

УДК 622.85:550.3

Далатказин Тимур Шавкатович,
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией технологии снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: 9043846175@mail.ru

Зуев Павел Игоревич,
научный сотрудник,
лаборатория технологии снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: zuev@igduran.ru

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДРАБОТАННОГО ГОРНОГО МАССИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДОНОМЕТРИИ*

Аннотация:

В настоящей работе представлены результаты геофизических исследований, проведенных для определения оценки перспективности применения радонометрии в качестве метода для выявления и оконтуривания деформационных участков, а также установления генезиса структурно-геодинамических образований, формирующихся в пределах подработанных массивов горных пород. Исследования проводились на ограниченном по площади участке, расположенном непосредственно над малозаглубленной, погашенной подземной горной выработкой, наличие которой было установлено по результатам предварительных исследований методами электротомографии и сейсморазведки. В ходе работ были установлены закономерности, связывающие показатели растяжения и сжатия, определяемые по данным радонометрии, с уровнем геодинамической активности исследуемого массива. Полученные зависимости позволили разработать методику выявления и классификации деформаций, возникающих в горном массиве, с выделением следующих типов: 1) малоглубинные объекты разуплотнения, характеризующиеся повышенными значениями радона; 2) активные дизъюнктивные нарушения (разрывные геологические структуры), отличающиеся специфическими аномалиями радонового поля; 3) зоны деформаций сжатия, характеризующиеся пониженными значениями радона и специфическими особенностями его распределения.

Ключевые слова: сжатие, растяжение, дизъюнктивное нарушение, радон, поле радоновых эманацій, подземная горная выработка.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.03.084

Dalatkazin Timur Sh.
Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory of technologies
for reducing the risk of disasters in subsoil use,
Institute of Mining UB RAS,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
620075 Ekaterinburg
e-mail: 9043846175@mail.ru

Zuev Pavel I.
Researcher,
Laboratory of technologies for reducing
the risk of disasters in subsoil use,
Institute of Mining UB RAS
e-mail: zuev@igduran.ru

GEODYNAMIC DIAGNOSTICS OF AN UNDERMINED ROCK MASSIF USING RADONOMETRY

Abstract:

This paper presents the results of geophysical studies aimed at evaluating the potential of radonometry as a method for detecting and delineating deformation zones, as well as determining the genesis of structural-geodynamic formations within undermined rock masses. The research was conducted on a limited area located directly above a shallow, abandoned underground mine working, the presence of which was confirmed by preliminary surveys using electrical resistivity tomography and seismic methods. The study established correlations between tension and compression indicators, derived from radonometry data, and the level of geodynamic activity in the rock mass. The obtained relationships enabled the development of a methodology for identifying and classifying deformations in the rock mass, distinguishing the following types: 1) shallow decompaction zones characterized by elevated radon levels; 2) active disjunctive faults (fractured geological structures) exhibiting specific radon field anomalies; and 3) compression deformation zones marked by reduced radon values and distinct distribution patterns.

Key words: compression, tension, disjunctive fault, radon, radon emanation field, underground mine working.

* Работа выполнена в рамках Гос. задания № 075-00410-25-00. Г.р. № 1022040300093-0-1.5.1. Тема 3 (2025-2027). (FUWE-2025-0003).

Введение

Подработанные массивы горных пород формируются в результате воздействия подземных горных работ, что приводит к изменению их естественного напряженно-деформированного состояния. Такие массивы характеризуются наличием зон деформаций разуплотнения, сжатия, повышенной трещиноватости, что требует детального изучения перед принятием решений об их дальнейшем возможном использовании. При решении данной задачи продуктивно применение геофизических методов в различных вариантах комплексирования.

Геофизические исследования подработанного горного массива территории г. Березовский Свердловской области выполнялись в два этапа:

- геофизические исследования по выявлению зон структурного ослабления участка исследований;
- геофизические исследования проявлений современной геодинамической активности.

В ходе первого этапа исследований методом электротомографии на профильной линии в интервале пикетов 65 – 80, на глубине около 10 м, была зафиксирована слабо выраженная аномалия пониженного электрического сопротивления. Данная аномалия предположительно обусловлена разуплотнением горных пород, связанным с наличием заброшенной горизонтальной горной выработки (рис. 1) [1, 2].

