

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ И ДЕФОРМАЦИЙ ПО ДАННЫМ SENTINEL-1 ДЛЯ ТРУБКИ «МИР»

Н.С. Шеин¹, Г.П. Стручкова¹, С.А. Тихонова¹, Т.А. Капитонова¹, Л.Е. Тарская¹

¹ ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия, e-mail: shnnick@yandex.ru

Аннотация: В исследовании выполнен комплексный анализ влажностной и деформационной активности земной поверхности в районе кимберлитовой трубки «Мир» (Республика Саха (Якутия)) на основе радиолокационных спутниковых данных Sentinel-1. Основное внимание уделено пространственно-временной деформационно-влажностной динамике, предшествующей аварийному событию, произошедшему в 2017 г. Для выявления закономерностей развития геодинамических процессов применены методы интерферометрической синтетической апертурной радиолокации (InSAR), а также адаптированный подход к оценке влажностного состояния приповерхностного слоя земной поверхности с использованием нормализованного индекса влажности (NDMI), рассчитанного по радиолокационным данным VV и VH поляризации. Проведен сравнительный анализ данных о смещениях и оценка относительного радиолокационного индекса NDMI, чувствительного к переувлажнению поверхности по временным рядам, за 2017–2019 гг. Это позволило установить, что использование радиолокационных спутниковых данных позволяет наблюдать за динамикой изменения влажности и деформационной активности грунтов и обнаружить их синхронный рост, который может предшествовать возникновению аварийной ситуации на объектах горнодобывающей промышленности. Результаты демонстрируют достаточно высокую информативность мультисенсорного подхода в задачах прогноза геодинамических рисков и подчеркивают потенциал интеграции радиолокационных технологий в системы мониторинга потенциально опасных объектов горнодобывающей промышленности, таких как шахты, дамбы хвостохранилищ, дражных полигонов и др.

Ключевые слова: объект горнодобывающей промышленности, интерферометрия, InSAR, радиолокационные спутниковые данные, Sentinel-1, пространственно-временной анализ, техногенные аварии, дистанционное зондирование, геоинформационные технологии.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме: «Исследование тепломасообменных процессов в многокомпонентных дисперсных средах для повышения надежности и безопасности природно-технических систем в условиях глобальных изменений криолитозоны» (регистрационный номер НИОКТР 124032600077-4, научная тема FWRS-2024-0032).

Для цитирования: Шеин Н. С., Стручкова Г. П., Тихонова С. А., Капитонова Т. А., Тарская Л. Е. Анализ взаимосвязи изменения влажности и деформаций по данным Sentinel-1 для трубки «Мир» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 7. – С. 143–156. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_7_0_143.

Relationship of changes in moisture and deformation by Sentinel-1 data for the Mir Pipe

N.S. Shein¹, G.P. Struchkova¹, S.A. Tikhonova¹, T.A. Kapitonova¹, L.E. Tarskaya¹

¹ V.P. Laronov's Institute of Physical-Technical Problems of the North,
Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia, e-mail: shnnick@yandex.ru

Abstract: The study performs the integrated analysis of moisture and deformation activity on ground surface in the area of the Mir kimberlite pipe, Republic of Sakha, Yakutia using radar imagery from Sentinel-1. Spotlight is on the spatio-temporal moisture–deformation dynamics preceding an accident happened in 2017. For revealing the laws of development of geodynamic processes, the Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) was employed together with an adaptive approach to moisture estimation in ground subsurface using the Normalized Difference Moisture Index (NDMI) calculated from radar data of VV and VH polarization. The comparative analysis of ground displacements and the estimate of NDMI sensitive to overmoistening is carried out using time series over a period of 2017–2019. The analysis proves that the space-based radar data allow tracing the changes in moisture and deformation of ground surface, and enable detecting their synchronous increase which may precede emergency situations at production facilities in the mining industry. The results demonstrate a sufficiently ample information content of the multi-sensor approach to the geodynamic risk prediction, and highlight the potential of integration of the radar technologies in the monitoring systems of risky mining facilities such as mines, tailings dams, dredging sites, etc.

Key words: mining industry facility, interferometry, InSAR, space-based radar data, Sentinel-1, spatio-temporal analysis, manmade accidents, remote sensing, geoinformation technologies.

Acknowledgements: The study was carried out under the state contract with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Topic: Analysis of Mass Transfer and Heat Exchange in Multicomponent Dispersed Media Toward Enhanced Safety and Reliability of Natural-and-Technical Systems under Global Change of the Permafrost Area, R&D No. 124032600077-4, Topic No. FWRS-2024-0032.

For citation: Shein N. S., Struchkova G. P., Tikhonova S. A., Kapitonova T. A., Tarskaya L. E. Relationship of changes in moisture and deformation by Sentinel-1 data for the Mir Pipe. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(7):143-156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_7_0_143.

Введение

Одним из основных проявлений динамических процессов в земной коре являются деформации земной поверхности. Эти процессы отражают результат сложного взаимодействия тектонических движений, внутреннего теплового режима планеты, а также внешних воздействий, включая климатические изменения и деятельность человека. Изучение деформаций играет важную роль в оценке геологических рисков, связанных

с оползнями, землетрясениями и другими опасными природными явлениями, а также способствует более глубокому пониманию эволюции литосферы и прогнозированию сейсмической активности.

В последние десятилетия технологии дистанционного зондирования достигли значительного развития, что привело к существенному улучшению систем мониторинга деформаций земной поверхности [1–4]. Особенно эффективными в этом направлении стали методы

интерферометрической синтетической апертурной радиолокации (InSAR) [5, 6], реализованные на спутниковой платформе Sentinel-1. Они обеспечивают получение высокоточной информации о смещениях земной поверхности с достаточной временной частотой, что позволяет фиксировать как медленные, так и внезапные деформационные события. Эти данные успешно применяются для анализа долговременной динамики, исследования аномалий и оценки влияния различных геологических и климатических факторов на безопасность состояния объектов горнодобывающей промышленности (ОГП) как в работах российских авторов [7–9], так и у зарубежных исследователей [10–12].

