

УДК 537.867:550.34

DOI: 10.46698/VNC.2023.36.10.003

Оригинальная статья

Усиление и генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через магматические горные породы

И.И. Босиков¹, Р.В. Ключев², В.Ч. Ревазов¹

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет),
Россия, 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44,
e-mail:igor.boss.777@mail.ru;

²Московский политехнический университет, Россия, 107203, г. Москва,
ул. Большая Семеновская, 38, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Статья поступила: 25.10.2023, доработана: 02.12.2023, принята к публикации: 13.12.2023

Резюме: Актуальность работы. В статье рассматривается возможный механизм усиления и генерации электромагнитного излучения при подготовке землетрясения, во время и после него (афтершоки). Как установлено ранее при прохождении через ионный кристалл диэлектрика ультразвука достаточной интенсивности в кристалле генерируется электромагнитное излучение на частоте ультразвука и вдвое меньшей частоте. Результаты получены на магматических горных породах (базальты, габбро, граниты). **Цель исследований.** Исследование и анализ механизма усиления и генерации электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через магматические горные породы. **Методика исследований.** При проведении исследований применялись методы геофизики и инженерной геологии, математическое моделирование, теория струн, методы кристаллографии и минералогии. **Результаты исследований.** В результате проведенных исследований определено, что при импульсном акустическом возбуждении амплитудные параметры электромагнитной совместимости существенно зависят от проводимости горной породы. **Заключение.** Случайные соединения «конденсаторов» с учетом их колебаний в поле сейсмических волн могут приводить к возрастанию суммарного потенциала (средний потенциал-мультипликаторы), а во-вторых, в поле ударной волны T нужно заменить на эффективную температуру, что может на несколько порядков увеличить эффективный заряд и интенсивность ЭМИ. Таким образом, при трещинообразовании и распространении мощных акустических волн в горных породах практически все входящие в эти породы компоненты должны вносить вклады в генерацию ЭМИ.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, очаг землетрясения, генерация, кристалл диэлектрика, ультразвук, релаксация, землетрясение.

Для цитирования: Босиков И.И., Ключев Р.В., Ревазов В.Ч. Усиление и генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через магматические горные породы. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 32-41. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.10.003

DOI: 10.46698/VNC.2023.36.10.003

Original paper

Amplification and generation of electromagnetic radiation during the passage of acoustic waves through igneous rocks

I.I. Bosikov¹, R.V. Klyuev², V.Ch. Revazov¹

¹North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation,

e-mail: igor.boss.777@mail.ru;

²Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya Str.,
Moscow 107203, Russian Federation,

e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

Received: 25.10.2023, revised: 02.12.2023, accepted: 13.12.2023

Abstract. Relevance. The article discusses a possible mechanism of amplification and generation during the preparation of earthquakes, during and after them (aftershocks). As was established earlier, when ultrasound of sufficient intensity passes through an ionic dielectric crystal, electromagnetic radiation is generated in the crystal at the ultrasound frequency and half the frequency. The results were obtained on igneous rocks (basalts, gabbros, granites). **Aim.** Research and analysis of the mechanism of amplification and generation of electromagnetic radiation during the passage of acoustic waves through igneous rocks. **Research methodology.** When conducting research, methods of geophysics and engineering geology, mathematical modeling, string theory, crystallography and mineralogy were used. **Research results.** As a result of the research, it was determined that during pulsed acoustic excitation, the amplitude parameters of electromagnetic compatibility significantly depend on the conductivity of the rock. **Conclusion.** Firstly, that random connections of “capacitors”, taking into account their oscillations in the field of seismic waves, can lead to an increase in the total potential (average potential multipliers), and secondly, in the field of a shock wave, T must be replaced by the effective temperature, which can increase the effective charge and intensity of EMR by several orders of magnitude. Thus, during the formation of cracks and the propagation of powerful acoustic waves in rocks, almost all components included in these rocks must contribute to the generation of EMR.

Keywords: electromagnetic radiation, earthquake source, generation, dielectric crystal, ultrasound, relaxation, earthquake.

