

Применение данных VIIRS Nightfire для мониторинга текущего извержения вулкана Крашенинникова (Камчатка): первые результаты и возможная связь с сильным землетрясением

Мельников Д.В., Озеров А.Ю., Бахматова Я.А.

Application of VIIRS Nightfire data for monitoring the current eruption of Krasheninnikov volcano (Kamchatka): first results and possible connection with a strong earthquake

Melnikov D.V., Ozerov A.Yu., Bakhmatova Y.A.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: dvm@kscnet.ru*

Представлены первые результаты применения спутниковых данных VIIRS Nightfire для мониторинга извержения вулкана Крашенинникова, начавшегося в августе 2025 г. За период август 2025 – февраль 2026 гг. оценены динамика извержения, температура лавовых потоков и их объем. Общий объем излившейся лавы $\sim 0.13 \text{ км}^3$, максимальная скорость истечения – до $\sim 97 \text{ м}^3/\text{с}$.

Введение

Вулкан Крашенинникова – один из действующих вулканов Восточной вулканической зоны Камчатки, расположенный в одноименной кальдере [3]. Его постройка образована тремя сросшимися конусами (Южный, Северный внешний, Северный средний), сформировавшимися в голоцене в результате циклической деятельности. Исторических извержений вулкана до настоящего времени зафиксировано не было, последняя активность вулкана была отмечена 400-600 л.н. [3].

Современные спутниковые системы, такие как VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), предоставляют уникальные возможности для обнаружения и количественной оценки тепловых аномалий, связанных с вулканической активностью. Алгоритм Nightfire [5, 8] позволяет не только детектировать субпиксельные источники инфракрасного излучения в ночное время, но и рассчитывать их температуру, площадь и мощность излучения на основе подгонки кривой Планка по нескольким спектральным каналам. Это дает возможность в деталях изучать динамику эффузивных извержений даже в труднодоступных районах.

Настоящая работа посвящена первым результатам применения подхода, основанного на данных VIIRS Nightfire и их кластеризации, для анализа извержения вулкана Крашенинникова, начавшегося в августе 2025 г., и его возможной связи с мощным землетрясением 29 июля 2025 г. у восточного побережья Камчатки. Новые данные полевых наблюдений [6], спутниковой радиолокационной интерферометрии [2] и сейсмологии [7] позволяют существенно уточнить картину этого уникального события.

Методы и данные

В работе использовались данные тепловых аномалий, полученные с сенсора VIIRS на спутниках Suomi NPP, NOAA-20 и NOAA-21 за период с августа 2025 г. по февраль 2026 г. Данные принимаются и обрабатываются наземной станцией Унискан-36 (СканЭкс), установленной в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Обработка данных включала несколько этапов, основанных на подходах, описанных в [8]:

1. Фильтрация первичных данных: исключение аномалий с высоким зенитным углом спутника ($>45^\circ$) для минимизации искажений на краях снимка, а также слабых сигналов с малой тепловой мощностью ($<2 \text{ МВт}$), которые могут соответствовать фоновым значениям.

2. Кластеризация: для группировки пространственно-сближенных горячих точек использовался алгоритм DBSCAN. Это позволило объединить пиксели, принадлежащие единому лавовому потоку.

3. Агрегация и расчет параметров: для каждого временного снимка (уникального пролета спутника) рассчитывались суммарная тепловая мощность (FRP), средняя и максимальная температура пикселей, а также общая активная площадь потока. Скорость истечения лавы (TADR – Time-Averaged Discharge Rate) оценивалась по эмпирической зависимости от вулканической излучаемой энергии (VRE) [4] с учетом состава пород. Для вулкана Крашенинникова характерны андезиты и дациты (с содержанием SiO_2 ~63.5 %) [3, 6], что было учтено в расчетах. Интегрирование TADR во времени позволило получить кумулятивный объем извержения.

