

Инфракрасная диагностика геомеханических процессов в горных выработках, обусловленных природными и техногенными факторами

Д. И. Блохин✉

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва,

Российская Федерация

✉ dblokhin@yandex.ru

Резюме. Излагаются методика и результаты экспериментальных исследований, выполняемых для обоснования эффективности использования терморadiационных (ИК-радиометрических) измерений для диагностики изменений напряженного состояния массивов во времени. Описаны испытания образцов геоматериалов при различных режимах нагружения в условиях одноосного сжатия, выполнявшиеся с синхронной регистрацией изменений параметров терморadiационных сигналов и данных тензометрии. Описана конструкция «крупномасштабного» стенда для знакопеременного нагружения относительно большого ($\approx 0,35 \text{ м}^3$) объема грунта. Изменения во времени напряженного состояния в призабойной зоне скважины, устроенной в модели грунтового массива, регистрируются с помощью синхронных записей сигналов ИК-радиометра и установленных внутри нагружаемого объема тензометрических элементов (мессдоз). Продемонстрирована достоверность оценки изменений напряжений в массиве грунта во времени по данным ИК-радиометрии. С физической точки зрения полученные результаты показывают, что фиксируемые термодинамические процессы, сопутствующие деформированию грунтового массива, с достаточной точностью можно считать адиабатическими, то есть в условиях, моделирующих реальные натурные измерения, выполняется основная физическая предпосылка эффективности терморadiационной диагностики. Результаты экспериментов указывают на возможность использования комплексных геофизических измерений в системах мониторинга реальных геомеханических событий.

Ключевые слова: горные породы, напряжения, деформации, диагностика, тепловое излучение, тензометрия

Для цитирования: Блохин Д. И. Инфракрасная диагностика геомеханических процессов в горных выработках, обусловленных природными и техногенными факторами. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(6):26-31. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-26-31>.

Infrared diagnostics of geomechanical processes in mining workings caused by natural and man-made factors

D. I. Blokhin✉

National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation

✉ dblokhin@yandex.ru

Abstract. The methodology and results of experimental studies performed to substantiate the effectiveness of using thermoradiological (IR-radiometric) measurements to diagnose changes in the stress state of arrays over time are described. The tests of geomaterial samples under various loading conditions under uniaxial compression conditions are described, which were performed with synchronous registration of changes in the parameters of thermal radiation signals and strain gauge data. The design of a “large-scale” stand for alternating loading of a relatively large ($\approx 0.35 \text{ m}^3$) volume of soil is described. Changes in the stress state over time in the bottomhole zone of the “well”, arranged in a model of a soil massif, are recorded using synchronous recordings of IR radiometer signals and strain gauge elements installed inside the loaded volume. The reliability of estimating stress changes in the “array” of soil over time according to IR radiometry data is demonstrated. From a physical point of view, the obtained results show that the recorded thermodynamic processes accompanying the deformation of the soil “massif” can be considered adiabatic with sufficient accuracy, i.e. in conditions simulating real field measurements, the basic physical prerequisite for the effectiveness of thermoradiological diagnostics is fulfilled. The experimental results indicate the possibility of using complex geophysical measurements in monitoring systems for real geomechanical events.

Keywords: rocks, stresses, deformations, diagnostics, thermal radiation, strain gauge

For citation: Blokhin D. I. Infrared diagnostics of geomechanical processes in mining workings caused by natural and man-made factors. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(6):26-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-26-31>.

Введение

Современное горное производство характеризуется увеличением глубины разработки месторождений полезных ископаемых, вовлечением в эксплуатацию запасов, находящихся в сложных горногеологических условиях, что обуславливает проявления геомеханических процессов в разнообразных катастрофических формах (горные удары, техногенные землетрясения, массовые обрушения, выбросы пород и газа и т. п.), приводящих к большому экономическому и социальному ущербу. Для достоверной оценки и прогноза характера протекания таких процессов наиболее эффективно использование методов геоконтроля, в основу которых положены физические модели, однозначно связывающие регистрируемые физические параметры с определяемыми вариациями механических величин [1–4].