For citation: Bosikov I.I., Klyuev R.V., Revazov V.Ch. Amplification and generation of electromagnetic radiation during the passage of acoustic waves through igneous rocks. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(4): 32-41. DOI: 10.46698/VNC.2023.36.10.003

Введение

Авторами рассматривается возможный механизм усиления и генерации электромагнитного излучения при подготовке землетрясения, во время и после него (афтершоки). Как установлено ранее при прохождении через ионный кристалл диэлектрика ультразвука (УЗ) достаточной интенсивности в кристалле генерируется электромагнитное излучение на частоте ультразвука и вдвое меньшей частоте. Результаты получены на магматических горных породах (базальты, габбро, граниты).

Цель исследований. Исследование и анализ механизма усиления и генерации электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через магматические горные породы. **Методика исследований.** При проведении исследований применялись методы геофизики и инженерной геологии, математическое моделирование, теория струн, методы кристаллографии и минералогии.

Техническая часть

В последние годы все большее внимание уделяется исследованиям электромагнитного излучения (ЭМИ), связанного с очагами землетрясения [Frid et al., 2020; Чотчаев и др., 2021]. Развита модель возникновения ЭМИ из очага землетрясения и сопутствующих ему атмосферных явлений [Varoň et al., 2020; Голик и др., 2020]. Ведутся поиски физических механизмов генерации ЭМИ в очаге землетрясения [Wei et al., 2022; Босиков и др., 2023а].

1. Под воздействием упругих колебательных напряжений дислокации начинают колебаться, что микроскопически заключается в захвате и испускании вакансий [Frid et al., 2020; Wei et al., 2022].

Поэтому с ростом частоты УЗ должен уменьшаться эффективный заряд и возрастать коэффициент трения дислокации, и по этой причине исследования проводятся на низкой (20 кГц) частоте УЗ.

Из-за явлений релаксации интенсивность ЭМИ должна падать со временем, а порог генерации – расти, так как со временем растет число точек закрепления. При этом увеличение амплитуды УЗ или изменение нагрузки на образец может привести к отрыву дислокаций от закреплений и тем самым – к нелинейной зависимости интенсивности ЭМИ от интенсивности УЗ.

Известно явление возникновения зарядов на берегах вдоль образующихся микротрещин [Yang et al., 2020; Босиков и др., 2022]. Установлено, что существует строгая корреляция между акустической эмиссией, всплесками на кривых проводимости и электрического потенциала и ЭМИ.

2. Генерация ЭМИ при прохождении УЗ волны по диэлектрику может вызываться следующими причинами.

I. Эффекты, связанные с типом решетки (пьезоэффект, электрострикция) [Willatzen et al., 2008].

В [Demyanyshyn et al., 2021] они были исключены проведением измерений на кристаллах с существенно различными пьезохарактеристиками и наблюдаемыми временными зависимостями интенсивности ЭМИ от амплитуды УЗ.

II. Эффекты, связанные с электронной подсистемой (акусто-ЭДС), исключались использованием веществ с различной проводимостью.

III. Эффекты, связанные с дефектами решетки. Здесь необходимо различать процессы образования дефектов (их вклад в высокочастотное ЭМИ частично рассмотрен в [Paul et al., 2023]) и процессы параметрической генерации ЭМИ этими дефектами в акустическом поле, которым посвящена настоящая работа.

Рассмотрим возможные типы дефектов:

а) двумерные дефекты-трещины, на берегах которых возникают флуктуацион-

ные заряды [Eguchi, Nakashim, 2023], и поверхности образца, к которым могут диффундировать внутренние дефекты;

б) линейные дефекты – дислокации, которые в момент своего образования (или в интенсивном УЗ поле, отрывающем их от закрепляющих дефектов) могут рассматриваться как заряженные нити;

в) точечные дефекты – вакансии, междоузельные ионы, ролью которых можно в нашем случае пренебречь, поскольку сечения упругого рассеяния фононов на них и на дислокациях пропорциональны соответственно ω^2 и w или $1/\omega$ [Li et al., 2023].

Таким образом, генерация ЭМИ с достаточно низкой частотой, пропорциональной частоте УЗ, может вызываться только эффектами, связанными с трещинами и дислокациями.

3. Трещину с флуктуационным зарядом на берегах можно рассматривать как плоский конденсатор с зависящей от времени электростатической энергией:

$$W(t) = q^2/2C = W(0)\exp(-2\alpha t)(1 + \xi \sin \omega t), \quad (1)$$

где $W(0) = 2ng^2 d_o^2 / \epsilon S$;

q_0 – первоначальный заряд трещины, который много меньше пробойного;

ϵ_o – среднее раскрытие трещины;

S – площадь берегов;

ϵ – диэлектрическая проницаемость газа внутри трещины;

α – скорость релаксации заряда;

ξ – относительная амплитуда сжатия трещины:

$$\xi = (1/(d_o \rho \omega^2)) \text{grad } \sigma(r), \quad (2)$$

где ρ – плотность вещества кристалла;

$\sigma(r)$ – нормальная к берегам трещины компонента давления УЗ.