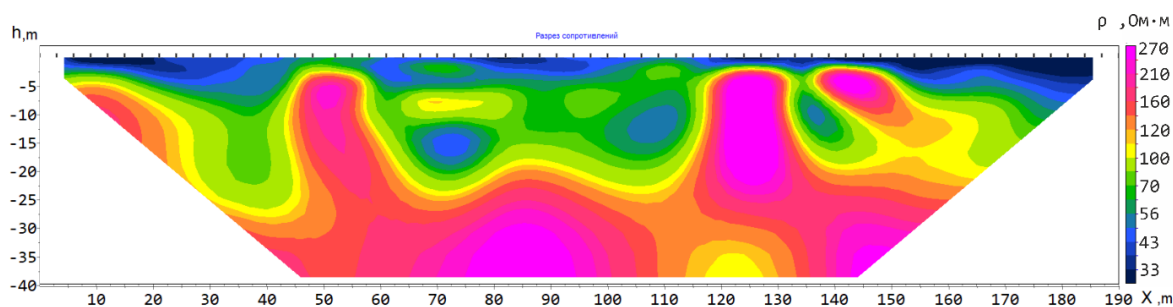


Рис. 1. Геофизический разрез показателя удельного электрического сопротивления по данным электротомографии.

Горный массив участка территории г. Березовский Свердловской области

С целью подтверждения наличия зоны разуплотнения на указанном участке были проведены сейсморазведочные работы. Анализ разреза коэффициента Пуассона выявил локальный участок пониженных значений упругих свойств грунтов в районе глубины 10 м, соответствующий интервалу пикетов 65 – 72. Данная аномалия пространственно совпадает с аномалией, выявленной ранее по результатам электротомографии, что подтверждает интерпретацию о наличии разуплотнения (рис. 2).

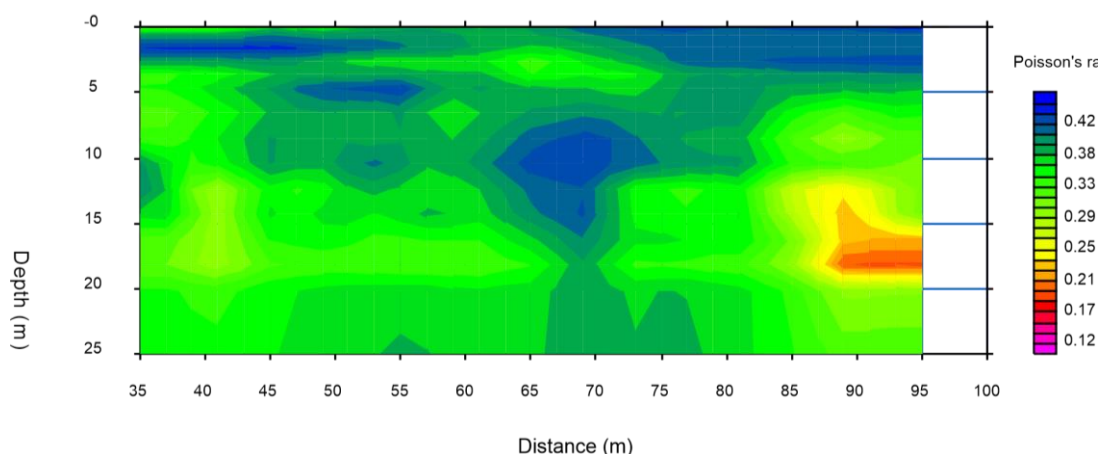


Рис. 2. Геофизический разрез коэффициента Пуассона по данным сейсморазведки. Горный массив участка территории г. Березовский Свердловской области, 2024 г.

На рассматриваемом участке проведены экспериментальные радонометрические исследования для оценки возможности выявления и оконтуривания деформационных зон.

Объект исследований

Район исследований, расположенный на юго-западной границе г. Березовский Свердловской области, представлял собой открытую территорию, не занятую застройкой, инженерными сооружениями, лесными массивами или кустарником.