Одним из таких активно развиваемых методов является терморadiационная бесконтактная диагностика (инфракрасная (ИК) радиометрия) [5–9], интерпретация результатов которой основана на использовании известных термомеханических эффектов: изменения температуры твердого тела при ее адиабатическом деформировании (термоупругий и термопластический эффекты) [10], а также зависимости интенсивности инфракрасного излучения с поверхности тела от температуры [11]. Преимущество ИК-измерений перед другими экспериментальными способами исследования изменений напряженного состояния – бесконтактность, что делает их применимыми в условиях, когда измерить изменения напряжений с помощью других способов трудно или практически невозможно, например в призабойных зонах глубоких скважин.

Цель исследований: разработка методических подходов и измерительных средств диагностики геомеханического состояния породных массивов по записям сигналов инфракрасного излучения, сопутствующего процессам деформирования и разрушения геоматериалов.

Материал и методы исследования

В классических опытах Джоуля, Вебера и других, выполненных в середине XIX века, было показано, что при адиабатическом растяжении твердого тела с положительным коэффициентом термического расширения температура понижается, а при сжатии – возрастает [10]. В литературе указанное явление на стадии линейного деформирования носит название термоупругого эффекта, а при уровне напряжений, превышающем предел упругости, – термопластического эффекта [10].

Хорошим приближением в описании термоупругого эффекта является формула Кельвина [10]

$$\Delta T = \frac{\alpha}{\rho C_p} \cdot T_0 \cdot \Delta P, \quad (1)$$

где T_0 и ΔT – начальная температура тела и ее изменение при нагружении;

ΔP – изменение первого инварианта тензора напряжений;
 α – линейный коэффициент термического расширения;
 C_p – удельная (на единицу объема) теплоемкость.

Возможность получения информации о $d\Pi(t)$ по измерениям $dT(t)$ представляется очевидной, однако ее реализация для геоматериалов затруднена тем, что значения $dT(t)$ имеют порядок 0,001 К. Кроме того, условия реальных геомеханических и геофизических экспериментов не позволяют использовать стандартные методы температурных измерений, особенно при измерениях в грунтах.

В описываемой методике применяется принцип бесконтактного измерения малых вариаций температуры, основанный на известной зависимости мощности ИК-излучения с поверхности тела от ее температуры $W(T) = \epsilon_r \sigma T^4$ ($\epsilon_r < 1$ – коэффициент излучательной способности, σ – постоянная Стефана – Больцмана) [6]. Малость $dT(t) / T_0$ позволяет линеаризовать последнее соотношение и связать вариации мощности потока $dW(T)$ со значениями $dT(t)$ пропорциональной зависимостью с коэффициентом $A_c = \epsilon_r \sigma T_0^3$.

Предполагая далее пропорциональность вариаций результатов ИК-измерений $dU(T)$ вариациям $dW(T)$ с коэффициентом A_r , зависящим от параметров аппаратуры, и используя (1), получаем

$$d\Pi(t) = A^{-1} dU(t), \quad (2)$$

где $A = A_m A_c A_r$, В/Па.

Для обоснования данного предположения и выявления границ его применимости при различных режимах изменения нагрузки во времени проводились серии экспериментов с мелко- и крупномасштабными образцами геоматериалов на лабораторных стендах, включающих в себя как устройство нагружения, так и многоканальную систему измерения, преобразования и автоматической передачи регистрируемых данных в компьютер.

Специально разработанное программное обеспечение позволяет наблюдать эволюцию регистрируемых сигналов в режиме реального времени, а также сохранять полученный массив данных в виде текстового файла. Описываемая экспериментальная установка позволяет осуществлять различные воздействия (схемы нагружений) и синхронно регистрировать отклики геоматериалов на эти воздействия как на основе ИК-измерений, так и с помощью стандартных тензометрических измерений. В качестве первичного приемника потока инфракрасного излучения в описываемых измерениях использовался промышленно выпускаемый детектор РТН-31 [12], который представляет собой термобатарею, составленную из последовательно соединенных высокочувствительных термопар, нанесенных на плату методом вакуумного напыления. Детектор работает на основе преобразования энергии потока теплового излучения, падающего на приемную площадку термоэлемента в термо-ЭДС, пропорциональную величине потока излучения.