Оценка относительного индекса радарного отклика, чувствительного к увлажнению, играет важную роль в мониторинге состояния сельскохозяйственных земель, прогнозировании паводков, контроле процессов эрозии, а также в анализе деформаций земной поверхности, обусловленных как природными, так и техногенными воздействиями [13–15].

Целью данного исследования является анализ деформационно-влажностных изменений земной поверхности в пределах выбранной территории с использованием спутниковых данных Sentinel-1 для оценки состояния ОГП, который позволит определять и предупреждать предаварийные ситуации. Для достижения этой цели применяются современные подходы интерферометрической обработки (InSAR), позволяющие выявить пространственно-временные особенности деформаций, а также определить участки переувлажнения [16, 17]. Полученные в ходе работы результаты могут быть использованы для повышения эффективности мониторинга состояния потенциально опасных объектов, разработки превентивных мер по снижению риска катастроф и аварий.

Тем самым исследование способствует расширению научных представлений о динамике земной поверхности и созданию прикладных инструментов для ее наблюдения, что актуально для практического применения в инженерной геологии и системе управления чрезвычайными ситуациями.

Описание участка

Кимберлитовая трубка «Мир» — одна из крупнейших алмазоносных трубок в мире, расположенная в черте города Мирный, Республика Саха (Якутия). Объект был открыт в 1955 г. геологической экспедицией и вошел в историю как первая крупная алмазная находка в СССР, положившая начало промышленной добыче алмазов в стране. Месторождение эксплуатировалось открытым способом с 1957 по 2001 гг. Карьер достиг глубины 525 м и диаметра около 1,2 км, что делает его одним из самых глубоких карьеров такого типа в мире. После завершения открытых работ добыча продолжалась в подземном режиме.

Район трубки «Мир» характеризуется сложными мерзлотно-гидрогеологическими условиями. По данным Шепелева и соавт. [9], в пределах территории развита аномально мощная двухъярусная криолитозона, а также подмерзлотные высоконапорные рассолы метегеро-ичерского водоносного комплекса. Дополнительно отмечается формирование вокруг карьера зоны вторичной трещиноватости пород, что способствует повышению водопритоков и локальному перераспределению влаги в приповерхностной части массива.

Мерзлотно-гидрогеологические условия района трубки «Мир» характеризуются наличием мощной криолитозоны, достигающей 780–800 м, а также развитием подмерзлотных высоконапорных водоносных горизонтов, представленных минерализованными рассолами

(криопэгами). При этом в зоне техногенного воздействия формируется область вторичной трещиноватости пород, охватывающая территорию более 1 км вокруг карьера, что способствует изменению фильтрационных свойств массива и перераспределению подземного стока. Согласно опубликованным данным, для района трубки «Мир» характерны значительные водопритоки и сложная динамика гидрогеологических процессов, включая сезонное воздействие талых и атмосферных вод, а также разгрузку высокоминерализованных подмерзлотных рассолов. Указанные особенности определяют необходимость корректной интерпретации радиолокационных параметров Sentinel-1: рассчитанный показатель следует рассматривать не как прямую оценку влагосодержания почвы, а как относительный радиолокационный индекс, чувствительный к переувлажнению поверхности и изменению диэлектрических свойств верхнего слоя, на который также могут влиять шероховатость, сезонные процессы в условиях многолетней мерзлоты и состояние техногенных отложений.

4 августа 2017 г. на подземной части рудника «Мир» произошла аварийная ситуация — затопление шахты в результате внезапного притока грунтовых и подводных вод из зоны отработано-

Таблица 1

Среднемесячное количество осадков за летние месяцы в 2017–2019 гг.
Average monthly precipitation for the summer months for 2017–2019

Месяц/год	2017	2018	2019
май	29	44	30
июнь	21	22	39
июль	77	122	34
август	20	121	81
среднелетние осадки	36,75	77,25	46

го карьера. Происшествие стало крупнейшей техногенной аварией в истории компании «АЛРОСА» и оказало существенное влияние на пересмотр подходов к безопасности на предприятиях отрасли.

Данные и метод

Радиолокационные изображения, использованные для интерферометрической обработки, были получены спутником Sentinel-1 в режиме интерферометрического широкополосного обзора (IW) с поляризацией VV за период с мая по август в 2017–2019 гг.

Исследование проводилось поэтапно и включало сбор, предварительную обработку и анализ спутниковых данных. В работе использованы два основных типа информации: радиолокационные снимки Sentinel-1 и климатические показатели, полученные из различных источников (Архив погоды в Мирном (Якутия, Россия). URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=24726>). Сводные данные о климатических условиях за рассматриваемый период представлены в табл. 1, 2 и на рис. 1, 2.

Интерферометрический анализ данных

В рамках исследования была рассмотрена территория кимберлитовой трубки

Таблица 2

Данные летних среднемесячных температур в 2017–2019 гг.
Average monthly air temperature data for the summer months for 2017–2019

Месяц/год	2017	2018	2019
май	2,9	5,5	5,3
июнь	17,8	18,6	18
июль	15,9	15,4	18,2
август	15,4	14,3	14,8
среднелетние температуры	13,00	13,45	14,08



Рис. 1. График среднемесячных осадков за летние месяцы в 2017–2019 гг.
 Fig. 1. Graph of average monthly precipitation for the summer months for 2017–2019

«Мир», где в августе 2017 г. зафиксировано аварийное событие. Анализ данного участка с использованием данных спутникового дистанционного зондирования позволил углубить понимание деформационно-влажностных процессов, предшествовавших аварии. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для разработки методов обнаружения предаварийных ситуаций на ОГП и для применения превентивных мер по снижению аналогичных рисков в будущем.

