

Научная статья  
УДК 614.841  
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.83.84.010

## Выявление структурных изменений kernового материала при термических воздействиях

*Евгений Юрьевич Трояк*  
*Ирина Николаевна Пожаркова*  
*Татьяна Анатольевна Литвинская*

*Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия*  
*Автор ответственный за переписку: Евгений Юрьевич Трояк, trev191186@mail.ru*

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема пожарной безопасности подземных сооружений, в частности предназначенных для глубинного захоронения радиоактивных отходов. Авторы выдвигают гипотезу о возможности изменения свойств породы при пожарах в горных выработках, что может повлиять на их прочностные характеристики. Основная цель работы — выявить изменения внутреннего строения образцов керна скального массива при температурных воздействиях, характерных для пожаров в подземных сооружениях глубоко заложения. В качестве примера подобного сооружения рассмотрена подземная исследовательская лаборатория, размещение которой планируется в Красноярском крае на участке Енисейский Нижне-Канского массива. Предложено использование результатов численного моделирования процессов тепломассообмена при пожаре в подземной исследовательской лаборатории для обоснования температурных воздействий на образцы керна в ходе натурных экспериментов по исследованию прочностных характеристик материала. На базе расчетной модели в формате FDS выявлен диапазон изменения температуры поверхности ограждений сооружения при пожаре, который составил от 300 °С до 600 °С. Получены рентгенограммы образцов керна горной породы массива архейских гнейсов, нагретых до соответствующих температур с шагом 100 °С. Данными рентгенофазового анализа показано наличие в образцах кварца ( $\text{SiO}_2$ ), альбита ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), биотита ( $\text{KMg}_2\text{FeAlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})$ ) и других минералов, интенсивность пиков которых изменяется в зависимости от температуры нагрева образцов. Графически представлены результаты количественного содержания каждого из идентифицированного минерала в исследуемых образцах.

**Ключевые слова:** пожар, пожарная безопасность, подземная исследовательская лаборатория, керна, горная выработка, горные породы, моделирование пожара, FDS, рентгенофазовый анализ

**Для цитирования:** Трояк Е.Ю., Пожаркова И.Н., Литвинская Т.А. Выявление структурных изменений kernового материала при термических воздействиях // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 1(36). С. 107-116. [https://doi.org/ 10.34987/vestnik.sibpsa.2025.83.84.010](https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.83.84.010)

Original article

## Identification of structural changes in core material under thermal effects

*Evgeniy U. Troyak*

*Irina N. Pozharkova*

*Tatyana A. Litvinskaya*

*Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia*

**Corresponding author:** *Evgeniy U. Troyak, [trev191186@mail.ru](mailto:trev191186@mail.ru)*

**Abstract.** The article discusses the problem of fire safety of underground structures, in particular those intended for the deep burial of radioactive waste. The authors hypothesize that the properties of the rock may change during fires in mining operations, which may affect their strength characteristics. The main purpose of the work is to identify changes in the internal structure of rock core samples under temperature conditions characteristic of fires in deep-laid underground structures. As an example of such a structure, an underground research laboratory is considered, which is planned to be located in the Krasnoyarsk Territory on the Yeniseisky site of the Nizhne-Kansky massif. It is proposed to use the results of numerical modeling of heat and mass transfer processes during a fire in an underground research laboratory to substantiate the temperature effects on core samples during field experiments to study the strength characteristics of the material. Based on the calculated model in the FDS format, a range of changes in the surface temperature of the structure's fences during a fire was revealed, which ranged from 300°C to 600°C. X-ray images of rock core samples from the Archean gneiss massif heated to the appropriate temperatures in increments of 100 °C. The data of x-ray phase analysis showed the presence in the samples of quartz (SiO<sub>2</sub>), albite (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), biotite (KMg<sub>2</sub>FeAlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)) and other minerals, the intensity of peaks of which changes depending on the temperature of the samples. The results of the quantitative content of each of the identified minerals in the studied samples are graphically presented.

**Keywords:** fire, fire safety, underground research laboratory, core, mine workings, rocks, fire modeling, FDS, X-ray phase analysis

**For citation:** Troyak E.Y., Pozharkova I.N., Litvinskaya T.A. Identification of structural changes in core material under thermal effects // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 1(36). С. 107-116. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.83.84.010>

В современном мире подземные сооружения играют важную роль в различных сферах деятельности человека, таких как строительство, транспорт, энергетика, наука и другие. Подземные сооружения могут быть самыми разнообразными: от метро и подземных парковок до складов и промышленных объектов. Они обеспечивают оптимальные условия для размещения объектов инфраструктуры и позволяют более рационально использовать пространство.

