УДК 528.8:551.2/.3 DOI: 10.33764/2411-1759-2025-30-3-69-76

Определение негативного воздействия вулканических извержений на прилегающие территории по материалам дистанционного зондирования Земли

В. А. Мелкий ¹², С. С. Янкелевич ²

¹ Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, Российская Федерация ² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: vamelkiy@mail.ru

Аннотация. Моделирование динамики вулканических процессов в целях определения их воздействия на окружающие земли во время извержений необходимо начинать с выявления характера деятельности вулкана, который целесообразно определить по материалам дистанционного зондирования Земли, на которых отображены изменения окружающей среды в результате вулканического воздействия. Негативное воздействие, которое оказывает вулкан на прилежащие территории, может быть отнесено лишь к определенному типу вулканической деятельности: эффузивному, эксплозивному или экструзивному. Характер деятельности обусловлен проницаемостью земной коры, в которой располагаются магматические очаги. Магматический расплав на земную поверхность может поступать либо напрямую из верхней мантии, либо пройти через промежуточные очаги в коре (мантийного (М) или корового (К) типов). Условия прохождения газонасыщенной магмы через земную кору определяют объем извергаемой тефры. Энергетической характеристикой мощности извержения служит индекс вулканической эксплозивности (VEI), который предопределяет высоту выброса эруптивной колонны. Существует большое количество математических выражений для вычисления подъема горячей газопепловой массы в атмосфере. Проверка гипотез выполнялась на различных вулканах во время извержений. Работа в этом направлении продолжается, потому как различные коэффициенты уточняются при исследовании разноплановой вулканической деятельности. Эруптивная деятельность вызывает значительные изменения экосистем, восстановление которых происходит на протяжении очень длительного времени. Динамику состояния экосистем хорошо демонстрируют индексные изображения, отражающие состояние растительного покрова, которые получают при обработке мультиспектральных аэрокосмических снимков различного пространственного разрешения, выполняя математические операции с характеристиками в красной и ближней инфракрасной зонах электромагнитного спектра. Использование вегетационных индексов дает возможность выявить сомкнутость покрытия земной поверхности вокруг вулканов растительностью и создавать карты состояния растительного покрова. Оценка негативного воздействия дает возможность определить диаметр площадного распространения вулканогенного материала и провести зонирование земель, подверженных вулканоопасности в рамках установленного круга.

Ключевые слова: моделирование, космические снимки, индекс вулканической эксплозивности, вегетационный индекс, эруптивная колонна, вулканоопасные земли

Для цитирования:

Мелкий В. А., Янкелевич С. С. Определение негативного воздействия вулканических извержений на прилегающие территории по материалам дистанционного зондирования Земли // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 69–76. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-69-76

Введение

Освоение территорий, расположенных вокруг активных вулканов, всегда связано с определенными рисками. Последствия извержений вулканов изучаются достаточно активно, а результаты исследований представлены в многочисленных работах [1-7]. При этом проблемы рационального и безопасного землепользования в районах активного вулканизма в научных публикациях, а также в нормативно-правовых рекомендациях проработаны недостаточно [8]. Цель настоящей работы – показать взаимосвязи в системе «вулкан определенного типа – эруптивные процессы – земли, подверженные воздействию тефры в границах окружности, диаметр которой зависит от высоты изверженной колонны».

Методы и материалы

Сведения об эксплозивности вулканов получены из каталога «Volcanoes of the World» [9]. В статье проведено изучение методов измерения расстояний, которые преодолевают обломки тефры при обрушении эруптивной колонны, а также исследовались возможности использования данных дистанционного зондирования Земли для получения информации о дальности распространения вулканогенного материала, поражающего в первую очередь растительный покров, который служит хорошим индикатором состояния.