Процесс построения карты смещений земной поверхности включает три ключевых этапа: корректную корегистрацию радарных изображений, формирование дифференциальной интерферограммы и последующее получение

финальной карты смещений. Для обработки данных Sentinel-1 в данном исследовании использовался программный комплекс SNAP. Обработка каждой интерферометрической пары снимков выполнялась в стандартизованной последовательности, включающей разделение сцены (оператор TOPSAR Split), применение уточненных орбит, обратный геокодирование, формирование интерферограммы, устранение полосового эффекта (deburst), некогерентное накопление, фильтрацию интерферограммы с использованием фильтра Голдстейна, развертку фаз и геокодирование фазовых данных с учетом модели рельефа. Данная цепочка операций обеспечивает получение высокоточной пространственной информации о деформациях исследуемой территории.

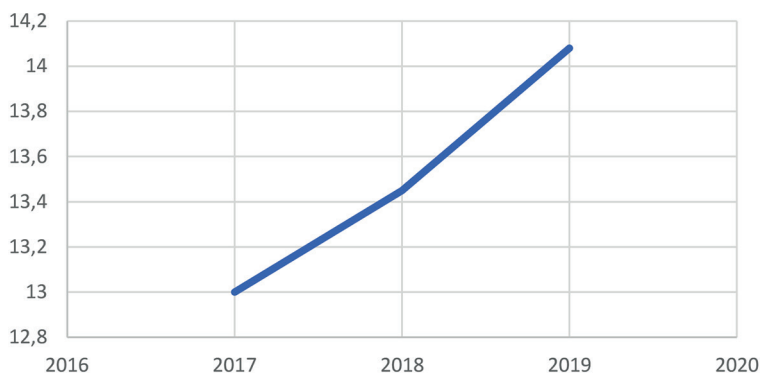


Рис. 2. График летних среднемесячных температур в 2017–2019 гг.
 Fig. 2. Graph of average monthly air temperatures for the summer months for 2017–2019

двумя территориями [18]. Полученные значения деформаций представлены как вертикальные смещения земной поверхности и выражены в метрах.

Для проведения интерферометрического анализа деформаций земной поверхности на выбранном участке были использованы серии радарных изображений спутника Sentinel-1. Для района трубки «Мир» использованы снимки, полученные в 2017 г.: 8 мая, 13 июня, 7 июля, 19 июля, 31 июля; в 2018 г.: 20 июня, 14 июля, 26 июля и 7 августа; в 2019 г.: 3 июня, 9 июля, 21 июля, 14 августа, 26 августа. Для обеспечения достоверности результатов при оценке деформационной активности поверхности выбор дат наблюдений осуществлялся с учетом минимального временного интервала между соседними снимками. Такой подход направлен на повышение когерентности интерферометрических пар, что является одним из ключевых условий успешной интерферометрической обработки.

Индекс влажности

Непрерывное наблюдение с использованием традиционных оптических методов дистанционного зондирования зачастую осложняется такими факторами, как облачность, нестабильное освещение и сезонные изменения. Альтернативой в этом случае являются радиолокационные технологии, в частности, данные со спутников Sentinel-1, которые обеспечивают сбор информации независимо от погодных условий и времени суток, что делает их особенно востребованными для мониторинга в любых условиях.

Следует отметить, что рассчитываемый в работе показатель NDMI по данным Sentinel-1 не является прямым измерением влажности почвы в классическом гидрологическом понимании. В условиях района трубки «Мир», где преобладают коренные породы и техно-

генно нарушенные поверхности, данный параметр корректнее интерпретировать как относительный радиолокационный индекс отклика, чувствительный к переувлажнению приповерхностного слоя. Физический смысл индекса связан с изменением коэффициента обратного рассеяния в поляризациях VV и VH, зависящего от диэлектрических свойств материала и наличия влаги в верхнем слое. При этом радиолокационный сигнал Sentinel-1 чувствителен преимущественно к приповерхностным слоям (первые сантиметры — десятки сантиметров), а также зависит от шероховатости поверхности, структуры пород, наличия трещиноватости и сезонных мерзлотных процессов. В связи с этим NDMI используется в работе преимущественно для выявления пространственно-временной динамики и аномалий переувлажнения поверхности, а не для определения абсолютных количественных значений влажности.

Оценка состояния почвенного покрова на основе радарных данных может эффективно осуществляться с применением нормализованного индекса влажности (NDMI) [19], адаптированного для радиолокационных наблюдений. В отличие от традиционного NDMI, вычисляемого по оптическим каналам ближнего инфракрасного (NIR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазонов на основе данных Sentinel-2, в случае спутника Sentinel-1 применяется модифицированный подход. Он основан на сравнительном анализе коэффициентов обратного рассеяния в различных поляризациях, преимущественно VV (вертикально-вертикальной) и VH (вертикально-горизонтальной), что позволяет учитывать влагосодержание приповерхностного слоя почвы независимо от атмосферных условий и освещенности. Вычисление NDMI осуществляется с использованием следующей формулы:

$$NDMI = \frac{\sigma_{VV}^0 - \sigma_{VH}^0}{\sigma_{VV}^0 + \sigma_{VH}^0},$$

где σ_{VV}^0 — коэффициент обратного рассеяния для вертикально-вертикальной поляризации, σ_{VH}^0 — коэффициент обратного рассеяния для вертикально-горизонтальной поляризации. Определение NDMI позволяет отслеживать незначительные изменения влажности и структуры верхнего слоя почвы, поскольку уровень обратного рассеяния существенно различается для сухих и увлажненных почв.