Однако, несмотря на все преимущества, подземные сооружения также представляют собой потенциальную опасность в случае возникновения пожара. Это связано с рядом факторов, которые делают пожар в подземных сооружениях более опасным и сложным для тушения, чем пожар в наземных зданиях, среди которых можно выделить:

- Ограниченное пространство и сложная планировка подземных сооружений, что затрудняет эвакуацию людей и доступ пожарных к очагу возгорания.
- Наличие в подземных сооружениях большого количества коммуникаций, способствующих быстрому распространению пламени.
- Уникальные условия вентиляции, которые могут способствовать быстрому распространению дыма и токсичных веществ.
- Возможность обрушения конструкций под воздействием высокой температуры.

Все эти факторы делают пожар в подземных сооружениях более опасным и непредсказуемым, чем пожар в наземных зданиях. Поэтому обеспечение пожарной безопасности подземных сооружений является актуальной задачей, которая требует

комплексного подхода и учета специфики таких объектов, в особенности, если речь идет об обеспечении долговременной безопасности подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), предназначенной для возможного глубинного захоронения радиоактивных отходов [1].

Авторами выдвинута гипотеза о возможности изменения свойств породы при термических воздействиях от пожаров в горных выработках глубокого заложения.

Целью работы, результаты которой представлены в данной статье, являлось выявление изменений внутреннего строения образцов керна при температурных воздействиях, характерных для пожаров в ПИЛ, посредством рентгенофазового анализа (РФА).

Авторами предложена идея использования результатов численного моделирования в программе FDS процессов теплообмена при пожаре в подземной исследовательской лаборатории для обоснования температурных воздействий на образцы керна в ходе натурных экспериментов по исследованию прочностных характеристик материала методом РФА.

Указанный метод анализа минералов является актуальным и позволяет получать важную информацию о химических составах, структурах и свойствах минералов, а также решать практические задачи в различных областях науки и техники. Рентгенометрический метод определения кристаллических веществ по рентгенодифракционным спектрам впервые был разработан в 1938 г. независимо друг от друга Болдыревым А. К. и Михеевым В.И. в СССР и Ханавальтом Дж.Д., Ринном Х.В. и Фревелем П.К. в США. Теоретические положения рентгенофазового анализа изложены в трудах Васильева Е. К., Нахмансона М.М., Горелика С.С., Миркина Л.И., Уманского Я.С. и др. [2–4].

Рентгенофазовый анализ основан на явлении дифракции рентгеновских лучей на кристаллических структурах, которые характеризуются высокоупорядоченным расположением атомов, ионов или молекул в регулярно повторяющихся элементарных ячейках. Каждый атом кристаллической решетки способен рассеивать падающее рентгеновское излучение и, при определённых условиях, между волнами, возникает суммарная амплитуда рассеяния атомами. Для определения условий возникновения дифракционных максимумов, кристалл можно представить как совокупность параллельных атомных плоскостей, равноотстоящих друг от друга. Ориентация атомных плоскостей в кристалле задаётся соответствующими индексами [5].

Рентгеновская дифракция (XRD) широко применяется для исследования различных материалов, включая жидкости, металлы, минералы, полимеры и керамику. Метод обеспечивает неразрушающий и высокоточный анализ [6].

Идентификация основной фазы в смесях минералов представляет собой сложную задачу в РФА. Это связано с тем, что одна и та же линия на рентгенограмме может соответствовать нескольким различным фазам. При этом наиболее ярко проявляются линии тех компонентов смеси, которые преобладают в её составе.

Определение фазового состава смеси начинается с идентификации основной фазы. Для этого на рентгенограмме выделяется линия с наибольшей интенсивностью. Данный подход позволяет упростить анализ и повысить точность определения фазового состава смесей минералов [6].

Для проведения рентгенофазового анализа использовался порошковый дифрактометр Bruker D8 Advance. Управление, сбор и обработка данных осуществлялись с помощью специализированного программного обеспечения [7].

Оптическая схема дифрактометра позволяет размещать плоские образцы в центре гониометра. Это обеспечивает высокую точность и надёжность измерений. Все компоненты прибора интегрированы в единый модуль, а управляющий компьютер расположен вне корпуса.