Результаты

Моделирование динамики вулканических процессов в целях определения их воздействия на окружающие земли во время извержений следует начинать с выявления характера деятельности вулкана, который можно определить по космическим снимкам территорий, отображающим изменения окружающей среды в результате вулканического воздействия. Воздействие, которые вулканы оказывают на окрестные земли, всегда можно отнести к определенному типу вулканической деятельности: эффузивному, эксплозивному или экструзивному. Характер деятельности обусловлен проницаемостью земной коры, в которой располагаются магматические очаги. Магматический расплав может поступать на земную поверхность либо напрямую из верхней мантии, либо пройти через промежуточные очаги (мантийного (М) или корового (К) типов) [10]. Условия прохождения газонасыщенной магмы через земную кору определяют объем тефры, которую вулкан выбрасывает во время извержения.

Энергетической характеристикой мощности извержения служит индекс вулканической эксплозивности [11, 12]. Масштабы VEI для вулканов различного типа наглядно представлены на шкале, где показаны масштабы наиболее известных извержений в мире и России (рис. 1) [13, 14]. Интервалы шкалы вулканической эксплозивности (0–8) выбраны с шагом десятикратного увеличения объемов выброса тефры.

Оценка суммарного геологического эффекта вулканического выброса определяется массой горных пород, вынесенных при извержении. Известные методики подсчета массы пород основаны на определении тепловой мощности извержения, которую вычисляют исходя из данных о наблюдаемых высотах эруптивных колонн и пепловых шлейфов в атмосфере, либо построении изолиний мощности отложений исходя из данных отбора площадных проб [15].



Рис. 1. Энергетика вулканов: слева показан объем выброшенной тефры при различном индексе вулканической активности, а справа – высота выброса эруптивной колонны и величина пеплового шлейфа

Турбулентная конвекция струй (размерность – м) при устойчивом состоянии атмосферы (рис. 2) от длительно действующего источника может быть выражена формулой

$$\Delta h_T = 31 \cdot \left(1 - \frac{G}{G_0}\right)^{-\frac{3}{8}} \cdot Q^{\frac{1}{4}} , \qquad (1)$$

где Q – тепловая мощность жерла (размерность – кВт); $G = \Delta T / \Delta z$ – средний вертикальный градиент температуры окружающего воздуха и $G_0 = 9.8$ °С/км [16].

В случае стандартного градиента температуры в атмосфере G = -6,5 °С/км формула (1) приобретает вид

$$\Delta h_T = 46 \cdot Q^{\frac{1}{4}}$$
 или $Q = \left(\frac{\Delta h_T}{46}\right)^4$. (2)

Для определения высоты средней линии шлейфа используется формула, выведенная Международной рабочей группой защиты чистого воздуха и воды CONCAWE (Западная Европа) [17]:

$$\Delta h_T \approx 4,7 \cdot Q^{0,45} \cdot u^{-0,7},$$
 (3)

где *и* – скорость ветра.



Рис. 2. Схематическое представление эруптивной колонны: *a*) при штиле; *б*) при ветре

С. А. Федотовым [15] обнаружена закономерность роста превышения реальных высот над расчетными в тропосфере (1–10 км) и снижение этой погрешности в расчетах для стратосферы (10–55 км). Эмпирические данные, полученные во время многочисленных наблюдений за вулканическими извержениями, отображаются в виде номограммы (рис. 3) и описываются системой уравнений:

$$Q = \left(\frac{\Delta h_T}{46}\right)^4, \qquad \Delta h_T \le 1 \text{ KM};$$
$$Q = \left(\frac{\Delta h_T}{28,6}\right)^{3,5}, \qquad \Delta h_T \le 1 - 10 \text{ KM}; \quad (4)$$
$$Q = \left(\frac{\Delta h_T}{100}\right)^{4,5}, \qquad \Delta h_T \le 10 - 55 \text{ KM}.$$

