.В. Вязкость лав Северного прорыва (вулкан Толбачик, 1975 г.) // Бюллетень вулканологических станций. 1978. № 55. С. 13–17.

26 Геологический словарь: в 2 т. / Х.А. Арсланов, М.Н. Голубчина, А.Д. Искандерова и др.; гл. ред. акад. К.Н. Паффенгольц (отв. ред.). М.: Недра, 1978. Т. 1. 486 с.

гидростатическому напору раскаленной лавы, текущей под затвердевшей поверхностной коркой. Именно поэтому к этим валам повсеместно были приурочены многочисленные фумаролы. Валу протягиваются на 20–150 м через всю ширину потока, располагаясь перпендикулярно к направлению его движения. Они представляли собой хаотические нагромождения глыб лавы с натечными шероховатыми поверхностями.

В тех случаях, когда корка толстая и лава уже вязкая, образуется плоскоглыбовый купол или же вытянутый плоскоглыбовый хребет. Внутри лавового потока вследствие неравномерного воздымания и частичного проседания отдельных участков кровли потока при условии меняющегося напора лавы, поступающей по трубам, может возникать сложная система ходов. Напор имеет чисто гидростатическую природу. Лавовые трубы и лавовые пещеры являются одной из главных особенностей лавовых потоков и покровов Толбачинского дола.

Особенности поверхностей лавовых потоков хорошо дешифрируются на аэро- и космических снимках. Поверхность лавовых потоков вулкана Мауна-Лоа на большем его протяжении отображается ровным серым тоном (табл. 1, строка 1). Значительных изменений в изображении поверхности гладких волнистых лав гавайских вулканов и подобных им потоков на вулканах Толбачик, Кудрявый и др. не наблюдалось. Изображение участков гладкой волнистой поверхности потоков имеет ровный светло-серый фототон, обусловленный отсутствием теней.

Шлаково-мелкоглыбовая лава хорошо дешифрируется на снимках (табл. 1, строка 2). Характерны зернистый рисунок изображения и более светлый фототон по сравнению с канатными лавами, что обусловлено меньшим количеством теней. Хорошо различимы поперечные трещины в лавовом потоке.

На снимках изображение поверхности лавовых потоков с плоскоглыбовой отдельностью можно охарактеризовать следующим образом (табл. 1, строка 3): пятна имеют различный фототон — от светло-серого до темно-серого. Плиты выделяются на общем фоне за счет наличия теней по периметру, преимущественно собственных.

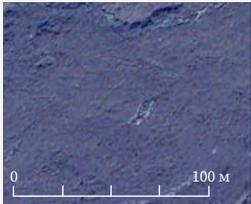
Для изображений канатных лав характерно чередование освещенных и затененных поверхностей волн лавы. Фототон от серого до темно-серого. Наблюдаются сегменты темных затененных полос в понижениях волн поверхности. В понижениях скапливаются тефра и золотый материал и со временем наблюдается заселение растительностью.

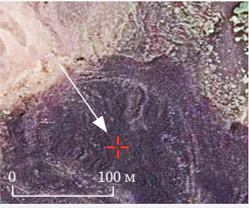
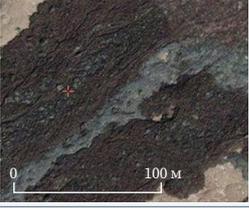
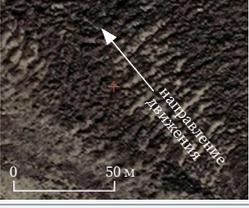
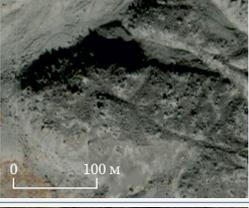
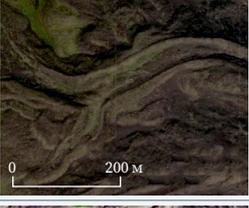
Поверхность крупноглыбовой лавы состоит из крупных обломков, на которые распался лавовый поток. Наблюдается большое количество глубоких продольных и поперечных трещин. Хорошо различаются крупные глыбы, которые выделяются по наличию теней — как падающих, так и собственных. Четко прослеживаются бортовые валы потока и проработанное русло, по которому прошла вторая порция излияния. На местах перегибов склонов, по которым стекают лавовые потоки, распознаются поперечные трещины, пересекающие лавовый поток. Иногда при разрывах «кожи» в местах прохождения выпуклых перегибов образуются выжимки.