В исследовании были использованы образцы керна, полученные в результате бурения скважин № 1, 12 и 13 в геологических формациях участка Енисейский в 6 километрах от города Железногорска Красноярского края.

Керн (или керновый материал) – это цилиндрические образцы горной породы или грунта, которые извлекают из забоя скважины при помощи специального оборудования – керноотборного снаряда, функционирующего в процессе вращательного бурения (Рис.1).

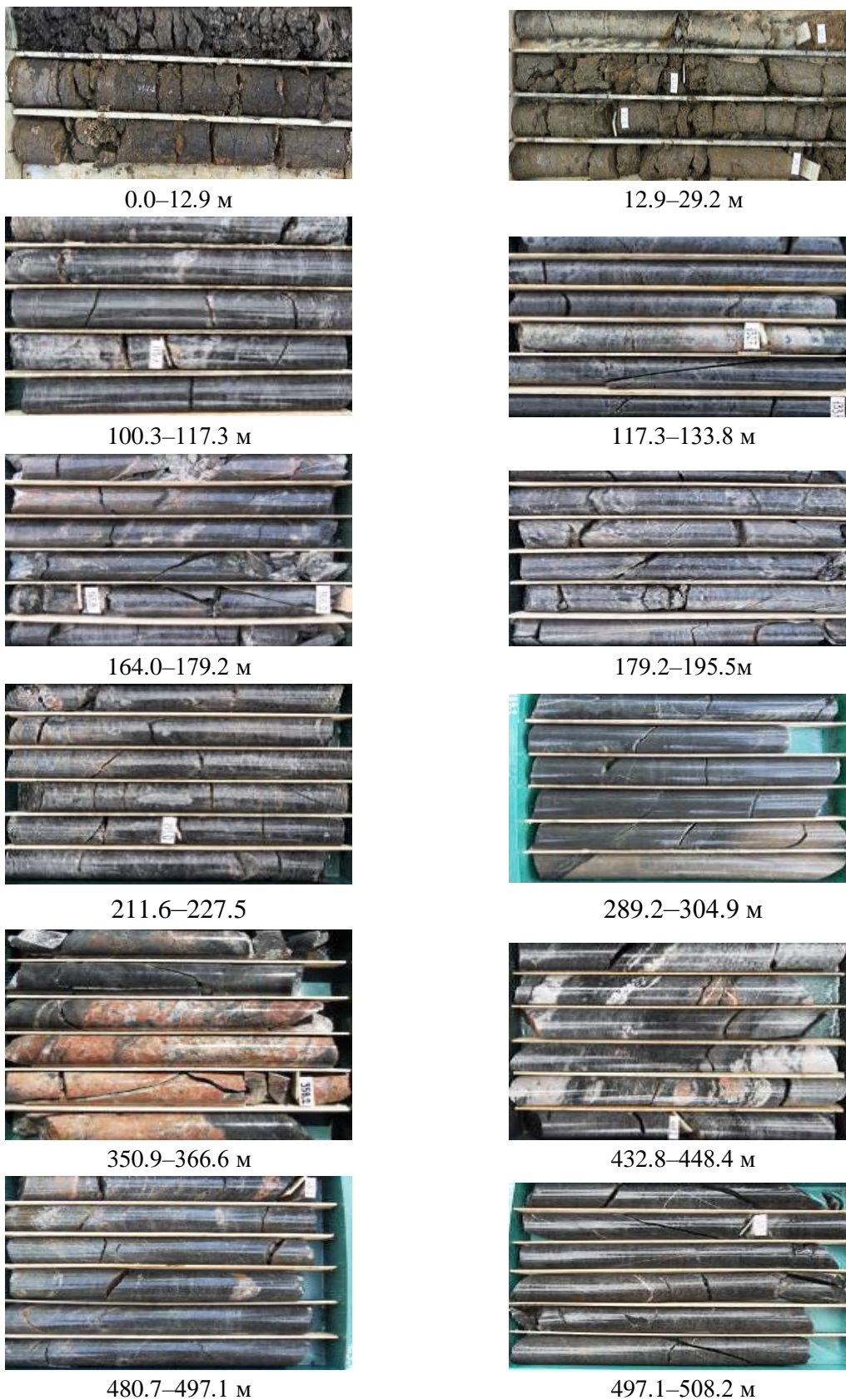


Рис.1. Общий вид керна скважины Р-11 [1]

Для выбора условий нагрева, которому предварительно подвергались образцы керн, подлежащие РФА, были установлены температуры, характерные для пожара в ПИЛ. Данная задача решалась с использованием технологии, описанной в работах [8,9], которая основана на численном моделировании процессов теплообмена в газовой среде и ограждениях ПИЛ при пожаре на базе трехмерной модели сооружения в координатах XYZ. Полномасштабная модель построена с учетом ориентировочных проектных размеров горизонтальной горной выработки ПИЛ (5.95 м x 147 м x 7.25 м), а также глубины ее заложения относительно поверхности (-525 м) [1].