Отметим, что разложение (1) справедливо лишь в случае монохроматического УЗ потока частоты ω и для трещин, все размеры которых много меньше длины волны УЗ [Malyukova et al., 2023; Рыбак и др., 2021].

При раздвижении берегов трещины $W(t)$ растет за счет работы сторонних сил, при сближении берегов $W(t)$ уменьшается и основная часть выделяющейся при этом энергии должна перейти в ЭМИ (пренебрегаем вторичной акустической волной). Если принять, что в кристалле в объеме, много меньшем $l_{зв}^3$ ($l_{зв}$ – длина волны УЗ), возникает N параллельных трещин, заряженных хаотически, то в соответствии с распределением Пуассона напряженность поля трещин порядка $E_1 N^{1/2}$, где E_1 – напряженность поля единичной трещины [Голик и др., 2021; Босиков и др., 2023b]. Поэтому усредненная интенсивность излучения такого участка кристалла определяется положительными значениями выражения:

$$I(t) = -NdW/dt = NW(0)\exp(-2\alpha t) (2\alpha - \cos \omega t). \quad (3)$$

Зависимость $\epsilon(\omega)$ от амплитуды УЗ будет оценена ниже. Если $2a \leq \omega \zeta$, то излучение будет наблюдаться в течение полупериода УЗ, т.е. будет происходить как бы с частотой $\omega/2$ (здесь не рассматриваются процессы генерации ЭМИ на более высоких частотах, связанных с ускорениями зарядов) (рис. 1).

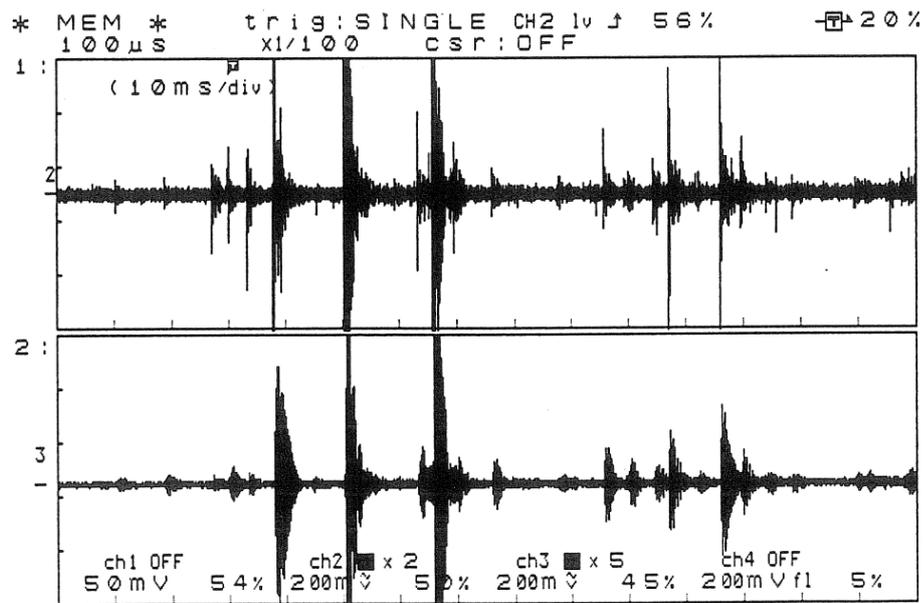


Рис. 1 Записи демонстрирующие связь электромагнитных (вверху) и акустических (внизу) явлений при разрушении образца гранита [Hadjicontis et al., 2004] /

Fig. 1 Records demonstrating the connection between electromagnetic (upper) and acoustic (lower) phenomena during the destruction of a granite sample [Hadjicontis et al., 2004] /

4. Перейдем к рассмотрению ЭМИ, генерируемого колеблющимися дислокациями.

Рассмотрим прямую закрепленную лишь на концах дислокацию длины L , расположенную вдоль оси y с плотностью заряда:

$$\rho(r, t) = (q/L) \delta(x) \delta(z) \theta(L^2/4 - y^2), \quad (4)$$

где $\theta(y)$ – ступенчатая функция Хевисайда;

$\delta(x)$ – функция Дирака.