Восстановление полной картины возможно при тщательном дешифрировании аэрофотоснимков. Хорошо видны различия поверхностей лавовых потоков, запечатленные в разнообразии структуры их изображения, которая появляется вследствие неравномерной освещенности разно ориентированных поверхностей глыб.

**Таблица 1**   
Дешифровочные признаки проявлений процесса эффузивного вулканизма

**Table 1**  
Decoding signs of trappings of the effusive volcanism process

Тип потока лавовых излияний		Характер поверхности	Дешифровочные признаки	Общий вид на снимках
1	Гладкая лава («лава-шоссе»)	Ровная поверхность с редкими разрывами (в основном поперек направления движения потока). Иногда наблюдаются небольшие повышения и понижения рельефа поверхности	Рисунок поверхности однотонный, ровный. Фототон изображения поверхности лавового потока варьирует от серого до черного	

Тип потока лавовых излияний	Характер поверхности	Дешифровочные признаки	Общий вид на снимках
2 <b>Шлаково-мелкоглыбовая или обломочная ('а'а) лава</b>	Поверхность покрыта шлаковыми округлыми обломками различной величины. Наблюдается большое количество бугров и трещин	Характерен зернистый рисунок поверхности и более светлый фототон, чем у канатных лав, за счет меньшего количества теней. Хорошо дешифрируются поперечные трещины в лавовом потоке	
3 <b>Плоскоглыбовая (или пластинчатая) лава</b>	Относительно ровная поверхность, разделенная на хаотично расположенные плоские плиты с грубой, часто рубчатой поверхностью, иногда с нагромождением плит в местах заторов, образующихся при течении потока	Фототон от светло-серого до темно-серого. Плиты выделяются на ровной поверхности одного фототона наличием теней по периметру, преимущественно собственных	
4 <b>Канатная лава</b>	Корка, смятая при сдавливании в направлении течения потока. Наблюдается чередование освещенных и затененных поверхностей волн	Фототон от серого до темно-серого. Наблюдаются сегменты темных затененных полос в понижениях волн поверхности. В понижениях скапливаются тефра и эоловый материал и появляется пионерная растительность	
5 <b>Крупноглыбовая лава</b>	Поверхность покрыта крупными обломками. Поток распадается на крупные глыбы. Наблюдается большое количество глубоких продольных и поперечных трещин	Хорошо различаются крупные глыбы, выделяются наличием теней — как падающих, так и собственных	
6 <b>Хребты сдавливания</b>	Вдоль бортов потоков прослеживается серия продольных волнообразных складок сжатия, обычно они тянутся на 25–30 м, каждая из них имеет ширину 5–8 м и возвышается над поверхностью потока на 7–12 м. Сложены угловатыми обломками	Протяженные возвышенные краевые структуры, параллельные потоку	
7 <b>Валы коробления</b>	Представляют хаотические нагромождения глыб лавы с натечными шероховатыми поверхностями. Протягиваются на 20–150 м через всю ширину потока, располагаясь перпендикулярно к направлению его движения	Натечные образования, перпендикулярные движению потока. Выделяются многочисленные поперечные валы и трещины	

## 4 Выводы

Применение аэрокосмических снимков позволило проанализировать изменения в состоянии поверхностей лавовых потоков в зависимости от химического состава и вязкости. В результате дешифрирования проявлений вулканической деятельности эффузивного типа создан классификатор дешифровочных признаков этих проявлений и выработаны критерии их формализации для автоматизированного дешифрирования. Выявление проявлений деятельности, характерной для того или иного вулкана, позволяет определить принадлежность его очагов к типу М (мантийному) или К (коровому), тектоническое положение постройки и геодинамический режим, которыми определяется опасность эффузивных и эксплозивных извержений. Результаты позволили

определить основные дешифровочные признаки этих проявлений и выявить критерии их формализации для дальнейшей автоматизации процесса их распознавания, определения уровня вулканоопасности и планирования землепользования. Более детальные исследования требуют применения беспилотных летательных аппаратов.