Дополнительно использованы данные сейсмического каталога USGS для анализа предшествующей сейсмичности, включая землетрясение 29 июля 2025 г. (Mw 8.8) и серию событий 1 августа 2025 г. в районе вулкана.

Результаты и обсуждение

Извержение вулкана Крашенинникова началось 2 августа 2025 г. [1], однако ему предшествовала ярко выраженная сейсмическая активизация. 29 июля 2025 г. у восточного побережья Камчатки произошло мощное землетрясение с магнитудой Mw 8.8, которое вызвало [7] изменение напряженного состояния в земной коре. Расчеты косейсмических изменений давления [7] показывают, что в районе вулкана Крашенинникова на глубинах предполагаемого магматического очага (5-10 км) статическое изменение давления составило +0.03 МПа. Даже такое, казалось бы, небольшое увеличение давления могло оказаться решающим для инициирования подъема магмы, если система находилась в субкритическом состоянии, близком к началу извержения. Динамические нагрузки от сейсмических волн также могли сыграть роль.

Уже 1 августа 2025 г., менее чем за двое суток до первого зафиксированного теплового сигнала, в районе вулкана зарегистрирована серия (по данным каталога USGS) из более чем десяти локальных землетрясений с магнитудами от 4.0 до 4.4. Глубина очагов составляла около 10 км, что соответствует коре и указывает на активизацию магматической системы под вулканом. Подтверждением стали данные InSAR [2], которые зафиксировали начало деформаций поверхности вулкана уже 1-2 августа, то есть до первого пеплового выброса. Максимальные горизонтальные смещения (до 70-90 см в стороны от центра) и кольцевое поднятие (до 31 см) указывают на расширение жерла и внедрение дайки. Скорость подъема магмы, оцененная по времени между началом роя (глубина ~10 км) и началом извержения, составила около ~7-8 см/с, что характерно для подъема вязкой магмы по трещине.

За период спутниковых наблюдений со 2 августа 2025 г. по 14 февраля 2026 г. было зарегистрировано несколько фаз активности, отражающих пульсирующий характер извержения (рис. 1).

Начальная фаза (август 2025 г.) характеризовалась максимальной интенсивностью. Пиковая скорость истечения в первые дни извержения достигла 80-90 м³/с (рис. 2), а суммарная тепловая мощность составляла 700-800 МВт. Это свидетельствует о раскрытии жерла и быстром излиянии больших масс лавы.

Фаза умеренной активности (сентябрь-ноябрь 2025 г.) отметилась серией пульсаций со скоростями истечения в диапазоне 10-40 м³/с. Максимальная температура поверхности лавы в отдельные дни достигала 950 °С, указывая на выходы свежего, горячего материала. Полевые замеры инфракрасной камерой 16 августа 2025 г. фиксировали температуры до 750 °С на фронте лавового потока.

Фаза затухания (декабрь 2025 – февраль 2026 гг.) характеризовалась снижением средней скорости истечения до <10 м³/с и уменьшением активной площади. Отдельные кратковременные всплески активности (например, в конце декабря) все еще фиксировались, но общий тренд был направлен на затухание.