Коренные породы района исследований представлены базальтами афировыми, вариолитами, туфопесчаниками, туфоалевролитами, туффитами, углеродисто-кремнистыми сланцами, зелеными сланцами, микроамфиболитами, амфиболитами, объединенными в Новоберезовскую толщу, имеющую мощность более 2000 м. Породы толщи прорваны многочисленными дайками гранодиорит-порфиров, гранит-порфиров, плагиогранит-порфиров, диоритов и диорит-порфиров. Протяженность даек до 20 км, мощность 2 – 40 м, простирание субмеридиональное, падение крутое. К поперечным трещинам разрыва в дайках приурочены короткие крутопадающие кварцеворудные жилы [3].

Участок исследований находится в районе выхода на поверхность даек Вагнеровская и Параллельная.

В XVIII – начале XX века Березовское месторождение золота разрабатывалось в приповерхностной зоне (до 45–50 м). В этот период было создано свыше 1000 шахт «казенной добычи». Одновременно велась нелегальная старательская добыча с помощью малоглубинных подземных выработок, не имеющих документации. Отсутствие информации о расположении этих выработок представляет угрозу для инженерных объектов на данной территории.

Методика исследований

Целью экспериментальных исследований являлась оценка применимости радонометрии для выявления и оконтуривания малоглубинных подземных горных выработок. Методика исследований заключалась в комплексировании эманационной съемки для геодинамического районирования горного массива и радонометрических измерениях для выявления деформационных зон, их дифференциации на зоны растяжения и зоны сжатия и определении природы их формирования [4 – 8].

Измерения объемной активности радона (ОАР) (Бк/м³) в почвенном воздухе выполнены радиометрами альфа-активных газов РГА-500 по профильным линиям из шпуров глубиной 0,8 – 1,0 м. Шпуры для отбора проб почвенного воздуха бурились бензиновым перфоратором М 58.

Эманационная съемка для геодинамического районирования горного массива. Данная методика предусматривает определение геодинамической составляющей поля радона посредством нормирования значений ОАР.

Для реализации данного этапа результаты измерений ОАР группируются по принадлежности к однородным участкам, характеризующимся сходными параметрами:

- по гранулометрическому составу покровных отложений;
- по вещественному составу горных пород;
- по положению уровня грунтовых вод;
- по влагонасыщенности почвы по площади и т.д.

Кроме того, при группировании учитывается временной интервал проведения измерений.

Для каждой точки измерений внутри выделенной группы рассчитываются нормированные значения ОАР:

$$N_i = \frac{Q_i}{Q_{\text{ср. группы}}}, \quad (1)$$

где N_i – нормированная объемная активность радона точки измерения i , безразмерная величина; Q_i – значение объемной активности радона в почвенном воздухе точки измерения на профильной линии, Бк/м³; $Q_{\text{ср. группы}}$ – среднеарифметическое значение объемной активности радона в почвенном воздухе группы значений, Бк/м³.

Карта распределения нормированных значений объемной активности радона в почвенном воздухе изучаемой территории служит основой для ее геодинамического районирования [5].

Методика радонометрических исследований для выявления и дифференциации деформационных зон разуплотнения и сжатия в горном массиве.

Данная методика предусматривает отдельное определение Q_{Rn222} и Q_{Tn} в процессе выполнения эманационной съемки. После измерения объемной активности смеси ($Q_{\text{Rn222}} + Q_{\text{Tn}}$) (Бк/м³) проба почвенного воздуха остается в измерительной камере (краны закрыты) и выдерживается временная пауза продолжительностью 300 с. За этот период T_n , содержащийся в пробе, распадается. Выполняется повторное измерение, в результате которого определяется объемная активность Rn_{222} [9].

Для выявления зон растяжения горного массива исследуемой территории для каждой точки измерения определяется показатель $A_{\text{раст.}}$:

$$A_{\text{раст.}} = \frac{Q_{\text{Rn222}}}{Q_{\text{Tn}}}, \quad (2)$$

где Q_{Rn222} – объемная активность Rn_{222} , Бк/м³; Q_{Tn} – объемная активность Tn , Бк/м³.