На рис. 3 цифрой 1 обозначен график зависимости (2) по [16] для стандартной атмосферы при слабом ветре: сплошная линия – интервал, в котором расчетные высоты дымов больших труб хорошо соответствуют наблюдаемым; штриховая линия – экстраполяция (2) в область мощностей вулканических извержений; пунктирная линия – продолжение (2) за пределы максимальных Δh_T , возможных для плинианских (VEI >3) вулканических извержений; 2-зависимости, предлагаемые в настоящей работе для расчетов при $\Delta h_T =$ = 1÷10 км и 10÷55 км; 3 – графики формулы CONCAWE (3) для расчетов при ветре со скоростью и; 4 – предел высоты колонн плинианских извержений по [17, 18]; 5 - фактические данные о Δh_T и Q для сильных извержений (таблица); $6 - \Delta h_T$ для Северного прорыва Толбачинского извержения и вулкана Эбеко; *W* – примерный расход ювенильной пирокластики в секунду, соответствующий Q. Рисунок может служить номограммой для оценки Q и W по Δh_T , Δh , u.

Проведенные исследования показали, что частицы диаметром более 50 мкм составляют значительную часть осажденного пепла и выпадают на удалении первых десятков километров от вулкана. Легкие частицы тефры (<2 мм, вулканический пепел) ввиду малой скорости гравитационного осаждения находятся в атмосфере достаточно долго (от десятков минут до 2–3 месяцев) и могут вовлекаться в атмосферные циркуляционные течения практически во всем спектре масштабов, от локального до глобального.



Рис. 3. Эмпирические и теоретические зависимости высоты устойчивых конвективных струй Δh и облаков Δht от тепловой мощности их источника Q по [15]

Максимальная высота эруптивной колонны и расходы пирокластики, зафиксированные во время извержений

Вулкан	Дата начала	Δt	$\Delta h_T,$ км	W, t/c	Q, кВт	Источ- ник
Безы- мянный	30.03.1956	30 мин.	36	220·10 ³	2,8.1011	[2]
Гекла	29.03.1947	30 мин.	27	45·10 ³	$5,7 \cdot 10^{10}$	[17]
Север- ный прорыв	06.07.1975	3 дня	5	87	1,5·10 ⁸	[15]
Эбеко	08.08.2023	30 мин.	2	7	1,6.106	Номо- грамма

Любой падающий обломок имеет вектор скорости ϑ , состоящий из двух компонентов, которые полностью независимы друг от друга:

 $\vartheta_y = gt - cкорость вертикального переме$ шения;

 ϑ_x – скорость горизонтального перемещения;

и – скорость ветра.

Вертикальное перемещение тела, падающего с высоты, происходит за время

$$t_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta h_T}{g}},\tag{5}$$

где Δh_T – высота эруптивной колонны или высота, с которой падают обломки резургент-

ного материала, вулканические бомбы и лапилли;

 $g = 9,81 \text{ мс}^{-2}$ – ускорение свободного падения.

Горизонтальное перемещение *x_f* за время падения этих обломков составит

$$x_f = \frac{1}{2 \cdot m \cdot g} \rho \cdot u^2 \cdot C_D \cdot A \cdot \Delta h_T, \qquad (6)$$

где *т* – средняя масса обломков;

 ρ – плотность воздуха (максимальная – 1,225 кг/м³);

 C_D – коэффициент лобового сопротивления (в газовой среде зависит от чисел Рейнольдса и Маха);

 А – эталонная область, которая определяется площадью поперечного сечения летящего предмета.

Снижение степени воздействия вулканических продуктов на земную поверхность прямо пропорционально расстоянию от места выброса.