Под действием ЭМИ дислокация может совершать колебания (предположим, что они гармонические) в плоскости x_0y :

$$x(y, t) = A \cos(\pi y/L) \sin \omega t. \quad (5)$$

Пренебрегаем более медленными процессами передвижения дислокаций в целом. Помимо того, под влиянием волн сжатия и разряжения могут меняться линейные размеры дислокации:

$$L(t) = L_0 (1 + B \sin \omega t). \quad (6)$$

Наряду с этим изменяется и диэлектрическая проницаемость окружающей среды:

$$\varepsilon(\omega, t) = \varepsilon_s(\omega) (1 + \bar{C} \sin \omega t). \quad (7)$$

Для оценки вкладов этих процессов в генерацию ЭМИ сравним коэффициенты A/L , B и \bar{C} .

Из струнной модели дислокаций [Paul et al., 2023] можно заключить, что если частота УЗ много ниже резонансной: $\omega^2 \ll \omega_0^2 = 2\pi G/(1-\nu) \rho L$, где G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, т.е. если $\omega/2\pi \ll 1$ МГц, то:

$$A = \frac{2\sigma_0(1-\nu)L^2}{\pi^2Gb} = \frac{4\sigma_0}{\rho\omega_0^2b} \quad (8)$$

где b – вектор Бюргерса.

При этом увеличение коэффициента конверсии энергии УЗ в ЭМИ достигается при приближении частоты УЗ к ω_0 .

Коэффициент $B = \sigma/E$,

где E – модуль сжатия.

Для \bar{C} получаем с учетом формулы Лорентц–Лоренца и закона Гука выражение:

$$\bar{C} = \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial \rho} \Delta \rho = \frac{(\varepsilon_0 - 1)(\varepsilon_0 + 2)\sigma}{3 \varepsilon_0 E} \quad (9)$$

Из сравнения этих коэффициентов видно, что $A/L > B$ и $B \sim \bar{C}$. Таким образом, за генерацию ЭМИ ответственны в основном колебания дислокации в плоскости скольжения, связанные с B и \bar{C} . Процессы генерации приводят к появлению ЭМИ лишь в течение полупериода УЗ и поэтому могут несколько исказить гармонические колебания, связанные с (5).

С учетом (5) можно переписать (4) как:

$$\rho(r, t) = \frac{q}{L} \delta \left[x - A \cos \frac{\pi y}{L} \sin \omega t \right] \delta(z) \theta \left(\frac{L^2}{4 - y^2} \right) \quad (10)$$

Пренебрегаем возможной неоднородностью заряда на растянутой дислокации, отсюда для дипольного момента:

$$p(t) = \int r \rho(r, t) dV \quad (11)$$

Получаем:

$$p_x = \frac{2qA}{\pi} \sin \omega t, \quad p_y = const, \quad p_z = 0$$

Интенсивность ЭМИ в дальней зоне, согласно (11), равна:

$$I = \frac{2}{3c^3} |\ddot{p}|^2 = \left[\frac{32N_1^2\sigma^2(1-\nu)^2L^4\omega^4}{3\pi^6c^3G^2b^2} \right] \sin^2 \omega t \quad (12)$$

где N_1 – количество параллельных дислокаций в облучаемом малом объеме.

Формулу (12) можно проверить сравнением интенсивности ЭМИ в различных кристаллах.

Результаты исследований

Импульс образования трещин в магматической горной породе (диабаз, гранит) представлен на рис. 2.