В результате исследования выявлено, что наихудший режим пожара в ПИЛ с точки зрения теплового воздействия на ограждения возникает в условиях ограниченной вентиляции горной выработки [8] при горении индустриального масла, характеризующегося значительной мощностью тепловыделения [9].

Наиболее высокие температуры газа  $T$  (Рис.2.а) и поверхности горной породы  $T_w$  (Рис.2.б,в) (за исключением зоны горения) наблюдаются в области свода ПИЛ, расположенной над очагом пожара, центр которого совпадает с началом координат по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Особенности газообмена в горной выработке обуславливают смещение координаты точки с наибольшей  $T_w$  в положительном направлении вдоль оси  $Y$  (Рис.3.а).

При заданных условиях моделирования наибольшая температура поверхности достигается в момент времени  $t_{min} = 549.6$  с после начала пожара в точке с координатами (0, 0.4, 7.2) (м) и составляет 600 °С (Рис.3.б). Точки поверхности, имеющие температуры 500°С, 400°С, 300°С имеют такие же координаты по осям  $X$  и  $Z$ , а по оси  $Y$  1.4, 2.2, 3.6 (м) соответственно (Рис.2–3).

Следует отметить, что в указанный момент времени на расстоянии более 3.6 м в положительном направлении вдоль оси  $Y$  и более 3.0 м в отрицательном температуры поверхности  $T_w$  свода ПИЛ не превышают значения 300°С, при котором наблюдаются изменения прочностных характеристик керн, согласно проведенным ранее исследованиям [10].

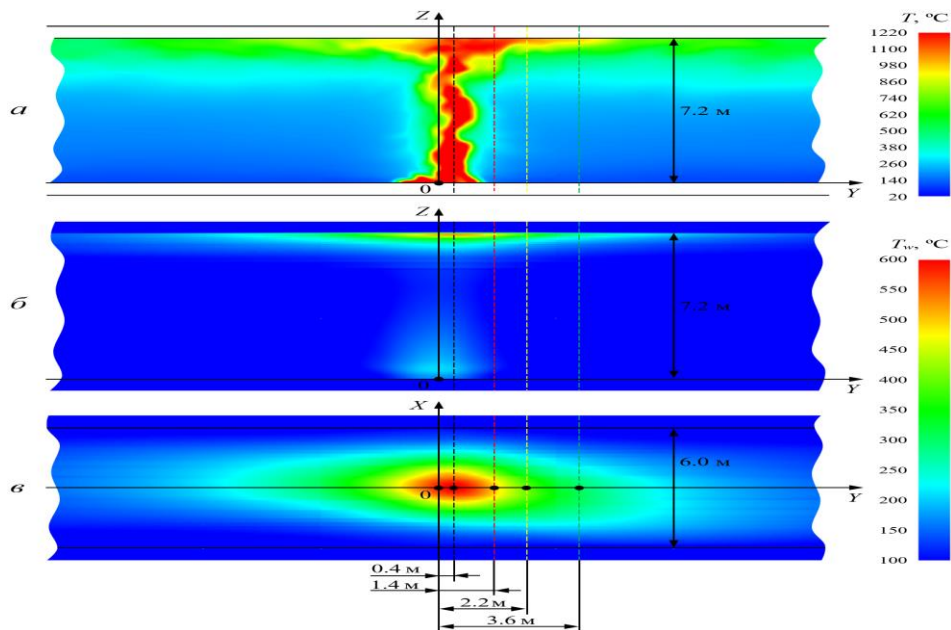


Рис.2. Визуализация результатов численного моделирования тепловых воздействий на ограждения ПИЛ для момента времени 549.6 с после начала пожара: а – поля температуры газовой среды  $T$  в плоскости  $Y0Z$ ; б – проекция на плоскость  $Y0Z$  полей температуры поверхности ограждений ПИЛ  $T_w$ ; в – проекция на плоскость  $X0Y$  полей температуры поверхности ограждений ПИЛ  $T_w$