По значениям $A_{\text{раст.}}$ строится карта деформаций растяжения.

Для выявления зон сжатий в горном массиве исследуемой территории для каждой точки измерения определяется показатель $A_{\text{сжат.}}$:

$$A_{\text{сжат.}} = \frac{Q_{\text{Tn}}}{Q_{\text{Rn222}}}. \quad (3)$$

По значениям $A_{\text{сжат.}}$ строится карта деформаций сжатия [6].

Результаты исследований

Размеры локального участка исследований, расположенного над аномалией разуплотнения, выявленной методом электротомографии, составляют 20×35 м. Исследования проводились по сети 5×5 м, что обеспечило выполнение измерений в 40 точках. В каждой точке определялось суммарное содержание объемной активности радона и торона в почвенном воздухе, выраженное как $(Q_{\text{Rn}} + Q_{\text{Tn}})$, а также значения Q_{Rn} и Q_{Tn} по отдельности.

По результатам полевых исследований для каждой точки измерения были определены:

1. Нормированное значение объемной активности почвенного радона $OAP - N_i$ (табл. 1).

Для нормирования точки измерения группировались по вещественному составу подстилающих пород, разделенных по результатам электроразведки на породы кислого состава, слагающие дайки и породы вмещающего массива основного состава (рис. 3). Повышенное содержание кремнезема (SiO_2) в породах, слагающих дайки, определяет повышение здесь объемной активности радона в почвенном воздухе по сравнению с участками развития пород основного состава [10].

Все точки наблюдения локального участка исследований попадают в группу, расположенную над кислыми породами даек.

2. Показатель деформаций растяжения по данным радонометрии – $A_{\text{раст.}}$ (см. табл. 1).

3. Показатель деформаций сжатия по данным радонометрии – $A_{\text{сжат.}}$ (см. табл. 1).

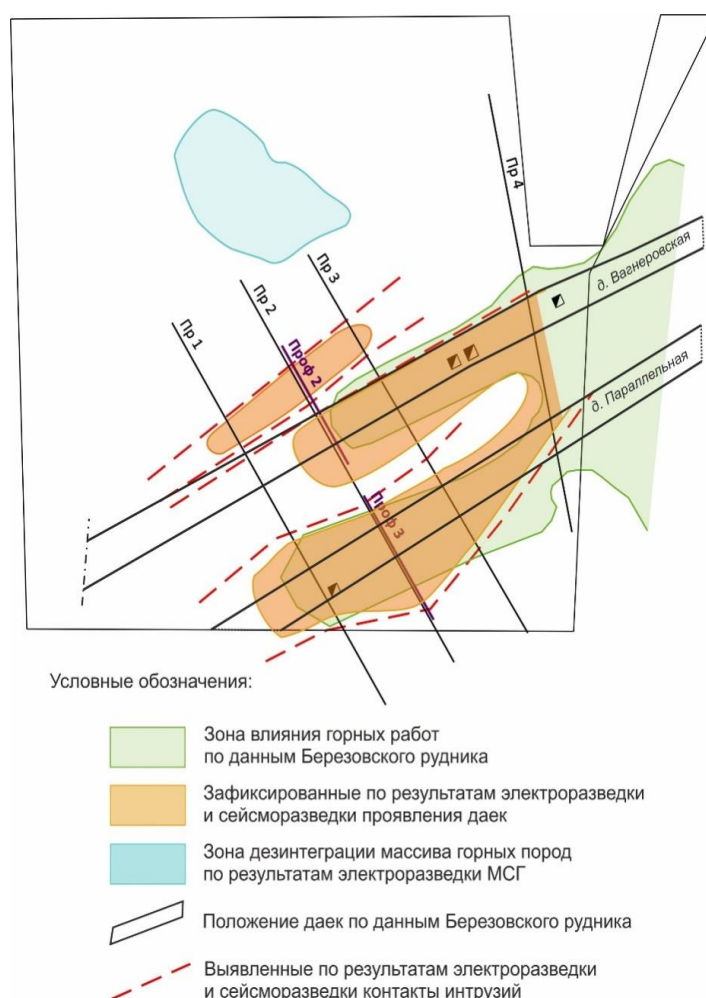


Рис. 3. Схема структурных неоднородностей, составленная по данным электроразведки и сейсморазведки при выполнении первого этапа геодинамического районирования. Горный массив участка территории г. Березовский Свердловской области

Далее были построены карты деформаций растяжения, деформаций сжатия, геодинамического районирования участка исследований (рис. 4).