Актуальность применения данного подхода определяется совокупностью факторов, повышающих его эффективность в задачах мониторинга. Прежде всего, спутниковые данные Sentinel-1 характеризуются высокой временной разрешающей способностью, что обеспечивает возможность оперативного отслеживания динамики геофизических процессов. Кроме того, радиолокационные наблюдения устойчивы к влиянию метеорологических условий и освещенности, что особенно ценно для территорий с частой облачностью или продолжительным снежным покровом. Дополнительно использование адаптированного для данных Sentinel-1 индекса NDMI предоставляет новые перспективы в анализе изменений влажности почвенного

покрова в широком диапазоне климатических условий и на участках с различными физико-химическими характеристиками поверхности.

Результаты

Объектом исследования являлась кимберлитовая трубка «Мир», на которой в августе 2017 г. произошло аварийное событие. Для интерферометрической обработки были использованы радиолокационные снимки, полученные спутником Sentinel-1 при VV поляризации за май — август 2017 г. в режиме интерферометрического широкополосного обзора (IW).

В рамках анализа для данной территории также была применена интерферометрическая обработка данных, что позволило выявить пространственно-временные характеристики деформационных процессов.

На рис. 3 показаны визуализации изменений земной поверхности на кимберлитовой трубке «Мир» перед аварией за июль 2017 г., полученные InSAR-методом.

Выбор точек, по которым осуществлялся анализ деформационных процессов, был выполнен с опорой на описание аварийных событий и последующих аналитических обзоров [9, 20] и представлен на рис. 4.

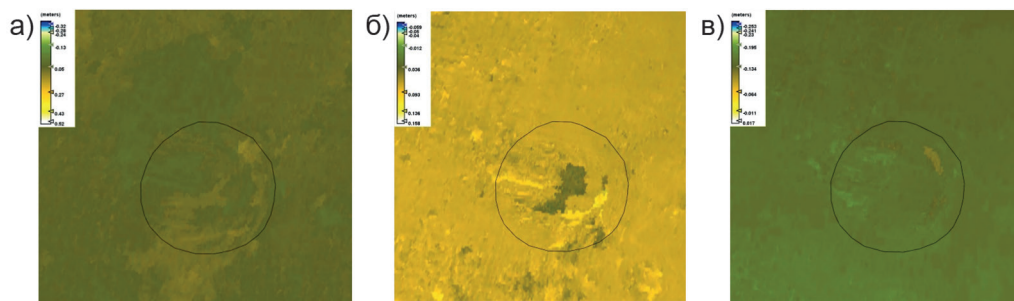


Рис. 3. Визуализация динамики деформаций земной поверхности до аварии в районе кимберлитовой трубки «Мир» в 2017 г.: 7 июля (а); 19 июля (б); 31 июля (в)

Fig. 3. Visualization of surface deformation dynamics before the accident in the area of the Mir kimberlite pipe: July 7 (a); July 19 (b); July 31, 2017 (v)



Рис. 4. Схема расположения точек 1, 2, 3 и 4, используемых для анализа деформаций и влажности на территории кимберлитовой трубки «Мир»
 Fig. 4. Layout of points 1, 2, 3, and 4 used for the analysis of deformation and moisture in the area of the Mir kimberlite pipe

Графики деформаций земной поверхности, построенные на основе данных, полученных до момента и после аварии, за период май — июль в 2017 — 2019 гг., показаны на рис. 5.

Графическое представление значений влажности, полученных по данным радиолокационного зондирования (SAR) за тот же временной промежуток, представлено на рис. 6. Временные ряды отражают изменение параметра влажно-

сти в различных точках наблюдения в пределах полигона кимберлитовой трубки «Мир» за период с мая 2017 по август 2019 гг. Значения рассчитаны как усредненные показатели в пределах буферной зоны радиусом 5 м, окружающей точки наблюдения.

Анализ динамики показывает, что в целом наблюдается тенденция к снижению влажности поверхности в течение рассматриваемого периода, с локальными максимумами в августе 2017 и августе 2019 гг., что, вероятно, связано с сезонным переувлажнением грунтов вследствие таяния многолетнемерзлых пород и активного поверхностного стока.

График деформации земной поверхности (см. рис. 5), построенный на основе интерферометрического анализа данных Sentinel-1, демонстрирует чередование эпизодов оседания и незначительных положительных смещений. Наиболее выраженные отрицательные аномалии (оседания) зафиксированы в августе 2017 и августе 2019 гг., что совпадает по времени с повышенными значениями влажности.

Синхронность пиков увлажнения и деформационных проявлений указывает

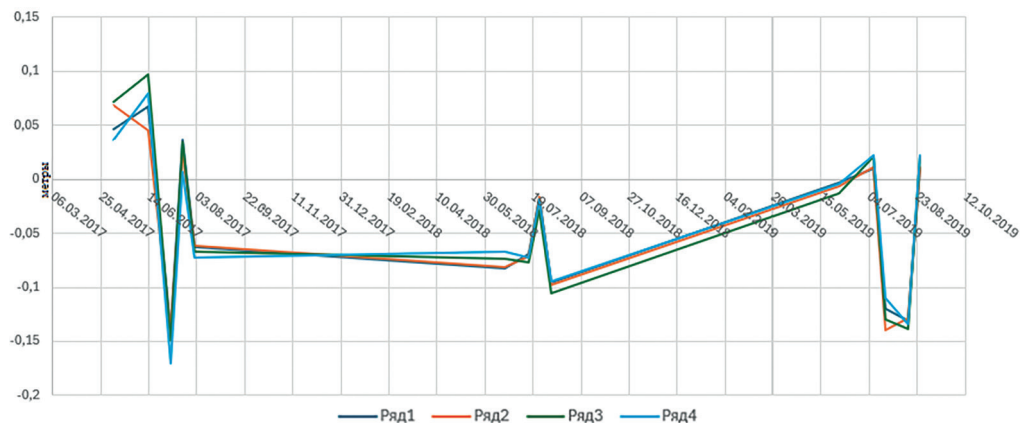


Рис. 5. Кривые временных рядов деформаций в исследуемых точках кимберлитовой трубки «Мир», по данным InSAR за 2017–2019 гг.