Эруптивная деятельность вызывает значительные изменения экосистем, восстановление которых происходит на протяжении очень длительного времени. Динамику состояния экосистем хорошо показывают индексные изображения, отражающие состояние растительного покрова, которые получают при обработке мультиспектральных аэрокосмических снимков различного пространственного разрешения со сканеров, выполняя математические операции с характеристиками в красной (0,60-0,75 мкм) и ближней инфракрасной (0,75-1,3 мкм) зонах электромагнитного спектра. Использование вегетационных индексов (один из них NDVI) [19] дает возможность выявить сомкнутость покрытия земной поверхности вокруг вулканов растительностью и создавать карты состояния растительного покрова и экосистем в целом [20-24]. Дальность разлета обломочного пирокластического материала при извержении зависит в первую очередь от высоты эруптивной колонны. Степень воздействия на объекты внутри окружности, ограничивающей зону распространения извергаемых вулканических продуктов, снижается. Измерение диаметра окружности дает возможность установить границы подзон, определенных на основании

предложенного алгоритма, в зависимости от величины влияния извержения на прилегающие территории.

Заключение

Предлагаемый подход к определению негативного воздействия вулканических процессов в зависимости от индекса эксплозивности вулкана VEI на прилегающие территории дает возможность определить диаметр площадного распространения вулканогенного материала и выполнить зонирование земель (с установлением границ подзон), подверженных такому негативному воздействию.

Предложенный математический алгоритм позволяет перейти от определения высоты выброса эруптивной колонны к установлению границ подзон в зависимости от степени негативного воздействия. Результаты вычислений, экспортированные в материалы дистанционного зондирования Земли, позволяют выполнить координирование установленных границ подзон и внести в установленной системе координат эту информацию в Единый государственный реестр недвижимости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горшков Г. С. Вулканизм Курильской островной дуги. – М. : Наука, 1967. – 287 с.

2. Горшков Г. С., Богоявленская Г. Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения 1955–1963 гг. / отв. ред. Б. И. Пийп. – М. : Наука, 1965. – 172 с.

3. Информация о результатах государственного мониторинга земель (краткая аналитическая записка) по теме: «Выполнение работ по мониторингу состояния и использования земель на территории муниципальных районов Сахалинской и Амурской областей, Приморского, Хабаровского и Камчатского краев, Республики Саха (Якутия)» [Электронный ресурс]. – URL: //rosreestr.gov.ru/upload/Doc/16-upr/Сводная%20записка%20ДФО%202019.pdf (дата обращения 15.04.2025).

4. Лаверов Н. П., Добрецов Н. Л., Богатиков О. А., Бондур В. Г. и др. Новейший и современный вулканизм на территории России / отв. ред. Н. П. Лаверов. – М. : Наука, 2005. – 604 с.

5. Раст X. Вулканы и вулканизм. – М. : Мир, 1982. – 344 с.

6. Cas R., Giordano G., Wright J.V. Volcanology. Processes, Deposits, Geology and Resources: Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment (STEGE). Springer, 2024.–1833 p. – DOI 10.1007/978-3-319-66613-6.

7. Decker R., Decker B. Volcanoes: Fourth Edition. – New York, W. H. Freeman and Company Publishing, 2006. – 326 p.

8. Верхотуров А. А. Зонирование вулканоопасных территорий (к постановке проблемы) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс, 15–17 мая 2024 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 3: Международная научная конференция «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, земле-устройство, лесоустройство, управление недвижимостью». – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – С. 79–84. – DOI 10.33764/2618-981X-2024-3-79-84. – EDN BLDNTM.

9. Siebert L., Simkin T., Kimberly P. Volcanoes of the World. Third edition. – Smithsonian Institution, Washington, D. C.; University of California Press, Berkeley Los Angeles London, 2010. – 494 p.

10. Сывороткин В. Л. Извержения вулканов // Пространство и время. – 2017. – № 1 (27). – С. 196–213. – EDN YMBAHF.

11. Newhall C. G., Self S. The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. Journal of Geophysical Research, 1982. – V. 87 (C2). – P. 1231–1238. – DOI 10.1029/jc087ic02p01231.

12. Newhall C. G., Self S., Robock A. Anticipating future Volcanic Explosivity Index (VEI) 7 eruptions and their chilling impacts. Geosphere, 2018. – 14. – P. 572–603. – DOI 10.1130/GES01513.1.