Вопрос об автономности каждой категории природопользования слабо изучен и в настоящее время. Процессы переноса вещества и энергии «не признают» любые административно-территориальные и кадастровые деления, нарушая этим принципы кадастровой оценки и кадастровой регистрации участков по социально-экономическим интересам. Возникает необходимость приоритета в использовании экологических знаний об изучаемом вулканическом природном комплексе и его взаимодействии со смежными географическими оболочками [15–17].

**БЛАГОДАРНОСТИ** Исследование выполнено при поддержке выданного Министерством цифрового и технологического развития Сахалинской области гранта Правительства Сахалинской области в форме субсидии молодым ученым на реализацию научно-исследовательского проекта (Постановление ПСО № 486 от 27 октября 2022 г.).

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Мелкий В.А. Разработка теории аэрокосмического мониторинга вулканоопасных территорий // Геодезия и картография. 2000. № 11. С. 52–53.
  2. Озеров А.Ю., Гирина О.А., Жаринов Н.А. и др. Извержения вулканов северной группы Камчатки в начале XXI века // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 3–19. DOI:10.31857/S0203030620010058.
  3. Аврунев Е.И., Ямбаев Х.К., Оприцова О.А. и др. Оценка точности 3D-моделей, построенных с использованием беспилотных авиационных систем // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23. № 3. С. 211–228.
  4. Хлебникова Т.А., Ямбаев Х.К., Оприцова О.А. Разработка технологической схемы сбора и обработки данных аэрофотосъемки с использованием беспилотных авиационных систем для моделирования геопространства // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25. № 1. С. 106–118. DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-1-106-118.
  5. Shahtahmassebi A.R., Li C., Fan Y., et al. Remote sensing of urban green spaces: A review // Urban Forestry & Urban Greening. 2021. Vol. 57. 126946. DOI:10.1016/j.ufug.2020.126946.
  6. Верхотуров А.А. Мониторинг состояния природной среды территорий активного вулканизма // Сборник материалов XVIII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 4. С. 152–156. DOI:10.33764/2618-981X-2022-4-152-156.
  7. Беленко В.В. Концепция и технология мониторинга земель застраиваемых территорий по материалам космической съемки: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2019. 209 с.
  8. Долгополов Д.В. Теоретическое обоснование комплекса технологий аэрокосмических исследований для обеспечения строительства и эксплуатации магистральных нефтепроводов Российской Федерации: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2024. 233 с.
  9. Дубровский А.В. Методологическое и теоретическое обоснование принципов эффективного использования земельных ресурсов на основе геоинформационных технологий: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2024. 255 с.
  10. Комиссаров А.В. Теория и технология лазерного сканирования для пространственного моделирования территорий: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2016. 278 с.
  11. Newhall C.G., Self S., Robock A. Anticipating future Volcanic Explosivity Index (VEI) 7 eruptions and their chilling impacts // Geosphere. 2018. Vol. 14. No. 2. P. 572–603. DOI:10.1130/GES01513.1.
  12. Сывороткин В.Л. Извержения вулканов // Пространство и время. 2017. Т. 1. № 27. С. 196–213.
  13. Belousov A., Belousova M. Dynamics and viscosity of ‘a’a and pahoehoe lava flows of the 2012–2013 eruption of Tolbachik volcano, Kamchatka (Russia) // Bulletin Volcanology. 2018. Vol. 80. No. 6. P. 1–23. DOI:10.1007/s00445-017-1180-2.

14. Малышев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 260 с.
15. Братков В.В., Керимов И.А., Волчкова В.В. и др. Картографирование климатогенной динамики ландшафтов Северо-Западного Прикаспия на основе данных дистанционного зондирования Земли // Региональные геосистемы. 2023. Т. 47. № 3. С. 331–342. DOI:10.52575/2712-7443-2023-47-3-331-342.
16. Серее Т.Э., Братков В.В. Изменения в использовании земель в 2012–2022 годах и их влияние на температуру поверхности Земли по космическим снимкам (на примере г. Мендеферы, государство Эритрея) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2024. Т. 68. № 3. С. 26–41. DOI:10.30533/GiA-2024-020.
17. Креймер М.А., Трубина Л.К. Некоторые аспекты интеграции кадастра и геоэкологии в управлении землепользованием // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2009. № 5. С. 26–29.

**АВТОРЫ** **Мелкий Вячеслав Анатольевич**

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

д-р техн. наук

 0000-0001-8919-8508

**Верхотуров Алексей Александрович**

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия  
лаборатория островных и прибрежных электроэнергетических систем

канд. техн. наук

 0000-0002-3826-7339

Поступила 10.11.2024. Принята к публикации 23.04.2025. Опубликовано 30.04.2025.