Fig. 5. Time series curves of surface deformations at the study points of the Mir kimberlite pipe based on InSAR data for 2017–2019

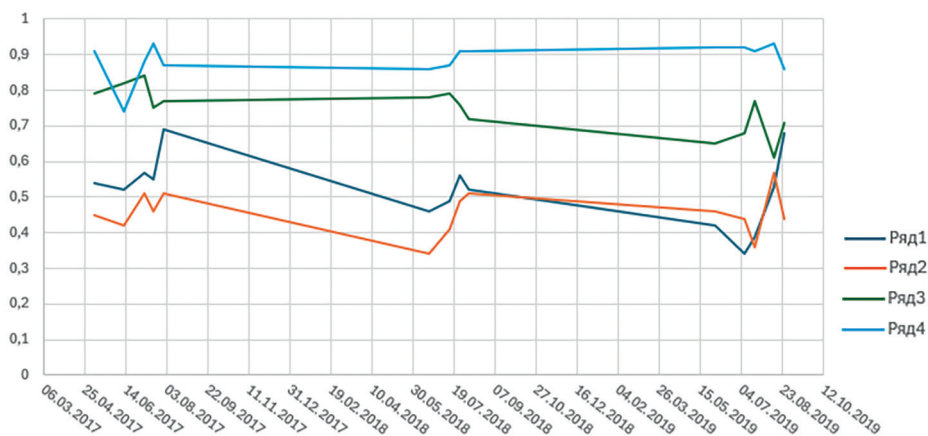


Рис. 6. Временные ряды относительного радиолокационного индекса NDMI, чувствительного к переувлажнению поверхности, в исследуемых точках трубки «Мир», по данным Sentinel-1 за 2017–2019 гг. Fig. 6. Time series of the relative radar-based NDMI index, sensitive to surface overmoistening, at the study points of the Mir kimberlite pipe based on Sentinel-1 data for 2017–2019

на возможную взаимосвязь между процессами переувлажнения пород в зонах техногенного воздействия и развитием осадочных деформаций в пределах массива пород, окружающих кимберлитовую трубку «Мир». Данный эффект может быть обусловлен снижением несущей способности пород при повышенной влажности и активизацией процессов консолидации техногенных грунтов.

В то же время анализ графика деформаций показывает, что оседания фиксировались не только в августе 2017 г., но и в другие временные интервалы. Однако в эти периоды значения влагосодержа-

ния, определенные по данным SAR, оставались на относительно низком уровне. Это может свидетельствовать о том, что сами по себе деформации не всегда приводят к развитию аварийных процессов, если они не сопровождаются интенсивным переувлажнением пород. Отсутствие признаков избыточной влаги в такие периоды, несмотря на наличие оседаний, вероятно, объясняет, почему разрушительные явления, аналогичные событиям августа 2017 г., не повторялись в последующие годы.

Для количественной оценки взаимосвязи между деформациями земной по-

Таблица 3

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между деформациями и индексом NDMI для точек 1–4
Spearman rank correlation coefficients between surface deformation and the NDMI index for points 1–4

Точка	ρ (лаг 0)	n	ρ (лаг 1 шаг)	n
1	-0,102	14	0,22	13
2	-0,4	14	0,4	13
3	-0,18	14	-0,26	13
4	-0,327	14	0,21	13

Таблица 4

Коэффициенты корреляции Пирсона между деформациями и индексом NDMI для точек 1–4
Pearson correlation coefficients between surface deformation and the NDMI index for points 1–4

Точка	r (лаг 0)	n	r (лаг 1 шаг)	n
1	0,048	14	0,243	13
2	-0,146	14	0,453	13
3	0,087	14	-0,144	13
4	-0,341	14	0,485	13

верхности и относительным радиолокационным индексом, чувствительным к переувлажнению поверхности, был выполнен корреляционный анализ временных рядов для точек 1–4. Расчет коэффициентов корреляции проводился двумя методами: линейной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена (табл. 3, 4). Анализ выполнялся при лаге 0 и лаге 1 шаг (сдвиг индекса на один шаг наблюдения назад относительно деформаций). При использовании коэффициента корреляции Пирсона для лага 0 выраженная линейная зависимость между параметрами не выявлена. Значения коэффициента корреляции варьируют от $r = -0,341$ до $r = 0,087$, что свидетельствует об отсутствии устойчивой линейной связи между мгновенными значениями радиолокационного индекса и деформациями земной поверхности. При уровне значимости $p = 0,2$ и объеме выборки $n = 14$ критическое значение коэффициента корреляции составляет $r = 0,367$. При введении лага 1 шаг наблюдается усиление корреляционной тенденции для отдельных точек наблюдения. Наиболее выраженные значения коэффициента корреляции получены для точки 4 ($r = 0,485$) и точки 2 ($r = 0,453$). Эти значения превышают критическое значение $r = 0,367$, что может указывать на наличие корреляционной зависимости при учете временного запаздывания деформационного отклика относительно изменений состояния приповерхностного слоя.