13. King H. M. Volcanic Explosivity // Geology.com. Geoscience News and Information. [Electronic resource]. – URL: https://geology.com/stories/13/volcanic-explosivity-index/ (accessed 15 April 2025).

14. Gray R. Will a volcanic eruption destroy humanity? Scientists warn that world must begin preparing for explosive global catastrophe // MailOnline. April 2015 [Electronic resource]. – URL: https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3039652/ (accessed 15 April 2025).

15. Федотов С. А. Оценка выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. – 1982. – № 4. – С. 3–28. 16. Morton B. R., Taylor G., Turner J. S. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1956. – 234(1196). – P. 1–23. – DOI 10.1098/RSPA.1956.0011.

17. Briggs G. A. Plume rise. Vienna: Atomic Energy Commission, 1969. (Crit. Rev. Ser. USEAC Rep.; TID25075). – 65 p.

18. Wilson L., Sparks R. S. J., Huang T. C., Watkins N. D. The control of volcanic column heights by eruption energetics and dynamics. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1978, 83 (B4). – P. 1829–1836. – DOI 10.1029/JB083iB04p01829.

19. Черепанов А. С. Вегетационные индексы // Геоматика. – 2011. – № 2. – Р. 98–102. – EDN STYTLN.

20. Верхотуров А. А. Анализ изменений состояния экосистем на острове Атласова (Курильские острова) // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 139–150. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150. – EDN AAYSRA.

21. Верхотуров А. А., Мелкий В. А. Геоинформационный анализ изменчивости состояния природной среды после извержений вулкана Чикурачки по данным дистанционного зондирования Земли // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2021. – Т. 27. – № 1. – С. 292–303. – DOI 10.35595/2414-9179-2021-1-27-292-303. – EDN LIZKQJ.

22. Верхотуров А. А., Мелкий В. А. Геоинформационный анализ пространственной изменчивости геосистемы острова Райкоке (Курильские острова) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 139–147. – DOI 10.35595/2414-9179-2022-1-28-139-147. – EDN RVLCOP.

23. Верхотуров А. А. Оценка пространственно-временной трансформации острова Матуа (Курильский архипелаг), обусловленной активностью вулкана Пик Сарычева // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 84, № 6. – С. 42–49. – DOI 10.22389/0016-7126-2023-996-6-42-49. – EDN KRCPJP.

24. Мелкий В. А., Верхотуров А. А., Братков В. В. Зонирование воздействия вулкана Эбеко (Курильские острова) на прилегающие земли по данным материалов аэрокосмических съемок // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2024. – Т. 68, № 1. – С. 21–32. – DOI 10.30533/GiA-2024-002. – EDN BGXCIP.

Об авторах

Вячеслав Анатольевич Мелкий – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканоопасности.

Светлана Сергеевна Янкелевич – кандидат технических наук, исполняющая обязанности ректора университета.

Получено 06.05.2025

© В. А. Мелкий, С. С. Янкелевич, 2025

Determination of the negative impact of volcanic eruptions on adjacent territories based on remote sensing data

V. A. Melkiy ${}^{1 \boxtimes}$, S. S. Yankelevich 2

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation ¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: vamelkiy@mail.ru

Abstract. Modeling the dynamics of volcanic processes in order to determine their impact on the surrounding lands during eruptions should begin with identifying the nature of the volcano's activity, which can be determined from space images of areas that show changes in the environment as a result of volcanic action. The negative effects that a volcano produces on adjacent territories can only be