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.

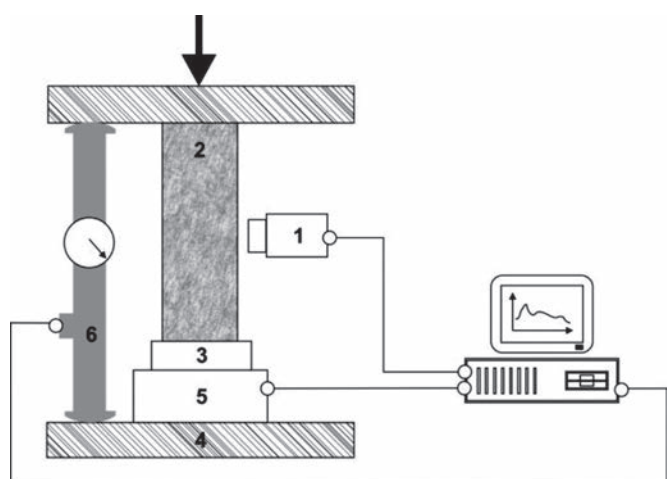


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда /
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental stand

Датчик ИК-излучения (1) устанавливается примерно в середине высоты образца (2) на расстоянии 0,5–1 см от его поверхности. Между пластинкой (3), на которую опирается образец, и плитой (4) устанавливается тензометрический элемент (5) для измерения изменений приложенного к образцу усилия. В состав измерительной установки также включен индикатор продольной деформации (6), находящийся между плитой (4) и подвижной траверсой пресса.

Ниже описываются экспериментальные исследования проявлений термомеханических эффектов в геоматериалах, подвергаемых различным режимам механического нагружения.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим результаты экспериментов, в которых образец мрамора подвергался квазипериодическим воздействиям с характерными частотами в диапазоне 0,5–5 Гц. Записи значений выходных сигналов, получаемых с ИК-радиометра $V_w(t)$ и от тензометра $V_m(t)$, соответствующие одному из проведенных испытаний, показаны на рисунке 2.

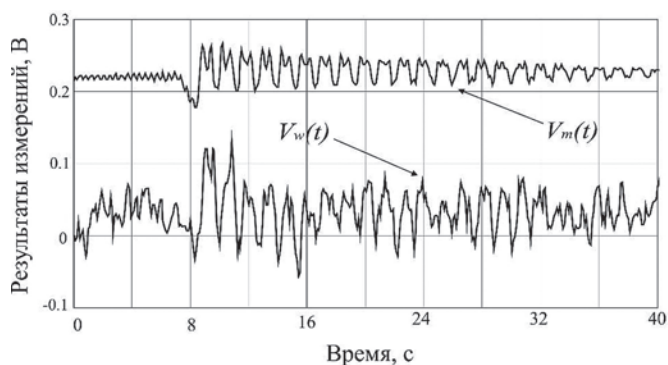


Рис. 2. Исходные записи результатов измерений (в вольтах) при исследованиях на малом образце горной породы (мрамора), подвергаемом квазипериодическому нестационарному одноосному нагружению /
Fig. 2. Initial records of measurement results (in volts) during studies on a "small" rock sample (marble) subjected to quasi-periodic nonstationary uniaxial loading

Для вычисления оценок изменений во времени первого инварианта тензора напряжений $d\Pi_w(t)$ и $d\Pi_m(t)$ (МПа) соответственно по зависимостям $V_w(t)$ и $V_m(t)$ использовались переходные коэффициенты, величины которых определялись по данным тарировки, проводившейся перед каждой серией экспериментов.