Дополнительно для проверки устойчивости выявленных зависимостей был рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена, позволяющий выявлять монотонные зависимости без предположения о линейности связи. Полученные значения коэффициента Спирмена при лаге 0 варьируют от $\rho = -0,202$ до $\rho = 0,046$, что также указывает на отсутствие выраженной монотонной

взаимосвязи между параметрами. При лаге 1 шаг значения коэффициента изменяются в пределах от $\rho = -0,044$ до $\rho = 0,445$. Наиболее выраженная монотонная зависимость наблюдается для точки 2 ($\rho = 0,445$) и точки 1 ($\rho = 0,300$), что в целом подтверждает тенденцию к усилению взаимосвязи между индексом и деформациями при учете временного запаздывания. В целом результаты корреляционного анализа, полученные двумя независимыми методами (Пирсона и Спирмена), свидетельствуют о сложном, многофакторном характере взаимосвязи между радиолокационным индексом, характеризующим состояние приповерхностного слоя, и деформационными процессами. Это подтверждает необходимость осторожной интерпретации выявленных зависимостей и указывает на возможное влияние дополнительных геологических и гидрогеологических факторов.

Выводы

В работе был выполнен сбор, предварительная обработка и анализ радиолокационных снимков Sentinel-1, полученных в режиме интерферометрического широкополосного обзора (IW) с поляризацией VV за период с мая по август в 2017–2019 гг., и климатических показателей с целью исследования деформационно-влажностных изменений земной поверхности в пределах выбранной территории для оценки состояния ОГП. Анализ полученных данных продемонстрировал, что использование радиолокационной информации спутника Sentinel-1 в сочетании с методами InSAR и оценкой относительного радиолокационного индекса, чувствительного к переувлажнению поверхности, позволяет достаточно эффективно выявлять пространственно-временной характер изменения деформационно-влажностных процессов, предшествующих аварийным

ситуациям на горнодобывающих объектах. На примере исследования аварийной ситуации в районе кимберлитовой трубки «Мир» установлено, что если периоды повышения значений радиолокационного индекса NDMI сопровождаются активацией деформаций земной поверхности, то это может указывать на возможность развития предаварийной ситуации на ОГП. Полученные результаты демонстрируют, что совместный анализ деформационных временных рядов InSAR и радиолокационного индекса NDMI позволяет выявлять аномальные периоды сезонной активности поверхности. Данный подход может быть использован как элемент предварительного дистанционного мониторинга потенциально опасных участков, однако требует дальнейшей валидации по наземным наблюдениям и геологическим данным.

Дополнительно проведенный корреляционный анализ временных рядов де-

формаций земной поверхности и относительного радиолокационного индекса NDMI показал, что между рассматриваемыми параметрами в большинстве случаев отсутствует выраженная линейная зависимость при нулевом временном лаге. Вместе с тем при введении временного запаздывания наблюдается усиление корреляционной связи для отдельных точек наблюдения, что может свидетельствовать о наличии опосредованной взаимосвязи между процессами увлажнения приповерхностного слоя и развитием деформационных проявлений.

Полученные результаты подтверждают сложный многофакторный характер геодинамических процессов в районе трубки «Мир» и указывают на необходимость комплексного анализа радиолокационных, гидрогеологических и инженерно-геологических данных при прогнозировании предаварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ширшова В. Ю. Опыт мониторинга оседаний земной поверхности в урбанизированных районах методом радиолокационной спутниковой интерферометрии на примере города Санкт-Петербург // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2020. — Т. 64. — № 4. — С. 399–408. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-4-399-408.

2. Исаев Ю. С., Лебедев М. О., Михайлов В. О., Смольянинова Е. И., Тимошкина Е. П., Дмитриев П. Н., Хайретдинов С. А. Определение смещений земной поверхности методами радарной спутниковой интерферометрии: опыт применения и перспективы использования / Проектирование, строительство и эксплуатация подземных сооружений транспортного назначения: Сборник статей. — М.: Изд-во «Перо», 2021. — С. 106–117.

3. Смольянинова Е. И., Киселева Е. А., Михайлов В. О. Применение РСА-интерферометрии снимков со спутников Sentinel-1 при изучении областей активных деформаций поверхности в прибрежном районе Большого Сочи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16. — № 5. — С. 147–155.

4. Муродов С. Д., Чермошенцев А. Ю. Методика мониторинга смещений зданий и сооружений по данным космической радиолокационной съемки // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2020. — Т. 6. — С. 36–40. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-6-2-36-40.

5. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001, vol. 39, no. 1, pp. 8–20. DOI: 10.1109/36.898661.

6. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2002, vol. 40, no. 11, pp. 2375–2383. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.

7. Шерхов А. Х., Гергокова З. Ж. Оценка актуального состояния некоторых компонентов комплекса гидротехнических сооружений хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината // Природообустройство. — 2022. — № 4. — С. 100–106. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-100-106.

8. Лөгостаева Я. Б., Гололобова А. Г., Попов В. Ф., Макаров В. С. Геохимические свойства и трансформация микроэлементного состава почв при разработке коренных месторождений алмазов в Якутии // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 212–225. DOI: 10.31897/PMI.2023.35.

9. Шепелев В. В., Железняк М. Н., Павлова Н. А. О специфических мерзлотно-гидрогеологических условиях района трубки «Мир» // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2019. — Т. 24. — № 3. — С. 80–87. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-3-7.

10. Raspini F., Bianchini S., Ciampalini A., Del Soldato M., Solari L., Novali F., Del Conte S., Rucci A., Ferretti A., Casagli N. Continuous, semi-automatic monitoring of ground deformation using Sentinel-1 satellites // Scientific Reports. 2018, vol. 8, article 7253. DOI: 10.1038/s41598-018-25369-w.