# Identification of decoding signs of effusive volcanic activity manifestations for identifying its impact on the territory

Vyacheslav A. Melkiy<sup>1</sup>✉, Alexey A. Verkhoturov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
✉ vamelkiy@mail.ru

**CITATION** Melkiy VA, Verkhoturov AA. Identification of decoding signs of effusive volcanic activity manifestations for identifying its impact on the territory. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(2): 93–107. DOI:10.30533/GiA-2025-016.

**KEYWORDS** cadastral assessment, effusive volcanism, remote sensing, decoding of satellite images, risk, geoinformation mapping

**ABSTRACT** The purpose of the work is to identify decoding signs of manifestations of effusive activity of volcanoes characteristic of lava flows of basalt and andesite–basalt composition. The article presents data on the study of the spread of volcanogenic deposits in the territory adjacent to the eruptive center, Effusive activity is characteristic of volcanoes whose magmatic melt has a basalt or andesite-basalt composition. The type of effusive eruptions depends on the gas saturation of the magma: a more viscous melt saturated with silica oxide explodes more strongly. The relatively calm outflow of liquid basalt magma over the edge of the crater is typical of the Hawaiian and fissure types of eruptions. With an increase in the silicic acid content of magma, explosive dispersion occurs with greater force, cones form on the surface of the flows. Eruptions of andesite-basalt magma can most often be attributed to the Strombolian type, in which the volcano periodically emits bombs, lapilli and ash of sandy and smaller dimensions. Field research materials, low- and medium-resolution satellite images obtained from satellites Landsat, Canopus, Sentinel, and data from the Digital aerial photography were used for the work. The use of satellite images made it possible to accurately analyze changes in the state of the surfaces of lava flows of various compositions. As a result of decoding the manifestations of volcanic activity of the effusive type, a classifier of decoding signs of these manifestations was created and criteria for their formalization for automated decoding were developed. The identification of manifestations of activity characteristic of a particular volcano makes it possible to determine whether its foci belong to the M (mantle) or κ (crust) type, the tectonic position of the structure and the geodynamic regime, which determine the danger

of effusive and explosive eruptions. More detailed studies require the use of unmanned aerial vehicles. The results of decoding aerospace images reflecting the manifestations of the effusive activity of volcanoes made it possible to identify the main decoding signs of these manifestations and identify criteria for their formalization for further automation of the process of their recognition, determination of the level of volcanic hazard and land use planning.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out with the support of a grant from the Government of the Sakhalin Region in the form of a grant to young scientists for the implementation of a research project (PSO Resolution No. 486 dated 10/27/2022), issued by the Ministry of Digital and Technological Development of the Sakhalin Region.