В соответствии с теоретическими представлениями о механизме формирования поля почвенного радона [4, 11 – 15], полученные результаты интерпретируются следующим образом:

1. В точках с аномально высокими значениями показателя $A_{\text{раст.}}$ (№ 5, 19, 21, 33, 37; см. табл. 1, см. рис. 4, 5) зафиксированы значения N_i ниже фоновых. Это свидетельствует о низкой природной геодинамической активности на данном участке, что исключает наличие естественного канала для поступления радона (геодинамически активного дизъюнктивного нарушения). Разуплотнение, вероятно, вызвано техногенным объектом, расположенным на небольшой глубине. В маломощном, приповерхностном и разуплотненном слое с повышенной пористостью миграция R_n к поверхности осуществляется посредством диффузии (градиент концентрации), конвекции (температурный градиент) и эффузии (градиент давления). Здесь за счет изъятия при ведении горных работ уменьшился эманерирующий R_n объем горных пород. Концентрация R_n снижается по сравнению с нетронутыми участками. При этом сохраняется закономерность формирования соотношения концентраций R_n и T_n в разуплотненной среде. Таким образом, аномальные значения $A_{\text{разупл.}}$ при пониженных значениях N_i могут указывать на наличие малоглубинного объекта разуплотнения [6].

2. Западнее и восточнее участка разуплотнения наблюдаются зоны субмеридионального простирания с аномальными значениями $A_{\text{сжат.}}$, сочетающимися с повышен-

ными значениями N_i (№ 2, 4, 10, 13, 16, 17, 28, 29; см. табл. 1, см. рис. 4, 5). Повышение содержания почвенного радона, вероятно, связано с вибровоздействием, сопровождающим процесс сжимающего деформирования горных пород [16 – 19].

3. В северо-западной части участка исследований аномально высокое значение N_i сочетается с повышенным значением показателя $A_{\text{разупл.}}$ (точка № 5; см. табл. 1, см. рис. 4, 5). Это объясняется наличием зоны активного дизъюнктивного нарушения с преобладанием деформаций растяжения, способствующих миграции газообразных флюидов.

Таблица 1

**Параметры современной геодинамической активности по данным
радонометрии на участке исследований.
Горный массив г. Березовский Свердловской области**

№ точек измерений	N_i	$A_{\text{растяж.}}$	$A_{\text{сжат.}}$
1	0,5	0,4	2,6
2	2,1	0,4	2,4
3	0,5	0,5	1,9
4	1,1	0,5	1,8
5	1,5	4,9	0,2
6	0,6	1,0	1,0
7	0,9	0,8	1,2
8	0,7	0,8	1,3
9	1,4	1,0	1,0
10	1,3	0,5	2,0
11	0,6	0,7	1,5
12	0,2	1,4	0,7
13	3,3	0,5	1,9
14	0,9	0,8	1,2
15	1,0	0,5	1,9
16	2,8	0,7	1,5
17	2,2	0,7	1,5
18	1,0	0,6	1,6
19	0,3	7,1	0,1
20	0,7	1,2	0,8
21	0,3	3,3	0,3
22	0,7	1,1	0,9
23	0,3	1,2	0,8
24	0,8	0,7	1,5
25	0,4	0,7	1,4
26	1,2	1,0	1,0
27	1,2	0,6	1,6
28	1,0	0,5	2,1
29	1,4	0,6	1,6
30	0,6	1,0	1,0
31	1,2	1,0	1,0
32	0,4	0,8	1,3
33	0,3	2,8	0,4
34	1,2	0,9	1,2
35	0,7	1,1	0,9
36	0,3	1,8	0,6
37	0,2	2,8	0,4
38	0,9	0,7	1,4
39	0,3	0,9	1,2
40	1,5	0,9	1,1