11. Strozzi T., Antonova S., Günther F., Mätzler E., Vieira G., Wegmüller U., Westermann S., Bartsch A. Sentinel-1 SAR interferometry for surface deformation monitoring in low-land permafrost areas // Remote Sensing. 2018, vol. 10, no. 9, article 1360. DOI: 10.3390/rs10091360.

12. Lumbroso D., McElroy C., Goff C., Roca Collell M., Petkovsek G., Wetton M. The potential to reduce the risks posed by tailings dams using satellite-based information // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2019, vol. 38, article 101209. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2019.101209.

13. Родионова Н. В. Оценка влажности почвы по радарным данным на основе множественной регрессии // Исследование Земли из космоса. — 2023. — № 5. — С. 13–22. DOI: 10.31857/S0205961423050068.

14. Морозова В. А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования [Электронный ресурс] // Современные проблемы территориального развития. — 2019. — № 2. — С. 1–12.


15. Корниенко С. Г. Информативность космических снимков сверхвысокого разрешения в задачах мониторинга влажности тундрового покрова // Актуальные проблемы нефти и газа. — 2020. — № 2(29). — С. 82–95. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art7.

16. Lu Z., Dzurisin D. InSAR imaging of aleutian volcanoes: Monitoring a volcanic arc from space // Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-00348-6.

17. Li C., Wang C., Zhang Z., Yu J., Zhao R., Zhang J., Liu L. Ground deformation and permafrost degradation in the source region of the Yellow River // Remote Sensing. 2023, vol. 15, no. 12, article 3153. DOI: 10.3390/rs15123153.

18. Andreas B., Luis V. Sentinel-1 Toolbox. TOPS Interferometry Tutorial. URL: <https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorialv2.pdf>.

19. Zhang R., Chan S. K., Bindlish R., Lakshmi V. A performance analysis of soil dielectric models over organic soils in alaska for passive microwave remote sensing of soil moisture // Remote Sensing. 2023, vol. 15, no. 6, article 1658. DOI: 10.3390/rs15061658.

20. Архипов А. Г. Последний путь подземного рудника «Мир»: Исследование причин катастрофы 4 августа 2017 г. — СПб.: Политехника, 2019. — 264 с. DOI: 10.25960/7325-1147-5. 

REFERENCES

1. Shirshova V. Yu. Experience in monitoring ground surface subsidence in urbanized areas using satellite radar interferometry: A case study of St. Petersburg. *Izvestia VUZOV. Geodesy and aerophotogrammetry*. 2020, vol. 64, no. 4, pp. 399–408. [In Russ]. DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-4-399-408.

2. Isaev Yu. S., Lebedev M. O., Mikhailov V. O., Smolyaninova E. I., Timoshkina E. P., Dmitriev P. N., Khayretdinov S. A. Determining ground surface displacements using radar satellite interferometry: Application experience and prospects. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya podzemnykh sooruzheniy transportnogo naznacheniya: Sbornik statey* [Design, Construction and Operation of Underground Transport Structures: Collected Papers], Moscow, 2021, pp. 106–117. [In Russ].

3. Smolyaninova E. I., Kiseleva E. A., Mikhailov V. O. Application of SAR interferometry based on Sentinel-1 satellite imagery for studying active surface deformation zones in the coastal area of Greater Sochi. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2019, vol. 16, no. 5, pp. 147–155. [In Russ].

4. Murodov S. D., Chermoshentsev A. Yu. Methodology for monitoring building and structure displacements using spaceborne radar imaging. *Interexpo Geo-Siberia*. 2020, vol. 6, pp. 36–40. [In Russ]. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-6-2-36-40.

5. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001, vol. 39, no. 1, pp. 8 – 20. DOI: 10.1109/36.898661.
6. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2002, vol. 40, no. 11, pp. 2375 – 2383. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.
7. Sherkhov A. Kh., Gergokova Z. Zh. Assessment of the current state of certain components of the hydraulic structures complex at the tailings storage facility of the Tyrnyauz Mining and Processing Plant. *Environmental Management*. 2022, no. 4, pp. 100 – 106. [In Russ]. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-100-106.
8. Legostaeva Ya. B., Gololobova A. G., Popov V. F., Makarov V. S. Geochemical properties and transformation of the trace element composition of soils during the development of primary diamond deposits in Yakutia. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 212 – 225. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.35.
9. Shepelev V. V., Zheleznyak M. N., Pavlova N. A. On the specific permafrost and hydrogeological conditions of the Mir kimberlite pipe area. *Natural Resources of the Arctic and Subarctic*. 2019, vol. 24, no. 3, pp. 80 – 87. [In Russ]. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-3-7.
10. Raspini F., Bianchini S., Ciampalini A., Del Soldato M., Solari L., Novali F., Del Conte S., Rucci A., Ferretti A., Casagli N. Continuous, semi-automatic monitoring of ground deformation using Sentinel-1 satellites. *Scientific Reports*. 2018, vol. 8, article 7253. DOI: 10.1038/s41598-018-25369-w.
11. Strozzi T., Antonova S., Günther F., Mätzler E., Vieira G., Wegmüller U., Westermann S., Bartsch A. Sentinel-1 SAR interferometry for surface deformation monitoring in low-land permafrost areas. *Remote Sensing*. 2018, vol. 10, no. 9, article 1360. DOI: 10.3390/rs10091360.
12. Lumbruso D., McElroy C., Goff C., Roca Collell M., Petkovsek G., Wetton M. The potential to reduce the risks posed by tailings dams using satellite-based information. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2019, vol. 38, article 101209. DOI: 10.1016/j.ijdr.2019.101209.
13. Rodionova N. V. Soil moisture estimation based on radar data using multiple regression analysis. *Earth Research from Space*. 2023, no. 5, pp. 13 – 22. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0205961423050068.
14. Morozova V. A. Calculation of indices for the detection and analysis of water body characteristics using remote sensing data. *Modern Problems of Territorial Development*. 2019, no. 2, pp. 1 – 12. [In Russ].
15. Kornienko S. G. Information content of very high-resolution satellite imagery in monitoring tundra moisture. *Current Problems in Oil and Gas*. 2020, no. 2(29), pp. 82 – 95. [In Russ]. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art7.
16. Lu Z., Dzurisin D. *InSAR imaging of aleutian volcanoes: Monitoring a volcanic arc from space*. Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-00348-6.
17. Li C., Wang C., Zhang Z., Yu J., Zhao R., Zhang J., Liu L. Ground deformation and permafrost degradation in the source region of the Yellow River. *Remote Sensing*. 2023, vol. 15, no. 12, article 3153. DOI: 10.3390/rs15123153.
18. Andreas B., Luis V. *Sentinel-1 Toolbox. TOPS Interferometry Tutorial*. URL: <https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorialv2.pdf>.
19. Zhang R., Chan S. K., Bindlish R., Lakshmi V. A performance analysis of soil dielectric models over organic soils in alaska for passive microwave remote sensing of soil moisture. *Remote Sensing*. 2023, vol. 15, no. 6, article 1658. DOI: 10.3390/rs15061658.
20. Arkhipov A. G. *Posledniy put' podzemnogo rudnika «Mir»: Issledovanie prichin katastrofy 4 avgusta 2017 g.* [The last path of the mir underground mine: A study of the causes of the August 4], Saint-Petersburg, 2019, 264 p. DOI: 10.25960/7325-1147-5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шейн Николай Сергеевич¹ – ведущий инженер,
 e-mail: shnick@yandex.ru, ORCID: 0009-0000-9413-7590,
 Стручкова Галина Прокопьевна¹ – канд. техн. наук,
 ведущий научный сотрудник, e-mail: pandoram8@list.ru,
 ORCID: 0000-0002-5161-979X,
 Тихонова Сардана Алексеевна¹ – научный сотрудник,
 e-mail: sardankobeleva@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5737-2409,