#### REFERENCES

1. Melkiy VA. Razrabotka teorii aerokosmicheskogo monitoringa vulkanoопасnykh territoriy [Development theory of aerospace monitoring of volcanic hazard areas]. *Geodesy and Cartography*. 2000;11: 52–53. (In Russian).
2. Ozerov AYu, Girina OA, Zharinov NA, et al. Izverzheniya vulkanov severnoj gruppy Kamchatki v nachale XXI veka [Volcanic eruptions of the northern group of Kamchatka at the beginning of the XXI century]. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2020;1: 3–19. (In Russian). DOI:10.31857/S0203030620010058.
3. Avrunev EI, Yambaev HK, Opritova OA, et al. Ocenka tochnosti 3D-modelej, postroennykh s ispol'zovaniem bespilotnykh aviacionnykh sistem [Accuracy evaluation of 3D models by using unmanned aerial systems]. *Vestnik SSUGT*. 2018;23(3): 211–228. (In Russian).
4. Khlebnikova TA, Yambaev HK, Opritova OA. Razrabotka tehnologicheskoy shemy sbora i obrabotki dannykh ajerofotos'emki s ispol'zovaniem bespilotnykh aviacionnykh sistem dlja modelirovaniya geoprostranstva [Development of a technological scheme for collecting and processing aerial photography data using unmanned aircraft systems for geospatial modeling]. *Vestnik SSUGT*. 2020;25(1): 106–118. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-1-106-118.
5. Shahtahmassebi AR, Li C, Fan Y, et al. Remote sensing of urban green spaces: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021;57: 126946. DOI:10.1016/j.ufug.2020.126946.
6. Verhoturov AA. Monitoring sostojaniya prirodnoj sredy territorij aktivnogo vulkanizma [Monitoring State of Natural environment of Territories with active volcanism]. *Interexpo GEO-Siberia. Proceedings of XVIII International scientific congress*. In 8 vols. Vol. 4. Novosibirsk: SSUGT; 2022: 152–156. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2022-4-152-156.
7. Belenko VV. *Koncepcija i tehnologija monitoringa zemel' zastraivaemykh territorij po materialam kosmicheskoy s'emki* [The concept and technology of monitoring the lands of built-up territories based on space survey materials] [dissertation]. Moscow; 2019. 209 p. (In Russian).
8. Dolgopopolov DV. *Teoreticheskoe obosnovanie kompleksa tehnologij ajerokosmicheskikh issledovanij dlja obespechenija stroitel'stva i jekspluatacii magistral'nykh nefteprovodov Rossijskoj Federacii* [Theoretical substantiation of a complex of aerospace research technologies for the construction and operation of main oil pipelines of the Russian Federation] [dissertation]. Novosibirsk; 2024. 233 p.
9. Dubrovsky AV. *Metodologicheskoe i teoreticheskoe obosnovanie principov jeffektivnogo ispol'zovanija zemel'nykh resursov na osnove geoinformacionnykh tehnologij* [Methodological and theoretical substantiation of the principles of effective use of land resources based on geoinformation technologies] [dissertation]. Novosibirsk; 2024. 255 p.
10. Komissarov AV. *Teorija i tehnologija lazernogo skanirovaniya dlja prostranstvennogo modelirovaniya territorij* [Theory and Technology of Laser Scanning for Spatial Modeling of Territories] [dissertation]. Novosibirsk; 2016. 278 p.
11. Newhall CG, Self S, Robock A. Anticipating future Volcanic Explosivity Index (VEI) 7 eruptions and their chilling impacts. *Geosphere*. 2018;14(2): 572–603. DOI:10.1130/GES01513.1.
12. Syvrotkin VL. Izverzheniya vulkanov [Volcanic eruptions]. *Space and Time*. 2017;1(27): 196–213 (In Russian).

13. Belousov A, Belousova M. Dynamics and viscosity of 'a'a and pahoehoe lava flows of the 2012–2013 eruption of Tolbachik volcano, Kamchatka (Russia). *Bulletin Volcanology*. 2018;80(6): 1–23. DOI:10.1007/s00445-017-1180-2.
14. Malyshev AI. *Zhizn' vulkana* [Life of Volcano]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2000. 260 p. (In Russian).
15. Bratkov VV, Kerimov IA, Volchkova VV, et al. Kartografirovanie klimatogennoj dinamiki landshaftov severo-zapadnogo Prikaspija na osnove dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli [Mapping the climatogenic dynamics of landscapes in the north-western Caspian region based on Remote sensing data]. *Regional Geosystems*. 2023;47(3): 331–342. (In Russian). DOI:10.52575/2712-7443-2023-47-3-331-342.
16. Sereke TE, Bratkov VV. Izmenenija v ispol'zovanii zemel' v 2012–2022 godah i ih vlijanie na temperaturu poverhnosti Zemli po kosmicheskim snimkam (na primere g. Mendefery, gosudarstvo Yeritreja) [Land use / Land cover Changes and their effects on land surface temperature using space images (by the example of Mendefera, Eritrea, 2012–2022)]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2024;68(3): 26–41. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2024-020.
17. Kreymer MA, Trubina LK. Nekotorye aspekty integratsii kadastra i geojekologii v upravlenii zemlepol'zovaniem [Some aspects of the integration of cadastre and geocology in land use management]. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2009;53(5): 26–29. (In Russian).

**AUTHORS Vyacheslav A. Melkiy**

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
Laboratory of Volcanology and Volcano Hazard  
Dr. of Sci. (Engineering)  
 0000-0001-8919-8508

**Alexey A. Verkhoturov**

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia  
Laboratory of Island and Coastal Electric Power Systems  
PhD in Engineering  
 0000-0002-3826-7339

Submitted: November 10, 2024. Accepted: April 23, 2025. Published: April 30, 2025.