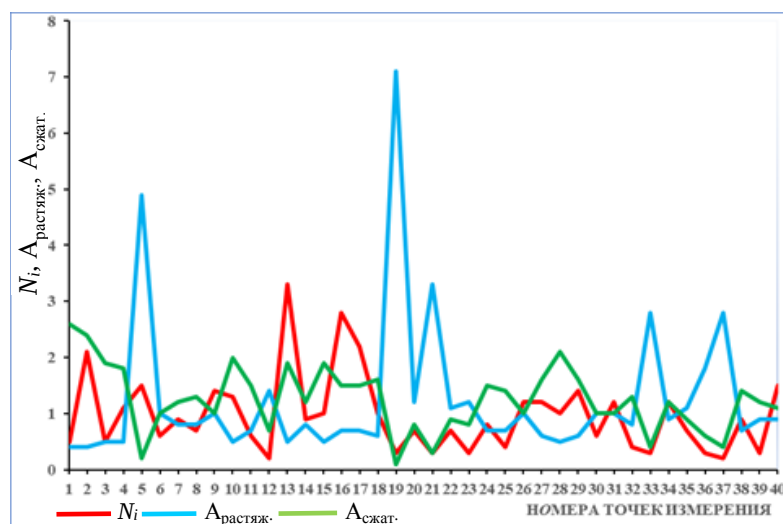


Рис. 4. Диаграммы показателей деформаций растяжения, сжатия, нормированной ОАР по данным радонометрии на участке аномалии разуплотнения по результатам электротомографии и сейсморазведки.
Горный массив территории г. Березовский Свердловской области

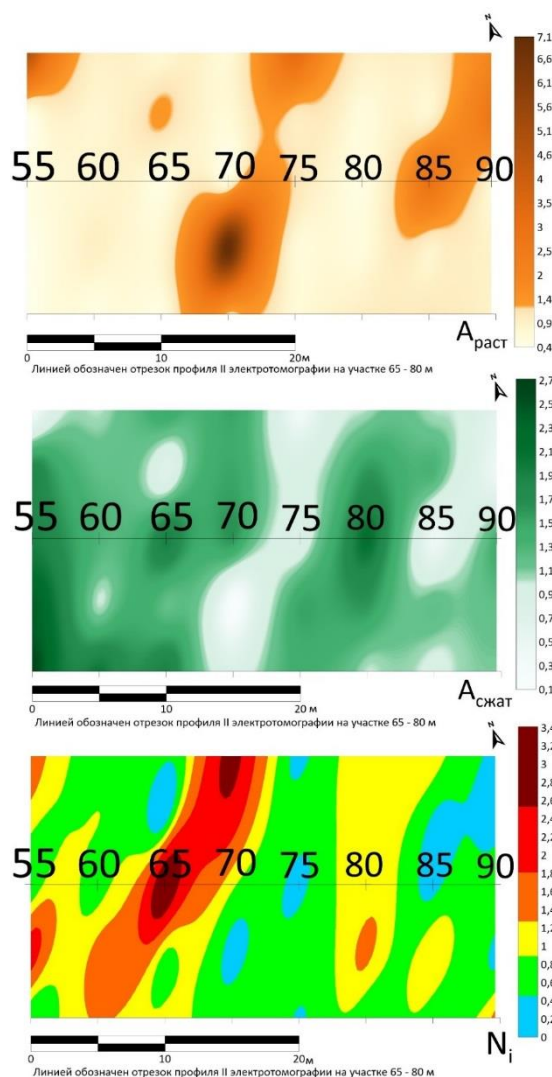


Рис. 5. Карты распределения показателя деформаций растяжения, показателя деформаций сжатия по данным радонометрии относительной современной геодинамической активности на участке аномалии разуплотнения по результатам электротомографии.
Горный массив территории г. Березовский Свердловской области

Заключение

В ходе проведенных исследований, основанных на теоретических представлениях о формировании поля почвенного радона, были экспериментально установлены закономерности взаимосвязи между показателями деформаций растяжения, сжатия и геодинамической активности по данным радонометрии. Эти закономерности позволяют выявлять и классифицировать деформации в горном массиве, выделяя следующие типы:

- малоглубинные зоны разуплотнения;
- активные дизъюнктивные нарушения;
- участки деформаций сжатия.