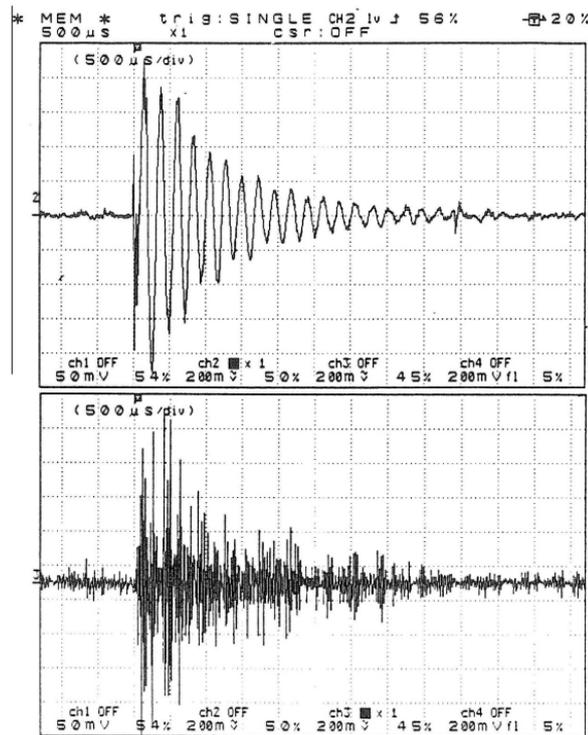


Рис. 2. Импульс образования трещин в магматической горной породе (гранит): электромагнитная эмиссия (вверху) и акустическая эмиссия (внизу) [Hadjicontis et al., 2004] /

Fig. 2. The impulse of crack formation in igneous rock (granite): electromagnetic emission (upper) and acoustic emission (lower) [Hadjicontis et al., 2004]

Необходимо особо подчеркнуть одно следствие (12). Если ввести общую длину дислокаций в исследуемом объеме $L = N_l L$, то, согласно (12), $I \sim L^4/N_l^2$. Со временем, прошедшим после образования дислокаций, растет среднее число точек закрепления каждой отдельной дислокации. Если принять, что в отсутствие УЗ число закреплений растет как $N_l \sim t$, то средняя интенсивность ЭМИ при не слишком большой интенсивности УЗ и при постоянном числе дислокаций должна убывать как $I \sim t^{-2}$, где t – время, прошедшее после возникновения дислокаций, во всяком случае, до установления стационарного числа сегментов дислокаций.

Важно отметить, что в условиях эксперимента измерения поля проводились в ближней зоне (граница между ними $\sim a(c/v)^2$, и v – максимальная скорость точек дислокации, где измерялась фактически напряженность электрического поля):

$$E = (1/\epsilon r^3) (3np_x - p), \quad (13)$$

Поскольку магматические горные породы [Баловцев и др., 2023; Brigida, Zinchenko, 2014; Wang, 2023] содержат зерна различных минералов, то для выяснения роли различных механизмов в генерации ЭМИ нужно рассмотреть процессы генерации в проводниках.

Заключение

Дислокационный механизм генерации ЭМИ в металлах описан в [Eguchi, Nakashim, 2023]. «Конденсаторный» механизм излучения также должен наблюдаться в проводниках, так как на них возникают флуктуационные заряды с энергией:

$$\frac{C\bar{q}^2}{2} = \frac{kT}{2} \quad (14)$$

Флуктуационные заряды с энергией растут при раздвижении обкладок [Li et al., 2023] и должны излучаться при их сближении. Сравнение (14) с выражениями (1-3) показывает, что плотность флуктуационных зарядов в зернах металлов, а следовательно, и мощность ЭМИ, может сравниться с плотностью зарядов флуктуационно-разорванных связей в диэлектриках при площадях «обкладок» порядка 1 мкм².

Необходимо отметить, что случайные соединения таких «конденсаторов» с учетом их колебаний в поле сейсмических волн могут приводить к возрастанию суммарного потенциала, а в поле ударной волны T в (14) нужно заменить на эффективную температуру, что может на несколько порядков увеличить эффективный заряд и интенсивность ЭМИ.