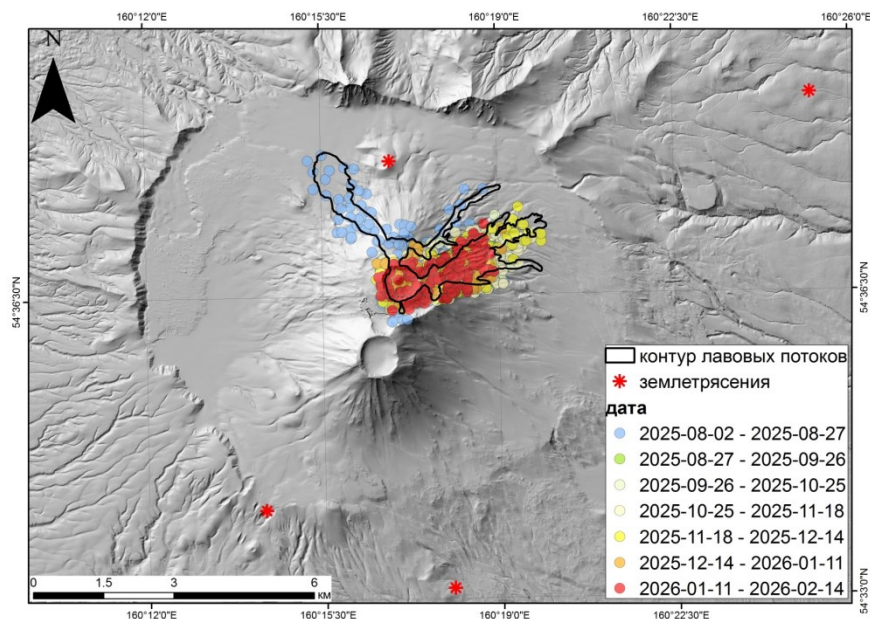


Рис. 1. Распределение точек термальных аномалий по данным алгоритма Nightfire. Цветом показаны периоды времени наблюдений лавовых потоков. Черным контуром – границы лавовых потоков по состоянию на 30 января 2026 г. (оцифровано со спутника Sentinel-1). Красные звезды – землетрясения по данным каталога землетрясений USGS (<https://earthquake.usgs.gov/>)

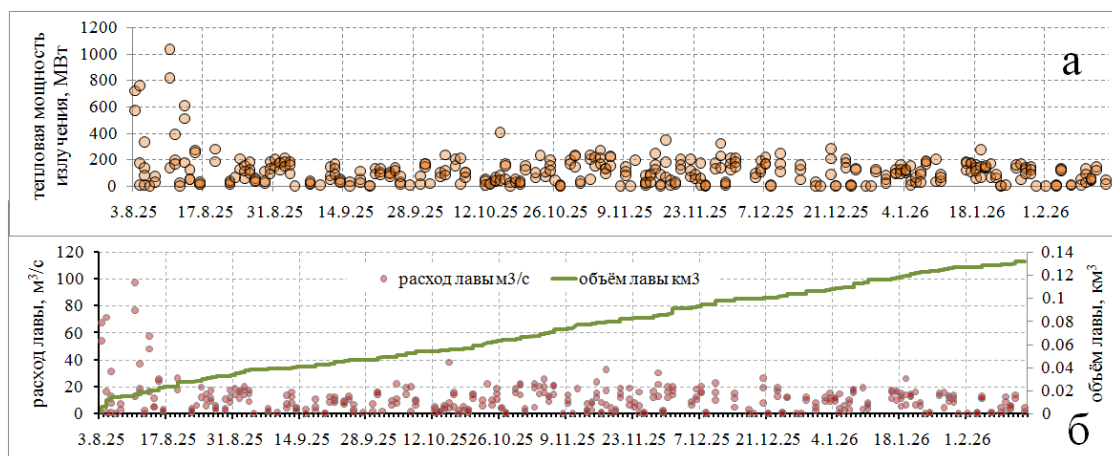


Рис. 2. График распределения тепловой мощности излучения над поверхностью лавовых потокам по данным алгоритма Nightfire (а); график расхода и кумулятивного объема лавы (б).

Общий кумулятивный объем изверженной лавы (рис. 2) за первые 6 месяцев активности оценивается в $\sim 0.13 \text{ км}^3$. Эта оценка хорошо согласуется с предполагаемой средней мощностью потоков ($\sim 10 \text{ м}$ [6]), что дает объем $\sim 0.025 \text{ км}^3$ только за первые два месяца. С учетом погрешности эмпирического метода (около $\pm 50\%$ согласно [4]), реальный объем может находиться в пределах $0.07\text{-}0.20 \text{ км}^3$. Этот объем сопоставим с отдельными этапами активности вулкана в голоцене [3].