Применение радонометрии для оценки геодинамической обстановки на локальном участке подработанной территории подтвердило высокую эффективность метода, что открывает перспективы для его использования в инженерной геологии.

Список литературы

1. Zuev P., Vedernikov A., Grigoriev D., 2020. Using the method of electrical imaging for obtaining the modulus of elasticity in open cast mining. *E3S Web of Conferences*, Vol. 192, No. 01030. doi.org/10.1051/e3sconf/202019201030.
2. Ronczka M., Hellman K., Günther T., Wisén R., Dahlin T., 2017. Electric resistivity and seismic refraction tomography: a challenging joint underwater survey at Äspö Hard Rock Laboratory. *Solid Earth*, V. 8, P. 671 – 682. doi.org/10.5194/se-8—671—2017.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Среднеуральская. Лист О-41-XXV. Объяснительная записка / Р.Д. Калугина, В.Ф. Копанев, Е.В. Стороженко [и др.]; Роснедра, ОАО «Уральская ГСЭ». Москва: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2017, 156 с.
4. Уткин В.И., Юрков А.К., 2010. Радон как индикатор геодинамических процессов. *Геология и геофизика*, Т. 51, № 2, С. 277 – 286.
5. Далатказин Т.Ш., 2023. Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 64 – 69.
6. Далатказин Т.Ш., Коновалова Ю.П., Зуев П.И., Шевченко М.Д., 2023. Выявление зон деформаций растяжения и сжатия в массиве горных пород с использованием радонометрии. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, Вып. 4, С. 324 – 332.
7. Bossew P., 2003. The radon emanation power of building materials, soils and rocks. *Appl. Radiat. Isot.*, V. 59, 389 – 392.
8. Ульянов В.Ю., 2015. Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС в асейсмичных регионах. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 103 – 107.
9. Новиков Г.Ф., Капков Ю.Н., 1965. *Радиоактивные методы разведки*. Ленинград: Недра, 759 с.
10. Сердюкова А.С., Капитонов Ю.Т., 1969. *Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе*. Москва: Атомиздат, 312 с.
11. Далатказин Т.Ш., Коновалова Ю.П., Ручкин В.И., Зуев П.И., 2019. Исследования по модернизации использования эманационной съемки в качестве экспресс-метода при геодинамической диагностике. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, Вып. 4, С. 206 – 220.
12. Ye Y.J., Zhang Y.F., Dai X.T., Ding D.X., 2017. A universal laboratory method for determining physical parameters of radon migration in dry granulated porous media. *J. Environ. Radioact.*, V. 177, 135 – 141.

13. Ялпута Е.А., Базеева Р.П., Донченко Э.В., Шалованов О.Л., Салий С.Г., Бородин Д.С., 2020. Методы мониторинга радоновыделения для изучения геодинамически активных зон горного массива. *Журнал теоретической и прикладной механики*, № 3 (72), С. 57 – 64.
14. Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С., 2019. Радоновая и тектоническая активность разломов земной коры (на примере Центральной Монголии). *Геология и геофизика*, Т. 60, № 2, С. 243 – 255
15. Спивак А.А., 2008. Объемная активность подпочвенного радона в зонах тектонических нарушений. *Геофизика межгеосферных взаимодействий*. Москва: ГЕОС, С. 235 – 247.
16. Уткин В.И., Юрков А.К., Козлова И.А., 2008. Выделение радона из горных пород при воздействии на них упругих колебаний различного диапазона. *Геофизика XXI столетия: сб. тр. девярых геофизических чтений им. В.В. Федынского*. Тверь: ООО Изд-во «ГЕРС», С. 317 – 320.
17. Ball T.K., Cameron D.G., Colman T.B., Roberts P.D. 1991. Behaviour of radon in the geological environment: a review. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol*, V. 24, P. 169 – 182.
18. Адушкин В.В. [и др.], 2005. Резонансные особенности эсхалации природного радона. *ДАН*, Т. 400, № 3, С. 369 – 371.
19. Селюков Е.И., Стигнеева Л.Т., 2010. *Краткие очерки практической микрогеодинамики*. Санкт-Петербург: Питер, 176 с.