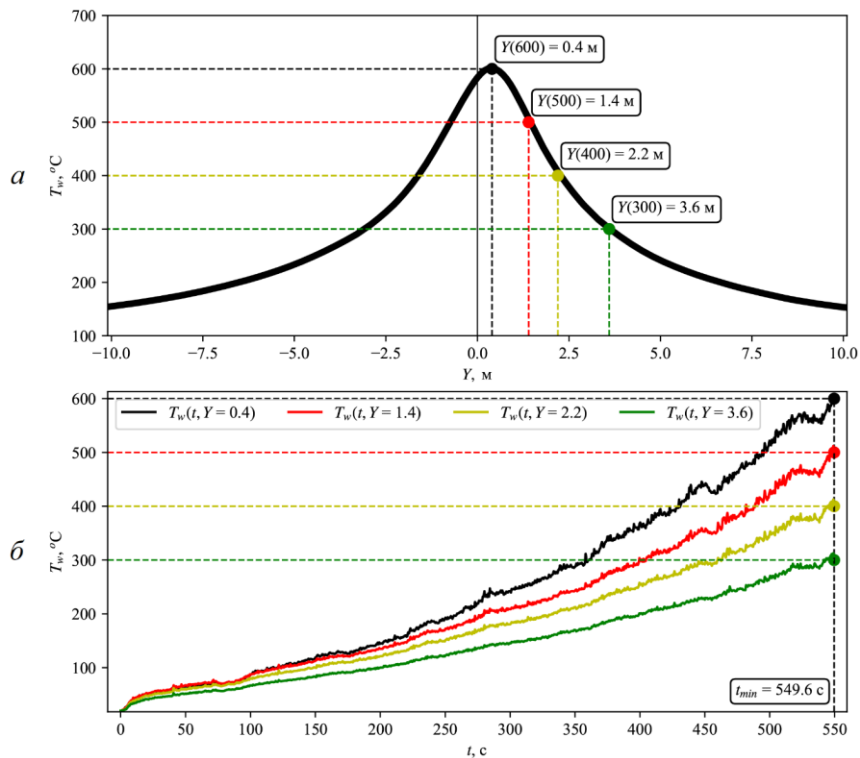


Рис. 3. Графики температуры поверхности ограждений ПИЛ  $T_w$ : а – относительно координаты по оси  $Y$  для момента времени 549.6 с после начала пожара; б – относительно времени  $t$  для точек свода с различными координатами по оси  $Y$

Таким образом, целесообразно изучение методом РФА образцов керна предварительно нагретых до температур в диапазоне 300–600 °С, а затем остуженных до комнатной температуры.

Для проведения исследования керновый материал торцевался в размер, в результате чего конечный образец представлял собой цилиндр с плоскими гранями, диаметром и высотой 60 мм. Глубина отбора кернового материала составляла от 104 до 498 м со скважин Р-1, Р-12 и Р-13 для получения максимально наглядной картины монолитности массива архейских горных пород. Предварительно образцы подвергались термическому воздействию при температурах от 300 °С до 600 °С с шагом 100 °С в течение 30 минут (Табл. 1).

Табл. 1. Сведения об образцах керна

№ образца	№ скважины	Глубина залегания, м	Температура, °С
50	Р-13	487.3	-
36	Р-12	478	300
60	Р-1	251	400
58	Р-13	498	500
17	Р-12	104	600

Для исследования кристаллической структуры образцов керна были подготовлены пробы путём измельчения исходного материала. Фракции имели средний размер кристаллитов в диапазоне 50–100 микрон и объём от 0.2 до 0.5 см<sup>3</sup>. Измельчение осуществлялось с использованием лабораторной ступы, пестика и калибровочного сита.

Рентгенограммы были получены при комнатной температуре с использованием дифрактометра Bruker D8, который оснащён линейным детектором VANTEC и работает в диапазоне углов 8–90 градусов с шагом 0.014 градуса. Скорость накопления данных составила один шаг в секунду. Для анализа результатов использовался метод Ритвельда в программном пакете TOPAS 3. Идентификация фаз проводилась с использованием дифракционной базы данных COD Database.