Для количественного описания экспериментальных данных, выделения из них полезной составляющей и ее обработки привлекались методы спектрального анализа (Фурье и вейвлет-представления) [13]. При этом выполнялась коррекция обрабатываемых временных последовательностей с учетом их существенной нестационарности. Сравнение зависимостей напряжений от времени, определенных на основе сигнала ИК-радиометра, с зависимостями, полученными на основе данных тензометрических измерений, производилось с учетом результатов вычисления оценок их вероятностных характеристик.

На рисунке 3 показаны графики определенных после упомянутой корректировки исходных записей оценок, зависящих от частоты ν спектральных плотностей $H_{\Pi w}(\nu)$ и $H_{\Pi m}(\nu)$ соответствующих зависимостей $d\Pi_w(t)$ и $d\Pi_m(t)$.

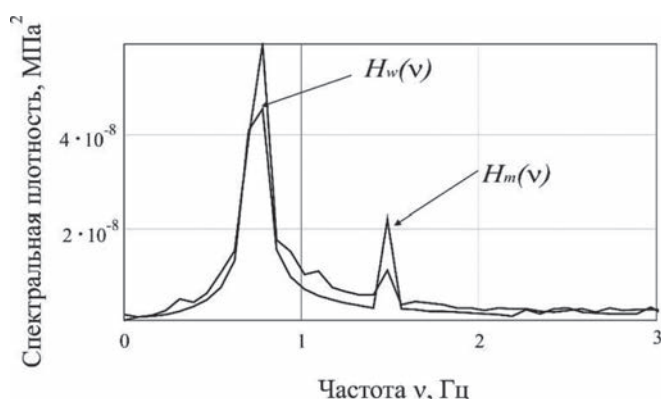


Рис. 3. Спектральные плотности вариаций напряжений $d\Pi_w(t)$ и $d\Pi_m(t)$, по данным с тензодатчика $H_{\Pi m}(\nu)$ и с ИК-радиометра $H_{\Pi w}(\nu)$, МПа² × с /
Fig. 3. Spectral densities of voltage variations $d\Pi_w(t)$ and $d\Pi_m(t)$, according to data from the strain gauge $H_{\Pi m}(\nu)$ and from the IR radiometer $H_{\Pi w}(\nu)$

Видно, что спектральные плотности $H_{\Pi w}(\nu)$ и $H_{\Pi m}(\nu)$ весьма похожи. Так, спектральный состав ИК-сигнала соответствует с учетом наличия в нем шумовых компонентов спектральному составу эталонного тензометрического сигнала, а для достаточно больших уровней напряжений амплитуды колебаний этих двух сигналов оказываются пропорциональными. Примерно такая же похожесть вероятностных характеристик обнаруживается и в других проведенных опытах.

В ходе инициированных этими работами исследований были поставлены более общие методические задачи. В частности, рассматривалась возможность расширения диапазона использования ИК-диагностики при неадиабатических условиях деформирования и значениях нагрузок, приближающихся к предразрушающим и разрушающим величинам. Для обоснования возможности использования терморadiационных измерений для диагностики процессов деформирования горных пород при значениях нагрузок, приближающихся к предразрушающим и разрушающим величинам, проводились эксперименты на образцах геоматериалов различных типов.

На рисунке 4 для одного из испытуемых образцов (бетон с крупным заполнителем из гранитного щебня) представлены зависимости от времени сигналов тензоэлемента и датчика ИК-излучения. Сжатие образца осуществлялось с заданным шагом возрастания нагрузки. Анализ полученных записей сигналов позволяет выявить некоторые особенности деформирования исследуемого образца.