Особого внимания заслуживает высокая подвижность лавовых потоков, особенно в первые дни извержения. Хотя состав лав соответствует дацитам (SiO_2 64.9-65.7 мас. %, [6]), их поведение было скорее характерно для базальтов. Петрологические исследования [6] показывают, что лавы относятся к высокожелезистой толеитовой серии с отношением $\text{FeO}^*/\text{MgO} > 6$. Высокое содержание железа выступает в роли флюса, значительно понижая вязкость расплава даже при кислом составе. Эта особенность была отмечена еще для более древних лав вулкана Крашенинникова [3] и подтвердилась в текущем извержении.

Заключение

Применение алгоритмов анализа данных VIIRS Nightfire и кластеризации позволило впервые получить детальную картину хода исторического извержения вулкана Крашенинникова. Рассчитанные параметры (скорость истечения, объем, температура) хорошо согласуются с известными закономерностями его голоценовой активности и демонстрируют пульсирующий характер эффузивного процесса. Полученная оценка объема (~0.13 км³ за полгода) свидетельствует о значительном масштабе события.

Внимания заслуживает предшествовавшая извержению сейсмическая активизация, включая сильнейшее землетрясение 29 июля 2025 г. (Mw 8.8) и последующий рой локальных землетрясений 1 августа. Данные InSAR [2] подтверждают, что деформации начались еще до первого пеплового выброса. В совокупности с расчетами косейсмических изменений напряжений [7], показавшими увеличение давления в магматической системе на 0.03 МПа на глубинах 5-10 км, это позволяет рассматривать текущее извержение как пример триггерного эффекта крупного субдукционного землетрясения на вулканическую активность в тыловой зоне. Высокая подвижность лав, зафиксированная спутниковыми данными, объясняется уникальным высокожелезистым составом дацитовых расплавов вулкана Крашенинникова, что является его отличительной петрологической чертой. Предложенный подход может быть рекомендован для оперативного мониторинга и ретроспективного анализа извержений на Камчатке и в других труднодоступных регионах, особенно в контексте изучения сейсмо-вулканических взаимодействий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН по теме НИР № FWME-2024-0008.

Список литературы

1. *Гирина О.А., Мельников Д.В., Романова И.М. и др.* Первое историческое извержение вулкана Крашенинникова (Камчатка) в 2025 г. по данным спутникового мониторинга в информационной системе VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 397-404. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-4-397-404>
2. *Захарова Л.Н., Захаров А.И.* Наблюдение деформации склонов вулкана Крашенинникова после его извержения в августе 2025 года методами радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С. 400-411. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-6-400-411>
3. *Пономарева В.В.* Вулкан Крашенинникова: история формирования и динамика активности // Вулканология и сейсмология. 1987. № 5. С. 28-44.
4. *Coppola D., Laiolo M., Piscopo D., Cigolini C.* Rheological control on the radiant density of active lava flows and domes // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 249. P. 39-48.
5. *Elvidge C.D., Zhizhin M.N., Hsu F.C., Baugh K.E.* VIIRS nightfire: Satellite pyrometry at night // Remote Sensing. 2013. V. 5. P. 4423-4449.
6. *Gorbach N.V., Ozerov A.Yu., Rogozin A.N. et al.* First historical eruption of Krasheninnikov Volcano (Eastern Kamchatka): Field observations and composition of lavas erupted in August-September 2025 // Journal of Volcanology and Seismology. 2026. V. 20. Is. 1. P. 1-14.
7. *Liu C., Bai Y., Lay T. et al.* Simple unilateral rupture of the great Mw 8.8 2025 Kamchatka earthquake // Science. 2026. V. 391. Art. 6787. <https://doi.org/10.1126/science.aeb8232>
8. *Trifonov G.M., Zhizhin M.N., Melnikov D.V., Poyda A.A.* VIIRS Nightfire remote sensing volcanoes // Procedia Computer Science. 2018. V. 136. P. 349-358.