attributed to a specific type of volcanic activity: effusive, explosive, or extrusive. The nature of the activity is determined by the permeability of the earth's crust, in which magmatic chambers are located. Magmatic melt can enter the earth's surface either directly from the upper mantle or pass through intermediate chambers in the crust (mantle (M) or crustal (K) types). The conditions for the passage of gas-saturated magma through the earth's crust determine the volume of erupted tephra. The energy characteristic of the eruption power is the volcanic explosivity index (VEI), which determines the height of the eruptive column ejection. There are many mathematical expressions for calculating the rise of hot gas-ash mass in the atmosphere. Hypotheses were tested on various volcanoes during eruptions. Work in this direction continues, as various coefficients are being refined in the study of diverse volcanic activity. Eruptive activity causes significant changes in ecosystems, the restoration of which occurs over a very long period of time. The dynamics of the state of ecosystems is well demonstrated by index images reflecting the state of the vegetation cover, which are obtained by processing multispectral aerospace images of various spatial resolutions, performing mathematical operations with characteristics in the red and near infrared zones of the electromagnetic spectrum. The use of vegetation indices makes it possible to identify the density of the land surface around volcanoes by vegetation and to create maps of the state of the vegetation cover. The assessment of the negative impact makes it possible to determine the diameter of the areal distribution of volcanogenic material and to carry out zoning of lands subject to volcanic hazards within the established circle.

Keywords: modeling, space images, volcanic explosivity index, vegetation index, eruptive column, lands subject to volcanic hazard

REFERENCES

1. Gorshkov, G. S. (1967). *Vulkanizm Kuril'skoy ostrovnoy dugi* [Volcanism of the Kuril island arc]. Moscow: Nauka, 288 p. [in Russian].

2. Gorshkov, G. S., Bogoyavlenskaya, G. E. (1965) Vulkan Bezymyannyy i osobennosti ego poslednego izverzheniya 1955–1963 gg. [The Bezymyannyy volcano and the features of its last eruption in 1955–1963]. Ed. by B.I. Piip. Moscow: Nauka, 172 p. [in Russian].

3. Informatsiya o rezul'tatakh gosudarstvennogo monitoringa zemel' (kratkaya analiticheskaya zapiska) po teme: "Vypolnenie rabot po monitoringu sostoyaniya i ispol'zovaniya zemel' na territorii munitsipal'nykh rayonov Sakhalinskoy i Amurskoy oblastey, Primorskogo, Khabarovskogo i Kamchatskogo kraev, Respubliki Sakha (Yakutiya)" [Information on the results of state land monitoring (brief analytical note) on the topic: "Performance of work on monitoring the condition and use of land in the territory of the municipal districts of the Sakhalin and Amur regions, the Primorskoy, Khabarovsk and Kamchatka Territories, the Republic of Sakha (Yakutia)"]. (2023). Moscow: Rosreestr. 42 p. Retrived from: https://rosreestr.gov.ru/upload/Doc/16-upr/Cводная%20записка%20ДФО%202019.pdf (accessed 25 April 2025) [in Russian].

4. Laverov, N. P., Dobretsov, N. L., Bogatikov, O. A., Bondur, V. G. et al. (2005). *Noveyyshiy i sovremennyy vulkanizm na territorii Rossii [Modern and Holocene Volcanism in Russia*]. Moscow, Nauka, 604 p. [in Russian].

5. Rast, H. (1982). *Volcanoes and volcanism. Translated from German*. Moscow: Mir Publ., 344 p. [in Russian].

6. Cas, R., Giordano, G., Wright, J.V. (2024). Volcanology. Processes, Deposits, Geology and Resources: Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment (STEGE). Springer, 1833 p. DOI 10.1007/978-3-319-66613-6.

7. Decker, R., Decker, B. (2006). *Volcanoes: Fourth Edition*. New York, W.H. Freeman and Company Publishing, 326 p.

8. Verkhoturov, A. A. (2024). Zoning of volcano-prone areas (pose the problem). *Interekspo Geo-Sibir'* [*Interexpo Geo-Siberia*], 3, 79–84. DOI 10.33764/2618-981X-2024-3-79-84. EDN BLDNTM [in Russian].

9. Siebert, L., Simkin, T., Kimberly, P. (2010). *Volcanoes of the World. Third edition*. Smithsonian Institution, Washington, D.C.; University of California Press, Berkeley Los Angeles – London, 494 p.