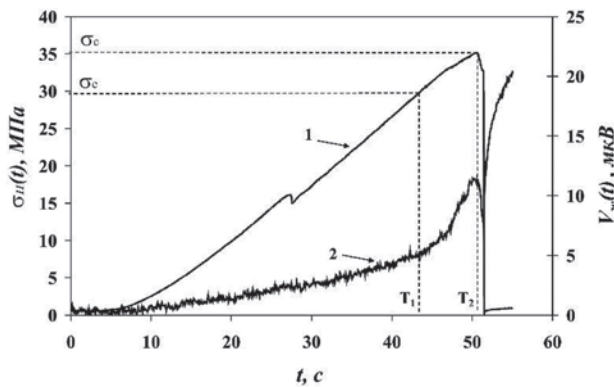


Рис. 4. Зависимости от времени осевого напряжения $\sigma_{11}(t)$ (1) и интенсивности ИК-излучения $V_w(t)$ (2) при испытаниях образца бетона при $d\sigma_{11}/dt = \text{const} = 0,7 \text{ МПа/с}$ /
Fig. 4. Dependences on the axial stress time $\sigma_{11}(t)$ (1) and the intensity of the IR radiation $V_w(t)$ (2) when testing a concrete sample at $d\sigma_{11}/dt = \text{const} = 0,7 \text{ МПа/с}$

Так, при монотонном возрастании нагрузки в четко фиксируемой по виду графика ИК-сигнала точке $T_1 \approx 44 \text{ с}$ (рис. 4, кривая 2) происходит резкое возрастание значений интенсивности ИК-излучения по сравнению с областью линейной термоупругости.

При возрастании уровня нагрузки, когда деформации материала образца выходят за пределы упругости, внутри него начинают развиваться нелинейные диссипативные процессы, в условиях которых возрастание температуры и, соответственно, приращения интенсивности ИК-излучения оказываются более значимыми, чем при упругом режиме.

Понятно, что момент времени T_2 , соответствующий изменению наклона этого графика, соответствует пределу упругости образца σ_e . Указанный нелинейный участок, соответствующий деформациям образца за пределом упругости, заканчивается в момент $T_2 \approx 51 \text{ с}$ с резким падением значений интенсивности теплового излучения, которое соответствует разуплотнению образца при его дезинтеграции. Сопоставляя графики изменений нагрузки и интенсивности ИК-излучения, можно сделать вывод, что момент, в который наступает указанный выше обрыв графика ИК-сигнала, соответствует пределу прочности образца σ_c .

Полученные на малых лабораторных образцах результаты позволили сделать вывод, что ИК-радиометрия может быть эффективно применена в системах обнаружения происходящих в породных массивах природных и техногенных механических процессов, при этом на ранних, допредельных, стадиях их развития.

Другой результат, открывающий уникальные возможности геомониторинга механических процессов в массивах слабых несвязных грунтов, – показанная на достаточно крупномасштабной модели возможность бесконтактного контроля изменений напряжений на забое скважины, устроенной в массиве такого грунта.

Для знакопеременного нагружения объемов грунта был сконструирован лабораторный стенд (рис. 5), на котором благодаря увеличению размеров области испытаний можно устраивать в обследуемом объеме модельную скважину и выполнять измерения, дающие информацию о вариациях напряжений у ее забоя и внутри массива. При изменениях вертикальной нагрузки на установленный на поверхности объема штамп происходят изменения напряженного состоя-

ния грунта как во всем объеме, так и в окрестности скважины и на поверхности ее забоя.

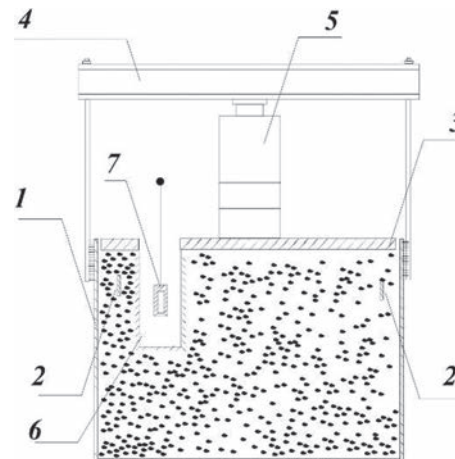


Рис. 5. Схема испытательного стенда и расположения датчиков:
1 – цилиндрический лоток;
2 – мессдозы; 3 – распределительный штамп; 4 – упорная рама;
5 – гидравлический домкрат;
6 – скважина; 7 – забой; 8 – ИК-радиометр /