Интерпретированные данные рентгенограмм образцов 50, 36, 60, 58, 17, представлены на Рис.4.

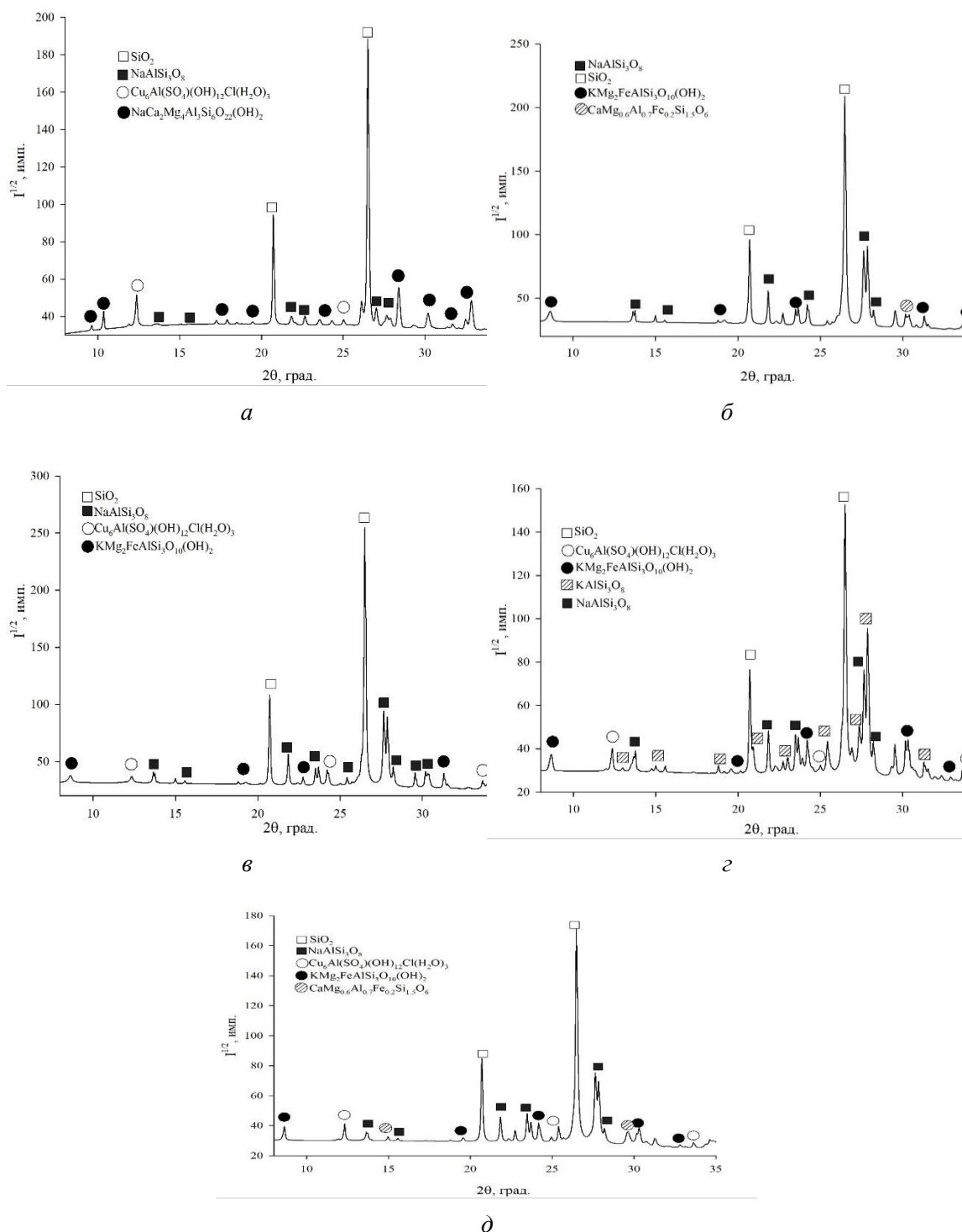


Рис.4. Фрагмент рентгенограммы: а – образец №50 (без температурного воздействия), б – образец №36 (300°C), в – образец №60 (400°C), г – образец №58 (500°C), д – образец №17 (600°C)

Согласно данным рентгенофазового анализа (Рис.4) в структуре всех образцов прослеживаются пики от 26 до 27 град. и интенсивностью от 160 до 270 имп., идентифицируемые как кварц ( $\text{SiO}_2$ ). В образцах также присутствует альбит ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), биотит ( $\text{KMg}_2\text{FeAlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) и другие. Интенсивности пиков варьируются в зависимости

от температуры нагрева образцов, однако прослеживается тенденция к уменьшению интенсивности пика  $\text{SiO}_2$ , и небольшому увеличению интенсивности пика  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ .

Результаты вычислений количественного содержания каждого идентифицированного минерала в исследуемых образцах также подтверждают тезис сокращения присутствия кварца в его первоначальном состоянии (Рис.5).

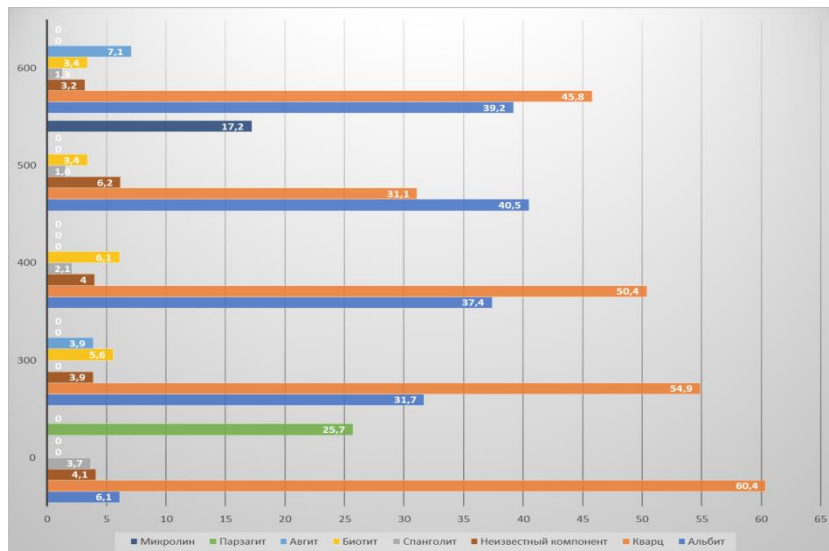


Рис.5. Результаты вычислений количественного содержания минералов в исследуемых образцах

Исходя из полученных в результате экспериментов и расчетов данных, можно сделать ряд выводов:

1) При одном из наихудших с точки зрения теплового воздействия на ограждения сооружения сценариев пожара в подземной исследовательской лаборатории наибольшая температура поверхности достигается в момент времени  $t_{min} = 549.6$  с после начала моделирования и составляет  $600^\circ\text{C}$ .

2) На основе проведенного исследования можно сделать вывод, что термическое воздействие на образцы зерна в диапазоне температур от  $300^\circ\text{C}$  до  $600^\circ\text{C}$  приводит к изменениям в кристаллической структуре горных пород.

3) Рентгенофазовый анализ показал наличие в образцах кварца ( $\text{SiO}_2$ ), альбита ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), биотита ( $\text{KMg}_2\text{FeAlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})$ ) и других минералов, интенсивность пиков которых изменяется в зависимости от температуры нагрева образцов.

4) Наблюдается тенденция к уменьшению интенсивности пика кварца ( $\text{SiO}_2$ ) и небольшому увеличению интенсивности пика альбита ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) при повышении температуры нагрева.

Результаты вычислений количественного содержания минералов подтверждают тезис о сокращении присутствия кварца в его первоначальном состоянии при термическом воздействии.

### Список источников

1. Материалы обоснования лицензии на сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории (включая предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду). Т.1 // ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»: сайт. – URL: [https://www.norao.ru/upload/docs/%D0%9C%D0%9E%D0%9B\\_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201.pdf](https://www.norao.ru/upload/docs/%D0%9C%D0%9E%D0%9B_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201.pdf) (дата обращения 01.02.2025).