Литература

1. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю. Оценка влияния тяжелых углеводородов на аэрологические риски аварий в угольных шахтах. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 2. – С. 234–245. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245.
2. Босиков И.И., Клюев Р.В., Мазко А.И. Оценка устойчивости плоской поверхности кристалла при фазовом превращении в однокомпонентной системе. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12 № 4. – С. 114–128. DOI: 10.46698/VNC.2022.28.26.009.
3. Босиков И.И., Клюев Р.В., Хетагуров В.Н., Силаев И.В. Комплексная оценка гидродинамических процессов на карьерах Клинского месторождения с помощью методов управления ими в массивах горных пород. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023а. – Т. 15 –№ 2. – С. 284–297. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-284-297.
4. Босиков И.И., Клюев Р.В., Силаев И.В., Пилюева Д.Э. Оценка параметров многостадийного гидравлического разрыва пласта с помощью 4D моделирования. // Горные науки и технологии. – 2023b. – №2. – С. 141–149. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-01-97.
5. Голик В.И., Бурдзиева О.Г., Дзеранов Б.В. Управление геодинамикой массива путем регулирования величины напряжений. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 2. – С. 147–160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011.
6. Голик В.И., Гашимова З.А., Лискова М.Ю., Конгар-Сюрюн Ч.Б. К проблеме минимизации объемов мобильной пыли при разработке карьеров. // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 11. – С. 28–33. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-28-33.
7. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых// Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т.13. – №3(49). – С. 405–415. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415.
8. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – №11 (1) – С. 81–94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007
9. Baroň I., Koktavý P., Trčka T., Rowberry M., Stemberk J., Balek J., Plan L., Melichar R., Diendorfer G., Macků R., Škarvada P. Differentiating between artificial and natural sources of electromagnetic radiation at a seismogenic fault. // Engineering Geology. – 2022. – Vol. 311. – P. 106912. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106912.
10. Brigida V. S., Zinchenko N. N. Methane release in drainage holes ahead of coal face. // Journal of Mining Science. – 2014. – Vol. 50. No. 1. – pp. 60–64. DOI: 10.1134/S1062739114010098.
11. Demyanyshyn N.M., Suhak Yu., Mytsyk B.G., Buryy O.A., Maksishko Yu.Ya., Sugak D., Fritze H. Anisotropy of piezo-optic and elasto-optic effects in langasite family crystals. // Optical Materials. – 2021. – Vol. 119. – P. 111284. DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111284.

12. Eguchi K., Nakashim D. Fluctuation analysis and experimental evaluation of an inductorless battery charge equalization circuit with a CMOS cross-coupled structure. // *Energy Reports*. – 2023. – Vol. 9. – pp. 214–223. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.04.289.
13. Frid V., Rabinovitch A., Bahat D. Earthquake forecast based on its nucleation stages and the ensuing electromagnetic radiations. // *Physics Letters A*. – 2020. – Issue 4. – P. 126102. DOI: 0.1016/j.physleta.2019.126102.
14. Hadjicontis V., Mavromatou C., Ninos D. Stress induced polarization currents and electromagnetic emission from rocks and ionic crystals, accompanying their deformation. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2004. – Vol. 4. – pp. 633–639. DOI: 10.5194/nhess-4-633-2004.
15. Li Y., Sun Zh., Liao N., Cao Z., Liu X., Li Y., Ding Y., Qiu X., Ran G. Formation of helical dislocations mediated by interstitials in ion irradiated FeCrAl alloy. // *Journal of Nuclear Materials*. – 2023. – Vol. 579. – P. 154413 DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154413.
16. Malyukova L.S., Martyshev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A., Brigida V. Circular Mining Wastes Management for Sustainable Production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – P. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
17. Paul L. Barclay P.L., Zhang D. Z. A combined ensemble-volume average homogenization method for lattice structures with defects under dynamic and static loading // *Computational Materials Science*. – 2023. – Vol. 228. – P. 112357. DOI: 10.1016/j.commatsci.2023.112357.
18. Wang Y. Partially overlapped grain shape restoration of the granular rock images. // *Computers & Geosciences*. – 2023. – Vol. 178. – P. 105408. DOI: 10.1016/j.cageo.2023.105408.
19. Wei M., Song D., He X., Khan M., Cheng Y. Generation mechanism of fracture-induced electromagnetic radiation and directionality characterization in the near field. // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2022. – Vol. 273. – P. 108684. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108684.
20. Willatzen M., Wang L., Lew Yan Voon L. C. Electrostriction in GaN/AlN heterostructures. // *Superlattices and Microstructures*. – 2008. – Vol. 43. – Issue 5–6. – pp. 436–440. DOI: 10.1016/j.spmi.2007.07.009.
21. Yang K., Wu Y, Huang F. Damage and hotspot formation simulation for impact–shear loaded PBXs using combined microcrack and microvoid model. // *European Journal of Mechanics – A/Solids*. – 2020. – Vol. 80. P. 103924. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103924.