Fig. 5. Diagram of the test bench and the location of the sensors:
1 – cylindrical tray; 2 – messdoses;
3 – distribution stamp; 4 – thrust frame; 5 – hydraulic jack; 6 – well;
7 – bottom hole; 8 – IR radiometer

В экспериментах контрольные измерения вариаций горизонтальных напряжений в массиве вне зоны влияния скважины выполнялись с использованием мессдоз. Соответствующие им изменения напряженного состояния грунта на забое скважины регистрировались с помощью ИК-радиометра, который свободно подвешивается по оси скважины так, что его первичный преобразователь располагается на высоте 1...6 см от забоя. Чередующиеся циклы нагружения и разгрузки, инициируемые соответствующими изменениями давления в гидравлическом домкрате, начинаются через 8...10 с после начала регистрации сигналов и повторяются 1–5 раз в течение $T \approx 100 \text{ с}$. Характерные примеры записей значений выходных сигналов, получаемых в результате прохождения первичных сигналов ИК-радиометра ($V_w(t)$) и тензометров ($V_{m1}(t)$ и $V_{m2}(t)$) через измерительно-вычислительный тракт, показаны на рисунке 6.

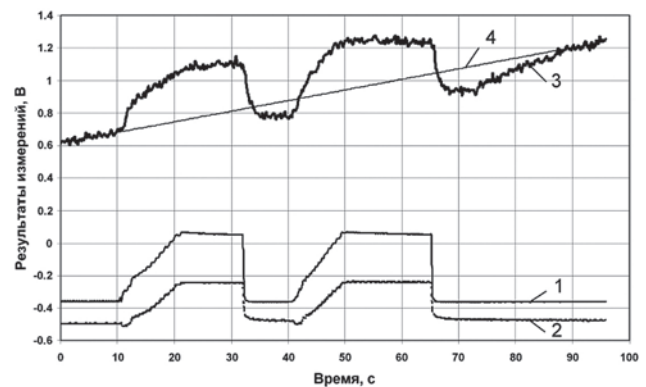


Рис. 6. Экспериментальные результаты измерений выходных сигналов тензометрии (мессдозы) $V_{m1}(t)$ и $V_{m2}(t)$ (1, 2) и ИК-радиометрии $V_w(t)$ (3), а также трендовая составляющая $F_t(t)$ (4) функции $V_w(t)$ /
Fig. 6. Experimental results of measurements of the output signals of strain gauge (messdose) $V_{m1}(t)$ and $V_{m2}(t)$ (1, 2) and IR radiometry $V_w(t)$ (3), as well as the trend component $F_t(t)$ (4) of the function $V_w(t)$

При обработке результатов ИК-измерений и нахождения по ним количественной оценки вариаций напряжений, действующих на забое скважины, учитывается наличие в полученных временных зависимостях низкочастотной трендовой составляющей, появление которой обусловлено изменениями внешних условий. Трендовая составляющая $F_r(t)$ функции $V_w(t)$ оценивается ее прямолинейной аппроксимацией через начальный (до первого нагружения) и конечный (через 10–20 с после снятия нагрузки) участки (см. рис. 5). При дальнейшем анализе данных измерений вместо $V_w(t)$ рассматривалась функция $U_w(t) = V_w(t) - F_r(t)$, практически не зависящая от тренда.

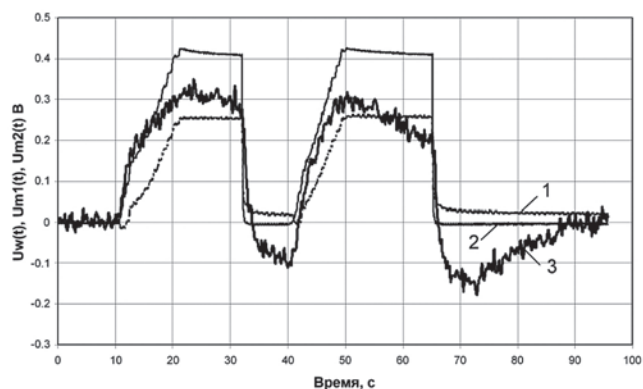


Рис. 7. Модифицированные временные зависимости выходных сигналов тензометрии

$U_{m1}(t)$ и $U_{m2}(t)$ (1, 2) и ИК-радиометрии $U_w(t)$ (3) /
Fig. 7. Modified time dependences of the output signals of strain gauge
 $U_{m1}(t)$ and $U_{m2}(t)$ (1, 2) and IR radiometry $U_w(t)$ (3)