Капитонова Тамара Афанасьевна¹ — канд. физ.-мат. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru,
ORCID: 0000-0001-8513-032X,

Тарская Лина Егоровна¹ — ведущий инженер,
e-mail: lina.tarskaya@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9040-5110,

¹ ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических
проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.

Для контактов: Шеин Н.С., e-mail: shnnick@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.S. Shein¹, Leading Engineer, e-mail: shnnick@yandex.ru,
ORCID: 0009-0000-9413-7590,

G.P. Struchkova¹, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher,
e-mail: pandoramy8@list.ru, ORCID: 0000-0002-5161-979X,

S.A. Tikhonova¹, Researcher, e-mail: sardankobeleva@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-5737-2409,

T.A. Kapitonova¹, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Leading Researcher,
e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru, ORCID: 0000-0001-8513-032X,

L.E. Tarskaya¹, Leading Engineer, e-mail: lina.tarskaya@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-9040-5110,

¹ V.P. Larionov's Institute of Physical-Technical Problems of the North,
Siberian Branch of the RAS, 677980, Yakutsk, Russia.

Corresponding author: N.S. Shein, e-mail: shnnick@yandex.ru.

Получена редакцией 01.12.2025; получена после рецензии 10.04.2026; принята к печати 10.06.2026.

Received by the editors 01.12.2025; received after the review 10.04.2026; accepted for printing 10.06.2026.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОХОЖДЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ВОДОЗАПОЛНЕННЫЕ ТРЕЩИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЛИЧИНАХ ИХ РАСКРЫТИЯ И ШЕРОХОВАТОСТИ БЕРЕГОВ

(2026, № 2, СБ 5, 20 с.)

Чумаков Андрей Александрович — аспирант, НИТУ МИСИС, e-mail: chumakov.4n@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0006-3697-3527.

Приведены результаты лабораторных исследований по определению зависимости характеристик упругих волн от параметров водозаполненной трещины в отсутствие внешнего водопритока. Результаты показали, что энергия первого вступления продольной волны, пройденной через водозаполненную трещину, зависит от шероховатости поверхностей и раскрытия трещины. Было получено пороговое значение энергии первого вступления, при котором наблюдается изменение типа водопроводимости трещины с диффузионного на гидравлический. Для образцов с разными величинами шероховатости берегов трещины были получены граничные значения раскрытия, при которых наблюдается переход от диффузионного типа водопроводимости к гидравлическому, для этих параметров трещины была определена связь линейного типа и получено регрессионное уравнение этой связи.

Ключевые слова: ультразвук, контроль, трещиноватость, массив горных пород, раскрытие трещины, шероховатость, водопроводимость, энергия первого вступления, упругая волна.

ON THE PECULIARITIES OF ELASTIC WAVE PROPAGATION THROUGH WATER-FILLED FRACTURES WITH VARYING APERTURE AND WALL ROUGHNESS

A.A. Chumakov, Graduate Student, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: chumakov.4n@yandex.ru.

The paper presents the results of laboratory studies on determining the dependence of the characteristics of elastic waves on the parameters of a water-filled crack in the absence of external water inflow. The results showed that the energy of the first longitudinal wave entering a water-filled crack depends on the roughness of the surfaces and the crack's opening. A threshold value of the first-entry energy was obtained, at which the type of water conductivity in the crack changes from diffusion to hydraulic. For samples with different values of the roughness of the crack edges, the boundary values of the crack opening were obtained, at which the transition from the diffusion type of water conductivity to the hydraulic type occurs. A linear relationship was determined for these crack parameters, and a regression equation was obtained.

Key words: ultrasound, monitoring, fracturing, rock mass, fracture opening, roughness, water conductivity, energy of the first entry, elastic wave.