10. Syvorotkin, V. L. (2017). Eruption of volcanoes. *Prostranstvo i Vremya* [Space and Time], 1 (27), 196–213. EDN YMBAHF [in Russian].

11. Newhall, C. G., Self, S. (1982). The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87, C2, 1231–1238. DOI 10.1029/jc087ic02p01231.

12. Newhall, C. G., Self, S., Robock, A. (2018). Anticipating future Volcanic Explosivity Index (VEI) 7 eruptions and their chilling impacts. *Geosphere*, 14, 572–603. DOI: 10.1130/GES01513.1.

13. King, H. M. Volcanic Explosivity. *Geology.com. Geoscience News and Information*. Retrived from: https://geology.com/stories/13/volcanic-explosivity-index/ (accessed 15 April 2025).

14. Gray, R. (2015) Will a volcanic eruption destroy humanity? Scientists warn that world must begin preparing for explosive global catastrophe. *MailOnline*. April 2015. Retrived from: https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3039652/ (accessed 25 April 2025).

15. Fedotov, S. A. (1982). Evaluation of heat and pyroclast disharge by volcanic eruptions and fumaroles based on the heights of their plumes and clouds. *Volcanologia i seismologia [Volcanology and seismology]*, 4, 3–28 [in Russian].

16. Morton, B. R., Taylor, G., Turner, J. S. (1956). Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 234(1196), 1–23. DOI:10.1098/RSPA.1956.0011.

17. Briggs, G. A. (1969). Plume rise. Vienna: Atomic Energy Commission, (Crit. Rev. Ser. USEAC Rep.; TID25075), 65 p.

18. Wilson, L., Sparks, R. S. J., Huang, T. C., Watkins, N. D. (1978). The control of volcanic column heights by eruption energetics and dynamics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83, (B4), 1829–1836. DOI 10.1029/jb083ib04p01829.

19. Cherepanov, A. S. (2011). Vegetation indexes. *Geomatika [Geomatics]*, 2, 98–102. EDN STYTLN [in Russian].

20. Verkhoturov, A. A. (2020). Analysis of changes in the state of ecosystems on Atlasov Island (Kuril Islands). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SGUGT]* 25, 3, 139–150. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-139-150. EDN AAYSRA [in Russian].

21. Verkhoturov, A. A., Melkiy, V. A. (2021). Geoinformation analysis of variability state of the natural environment after of the eruption of the Chikurachki volcano by remote sensing data. *InterKarto*. *InterGIS [InterCarto. InterGIS]*, 27, 1, 292–303. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-1-27-292-303. EDN LIZKQJ [in Russian].

22. Verkhoturov, A. A., Melkiy, V. A. (2022). Geoinformation analysis of the spatial variability of the Raikoke island (Kuril Islands) geosystem. *InterKarto. InterGIS [InterCarto. InterGIS]*, 28, 1, 139–147. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-139-147. EDN RVLCOP [in Russian].

23. Verkhoturov, A. A. (2023) Assessing spatial and temporal transformation of Matua Island territory caused by the activity of Sarychev Peak volcano. *Geodezia i Kartografia [Geodesy and cartog-raphy]*, 84(6), pp. 42–49. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-996-6-42-49. EDN KRCPJP [in Russian].

24. Melkiy, V. A., Verkhoturov, A. A., Bratkov, V. V. (2024). Zoning of the impact of the Ebeko volcano (Kuril Islands) on adjacent lands by the materials of aerospace surveys. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"yemka, [Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying],* 68(1), 21–32. DOI: 10.30533/GiA-2024-002. EDN BGXCIP [in Russian].

Author details

Vyacheslav A. Melkiy – D. Sc., Leading Researcher, Laboratory of Volcanology and Volcanic Hazard.

Svetlana S. Yankelevich – Ph. D., Acting Rector of the University.

Received 06.05.2025

© V. A. Melkiy, S. S. Yankelevich, 2025