Графики, представленные на рисунке 7, иллюстрируют качественную идентичность результатов измерений вариаций мощности ИК-излучения вариациям параметров напряженного состояния в грунте, однозначно определяющих соответствующие вариации напряжений в той зоне (забой скважины), где выполняются ИК-измерения. Таким

образом, на большом объеме грунта показана возможность достоверного определения качественных (моменты изменений напряженного состояния массива) и количественных (знаки и величины скачков) параметров процесса изменений напряжений во времени на основе бесконтактных ИК-измерений.

Выводы

Проведенные исследования показывают применимость данной методики для идентификации механических процессов в массивах горных пород.

К числу основных практических задач, для решения которых с успехом могут быть использованы результаты ИК-радиометрических измерений, относятся:

1) оперативный контроль за динамикой зон разгрузки в массиве при экспериментальных исследованиях напряженного состояния массива и выполнении горнопроходческих и очистных работ.

2) оперативный контроль за динамикой деформационных процессов в эксплуатируемых подземных выработках, обеспечивающий своевременное выполнение мероприятий по стабилизации работы сооружения и позволяющий избежать возможные аварии.

Так, например, использование ИК-радиометрических измерений в составе автоматизированной системы поддержки технологических решений и комплексного синтезирующего мониторинга (АС ППТР и КСМ) позволило оценить реальные диапазоны изменения напряжений в угольном пласте (шахта им. С. М. Кирова ОАО «СУЭК Кузбасс») при выемочных работах и выявить характер изменений нагрузок во времени [14, 15].

Практическое применение ИК-радиометрии для полевых измерений вариаций напряженного состояния массивов грунтов может расширить возможности экспериментальных наблюдений за происходящими в них динамическими и сейсмическими процессами, стать существенно-информативным дополнением к традиционно используемым геофизическим методам оценки изменений их напряженного состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCE

1. Курленя М.В., Опарин В.Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. Новосибирск, 1999: 328.
Kurlenya M.V., Oparin V.N. Borehole geophysical methods for diagnostics and control of the stress-strain state of rock formations. Novosibirsk, 1999: 328. (In Russ.).
2. Bepal'ko A.A., Dann D.D., Petrov M.V., et al. Electromagnetic methods for testing changes in stress-strain state of dielectric materials. *Russian Journal of Nondestructive Testing*; 2021; 57 (10): 865-876. <https://doi.org/10.1134/S1061830921100028>.
3. Простов С.М., Разумов Е.Е., Мулев С.Н. и др. Обоснование критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации естественного электромагнитного излучения на шахтах Кузбасса. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022; 333 (12): 99-110. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3831>.
Prostov S.M., Razumov E.E., Mulev S.N., et al. justification of criteria for local prediction of impact safety by registering natural electromagnetic radiation at the mines of AO "SUEK-Kuzbass". *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022; 333 (12): 99-110. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3831>.
4. Баженова Е.А. Применение геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в комплексе со стандартными методами геофизических исследований для выявления зон геодинамической активности в рудных скважинах. *Литосфера*. 2025; 25 (3): 644-655. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-644-655>.
Bazhenova E.A. Application of geoaoustic emission and electromagnetic radiation in combination with standard geophysical research methods to identify geodynamic activity areas in ore boreholes. *Lithosphere*. 2025; 25 (3): 644-655. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-644-655>.
5. Блохин Д.И., Иванов П.Н., Дудченко О.Л. Экспериментальное исследование термомеханических эффектов в водонасыщенных известняках при их деформировании. *Записки Горного института*. 2021; 247: 3-11. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.1>.
Blokhin D.I., Ivanov P.N., Dudchenko O.L. Experimental study of thermomechanical effects in water-saturated limestones during their deformation. *Journal of Mining Institute*. 2021; 247: 3-11. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.1>.