References

1. Balovtsev S.V., Skopintseva O.V., Kulikova E.Yu. Assessment of heavy hydrocarbons influence on aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 2. pp. 234–245. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-234-245 (In Russ.)
2. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Masko A. I. Evaluation of the stability of a flat surface of a crystal under a phase transformation in a single-component system. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 4. pp. 114–128. DOI: 10.46698/VNC.2022.28.26.009. (in Russ.)
3. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N., Silaev I.V. Comprehensive assessment of hydrodynamic processes in the Klinskoye Quarry with the use of their control methods in rock masses. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 2. pp. 284–297. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-284-297. (In Russ.)
4. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Silaev I.V., Pilieva D.E. Estimation of multistage hydraulic fracturing parameters using 4D simulation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023. Vol. 8. No. 2. pp. 141–149. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-01-97. (In Russ.)
5. Golik V.I., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V. Ground geodynamics control by regulating stress level. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. No.10 (2). pp. 147–160. DOI: 10.46698/VNC.2020.93.21.011. (in Russ.)

6. Golik V.I., Gashimova Z.A., Liskova M.Yu., Kongar-Syuryun Ch.B. To the problem of minimizing the volume of mobile dust in the development of pits. *Industrial safety*. 2021. No. 11. pp. 28–33. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-11-28-33. (In Russ.)
7. Rybak Y., Khayrutdinov M., Kongar-Syuryun C., Tyulyayeva Y. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021. Vol. 13 No. 3. pp. 405–415. DOI: DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415. (In Russ.)
8. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geocological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007. (In Russ.)
9. Baroň I., Koktavý P., Trčka T., Rowberry M., Stemberk J., Balek J., Plan L., Melichar R., Diendorfer G., Macků R., Škarvada P. Differentiating between artificial and natural sources of electromagnetic radiation at a seismogenic fault. *Engineering Geology*. 2022. Vol. 311. 106912. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106912.
10. Brigida V.S., Zinchenko N.N. Methane release in drainage holes ahead of coal face. *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50. No. 1. pp. 60–64. DOI: 10.1134/S1062739114010098.
11. Demyanyshyn N.M., Suhak Yu., Mytsyk B.G., Buryy O.A., Maksishko Yu.Ya., Sugak D., Fritze H. Anisotropy of piezo-optic and elasto-optic effects in langasite family crystals. *Optical Materials*. 2021. Vol. 119. P. 111284. DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111284.
12. Eguchi K., Nakashim D. Fluctuation analysis and experimental evaluation of an inductorless battery charge equalization circuit with a CMOS cross-coupled structure. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. pp. 214–223. DOI: 10.1016/j.egy.2023.04.289.
13. Frid V., Rabinovitch A., Bahat D. Earthquake forecast based on its nucleation stages and the ensuing electromagnetic radiations. *Physics Letters A*. 2020. Issue 4. P. 126102. DOI: 10.1016/j.physleta.2019.126102.
14. Hadjicontis V., Mavromatou C., Ninos D. Stress induced polarization currents and electromagnetic emission from rocks and ionic crystals, accompanying their deformation. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2004. Vol. 4. pp. 633–639. DOI: 10.5194/nhess-4-633-2004.
15. Li Y., Sun Zh., Liao N., Cao Z., Liu X., Li Y., Ding Y., Qiu X., Ran G. Formation of helical dislocations mediated by interstitials in ion irradiated FeCrAl alloy. *Journal of Nuclear Materials*. 2023. Vol. 579. P. 154413 DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154413.
16. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y., Bashmur K.A., Panfilova T.A., Brigida V. Circular Mining Wastes Management for Sustainable Production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
17. Paul L. Barclay P.L., Zhang D. Z. A combined ensemble-volume average homogenization method for lattice structures with defects under dynamic and static loading. *Computational Materials Science*. 2023. Vol. 228. P. 112357. DOI: 10.1016/j.commatsci.2023.112357.
18. Wang Y. Partially overlapped grain shape restoration of the granular rock images. *Computers & Geosciences*. 2023. Vol. 178. P. 105408. DOI: 10.1016/j.cageo.2023.105408.
19. Wei M., Song D., He X., Khan M., Cheng Y. Generation mechanism of fracture-induced electromagnetic radiation and directionality characterization in the near field. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022. Vol. 273. P. 108684. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2022.108684.
20. Willatzen M., Wang L., Lew Yan Voon L. C. Electrostriction in GaN/AlN heterostructures. *Superlattices and Microstructures*. 2008. Vol. 43. Issue 5–6. pp. 436–440. DOI: 10.1016/j.spmi.2007.07.009.
21. Yang K., Wu Y, Huang F. Damage and hotspot formation simulation for impact–shear loaded PBXs using combined microcrack and microvoid model. *European Journal of Mechanics – A/Solids*. 2020. Vol. 80. P. 103924. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2019.103924.