2. Васильев Е.К. Качественный рентгенофазовый анализ: [монография] / Васильев Е.К., Нахмансон М.С., отв. ред. Брандт С.Б., Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т земной коры. – Новосибирск: Наука, – 1986. – С. 197.
3. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: Metallurgiya, – 1970.
4. Уманский Я.С. Рентгенография металлов и полупроводников. М.: Metallurgiya, – 1969. – С. 496.
5. Рентгенофазовый анализ: методические указания по дисциплине «Физико-химические методы исследования». Сост. Пименова Л.Н. – Томск: Изд-во. Том. архит.-строит. ун-та. – 2005. – С. 14.
6. Кузнецова Г.А. Качественный рентгенофазовый анализ. Методические указания. – Иркутск: Изд-во ИГУ. – 2005. – С. 28.
7. Дифрактометр рентгеновский BRUKER D8 ADVANCE [Электронный ресурс] URL: <https://pharma-se.ru/products/difraktometr-rentgenovskiy/difraktometr-rentgenovskiy-bruker-d8-advance/> (дата обращения 01.02.2025).
8. Пожаркова И.Н. Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования // Пожаровзрывобезопасность. – 2024. – Т. 33. – №. 4. – С. 22–35.
9. Пожаркова И.Н. Технология оценки прогрева горной породы при пожаре в подземной исследовательской лаборатории // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12, № 9. – С. 71–83.
10. Трояк Е.Ю., Пожаркова И.Н., Литвинская Т.А., Озерский Д.А. Термогравиметрический анализ образцов керна скважин подземной исследовательской лаборатории // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – № 5(57). – С. 61–66. – DOI 10.25699/SSSB.2024.57.5.009.

## References

1. Materials to justify the license for the construction of a radioactive waste storage facility not related to nuclear installations, created in accordance with the design documentation for the construction of final isolation facilities for radioactive waste (Krasnoyarsk Territory, Nizhne-Kansky massif) as part of an underground research laboratory (including preliminary materials for assessing the impact on the environment Wednesday). Vol. 1. FSUE «National Operator for Radioactive Waste Management»: website. – URL: [https://www.norao.ru/upload/docs/%D0%9C%D0%9E%D0%9B\\_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201.pdf](https://www.norao.ru/upload/docs/%D0%9C%D0%9E%D0%9B_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201.pdf) (date of the application: 01.02.2025).
2. Vasiliev E.K. Qualitative X-ray phase analysis: [monograph] / Vasiliev E.K., Nakhmanson M.S., ed. by Brandt S.B., Academy of Sciences of the USSR, Siberian Branch, Institute of the Earth's Crust. Novosibirsk: Nauka Publ., – 1986, – pp 197.
3. Gorelik S.S., Rastorguev L.N., Skakov Yu.A. Roentgenograficheskiy i elektronno – opticheskiy analiz [X-ray and electron-optical analysis], Moscow: Metallurgiya, – 1970.
4. Umansky Ya.S. Roentgenografiya metallov i poluprovodnikov [Radiography of metals and semiconductors], Moscow: Metallurgiya. – 1969. – pp 496.
5. Roentgenofazoviy analiz: metodicheskie napravleniya po discipline "Fiziko-khimicheskie metody research". Comp. Pimenova L.N.-Tomsk: Publishing House. Tom. archit. - builds. univ. – 2005. – pp 14.
6. Kuznetsova G.A. Qualitative X-ray phase analysis. Methodological guidelines. Irkutsk: ISU Publishing House. – 2005. – pp 28.
7. Bruker d8 advance X-ray diffractometer [Electronic resource] URL: <https://pharma-se.ru/products/difraktometr-rentgenovskiy/difraktometr-rentgenovskiy-bruker-d8-advance/> / (accessed 01.02.2025).
8. Pozharkova I.N. Investigation of the temperature regime of a fire in an underground research laboratory based on numerical modeling // Fire and explosion protection. – 2024. – Vol. 33. – №. 4. – pp. 22–35.
9. Pozharkova I.N. Tekhnologiya otsenki zagreva gornoy porody pri pozhare v podzran'noy issledovatel'noy laboratorii [Technology for assessing the heating of rocks during a fire in an

underground research laboratory]. International Journal of Open Information Technologies. 2024. – Vol. 12, №. 9. – pp. 71–83.

10. Troyak E.Yu., Pozharkova I.N., Litvinskaya T.A., Ozersky D.A. Thermogravimetric analysis obraztsov kern boreholes of underground research laboratory // Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik. – 2024. – № 5(57). – pp. 61–66 – DOI 10.25699/SSSB.2024.57.5.009.

Информация об авторах

Е.Ю. Трояк – кандидат педагогических наук, доцент

И.Н. Пожаркова – кандидат технических наук, доцент

Information about the author

E.Y. Troyak – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

I.N. Pozharkova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.02.2025, одобрена после рецензирования 26.02.2025, принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 04.02.2025, approved after reviewing 26.02.2025, accepted for publication 20.03.2025.