6. Huang J., Yu M., Zhang C., et al. Quantitative spatial analysis of thermal infrared radiation temperature fields by the standard deviational ellipse method for the uniaxial loading of sandstone. *Infrared Physics & Technology*. 2022; 123: 104150. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104150>.
7. Jaiswal M., Sebastian R., Mulaveesala R. Thermal monitoring and deep learning approach for early warning prediction of rock burst in underground structures. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2024; 57 (10): 105502. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad11bb>.
8. Cao K., Yuan Q., Xie G., et al. Infrared Radiation Characteristics During Crack Development in Water-Bearing Sandstone. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021; 58 (3): 209-214. <https://doi.org/10.1007/s11204-021-09730-2>.
9. Cao G., Ma L., Guo Z., et al. Exploring the evolution of infrared radiation characteristics in coal bodies under water pressure during tunnel excavation. *Infrared Physics & Technology*. 2025. 145: 105665. DOI 10.1016/j.infrared.2024.105665.
10. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел: Т. 2. Москва, 1969: 863.
Nadai A. Plasticity and destruction of solids, Vol. 2. Moscow, 1969:863. (In Russ.).
11. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. Москва, 1978: 400.
Kriksunov L.Z. Handbook on the Basics of Infrared Technology. Moscow, 1978: 400. (In Russ.).
12. Ильин А.С. Термоэлектрические приемники оптического излучения с пленочными и проволочными термопарами для прецизионных измерений. *Метрология*. 2005; (11): 19-30. Ilyin A.S. Thermoelectric Receivers of Optical Radiation with Film and Wire Thermocouples for Precision Measurements. *Metrology*. 2005; (11): 19-30. (In Russ.).
13. Бахтина А.С., Блохин Д.И., Шейнин В.И. Непрерывное вейвлет-разложение как средство повышения информативности спектрального анализа данных физических измерений в системах геоконтроля. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009; (3): 124-130
Bakhtina A.S., Blokhin D.I., Sheinin V.I. Continuous wavelet-decomposing as means of increasing the informativeness of spectral analysis made on the physic measurement data in the geological control systems. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2009; (3): 124-130. (In Russ.).
14. Кубрин С.С. Разработка геотехнологического кластера безопасного освоения опасных по гео- и газодинамическим явлениям угольных пластов. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013; (S5): 68-84.
Kubrin S.S. cluster development geotechnological safe development of dangerous on geo- and coal seam gas-dynamic. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2013; (S5): 68-84. (In Russ.).
15. Кубрин С.С., Журавлев Е.И. Использование системы мониторинга и прогноза динамических явлений для обеспечения промышленной безопасности горных работ. Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. *Материалы XXVII Международной научной школы им. академика С. А. Христиановича*. Симферополь, 2017; 41-49.
Kubrin S.S., Zhuravlev E.I. The use of a system for monitoring and forecasting dynamic phenomena to ensure the industrial safety of mining operations. Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and workings. *Materials of the XXVII International Scientific School named after academician S. A. Khristianovich*. Simferopol, 2017; 41-49. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Блохин Дмитрий Иванович –

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры физики,
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС», 119049, Москва, Российская
Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4652-661X>; e-mail:
dblokhin@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.11.2025
Поступила после рецензирования: 02.12.2025
Принята к публикации: 08.12.2025

ABOUT THE AUTHOR

Dmitry I. Blokhin –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of
the Department of Physics, National University of Science and
Technology “MISIS”, 119049, Moscow, Russian Federation;
<https://orcid.org/0000-0002-4652-661X>; e-mail: dblokhin@yandex.ru

Article info

Received: 12.11.2025
Revised: 02.12.2025
Accepted: 08.12.2025