References

1. Zuev P., Vedernikov A., Grigoriev D., 2020. Using the method of electrical imaging for obtaining the modulus of elasticity in open cast mining. *E3S Web of Conferences*, Vol. 192, No. 01030. doi.org/10.1051/e3sconf/202019201030.
2. Ronczka M., Hellman K., Günther T., Wisén R., Dahlin T., 2017. Electric resistivity and seismic refraction tomography: a challenging joint underwater survey at Äspö Hard Rock Laboratory. *Solid Earth*, V. 8, R. 671 – 682. doi.org/10.5194/se-8—671—2017.
3. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1 : 200 000 [The 1:200,000 scale State Geological Map of the Russian Federation]. Izdanie vtoroje. Seriya Sredneural'skaya. List O-41-XXV. Ob'yasnitel'naya zapiska / R.D. Kalugina, V.F. Kopanев, E.V. Storozhenko [i dr.]; Rosnedra, OAO "Ural'skaya GSE". Moscow: Moskovskii filial FGBU "VSEGEI", 2017, 156 p.
4. Utkin V.I., Yurkov A.K., 2010. Radon kak indikator geodinamicheskikh protsessov. *Geologiya i geofizika* [Radon as an indicator of geodynamic processes], Vol. 51, № 2, P. 277 – 286.
5. Dalatkazin T.Sh., 2023. Metodicheskie voprosy geodinamicheskogo raionirovaniya massiva gornyx porod s ispol'zovaniem radonometrii . [Methodological issues of geodynamic zoning of a rock mass using radonometry]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1, P. 64 – 69.
6. Dalatkazin T.Sh., Konovalova Yu.P., Zuev P.I., Shevchenko M.D., 2023. Vyyavlenie zon deformatsii rastyazheniya i szhatiya v massive gornyx porod s ispol'zovaniem radonometrii [Identification of zones of strain and compression deformations in a rock mass using radonometry]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, Vyp. 4, P. 324 - 332.
7. Bossew P., 2003. The radon emanation power of building materials, soils and rocks. *Appl. Radiat. Isot.*, V. 59, 389 – 392.
8. Ul'yanov V.Yu., 2015. Organizatsiya i metodika provedeniya monitoringa radona na ploshchadkakh AES v aseismichnykh regionakh [Organization and methodology of radon monitoring at NPP sites in aseismic regions]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1, P. 103-107.
- 9 Novikov G.F., Kapkov Yu.N., 1965. Radioaktivnye metody razvedki [Radioactive methods of purification]. Leningrad: Nedra, 759 p.

10. Serdyukova A.S., Kapitonov Yu.T., 1969. Izotopy radona i korotkozhivushchie produkty ikh raspada v prirode [Radon isotopes and short-lived decay products in nature]. Moscow: Atomizdat, 312 p.
11. Dalatkazin T.Sh., Konovalova Yu.P., Ruchkin V.I., Zuev P.I., 2019. Issledovaniya po modernizatsii ispol'zovaniya emanatsionnoi s'emki v kachestve ekspress-metoda pri geodinamicheskoi diagnostike [Research on the modernization of the use of emanation extraction as an express method in geodynamic diagnostics]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Nauki o Zemle, Vyp. 4, P.206 – 220
12. Ye Y.J., Zhang Y.F., Dai X.T., Ding D.X., 2017. A universal laboratory method for determining physical parameters of radon migration in dry granulated porous media. J. Environ. Radioact., V. 177, 135 – 141.
13. Yalputa E.A., Bazeeva R.P., Donchenko E.V., Shalovanov O.L., Salii S.G., Borodin D.S., 2020. Metody monitoringa radonovydeleniya dlya izucheniya geodinamicheskii aktivnykh zon gornogo massiva [Radon emission monitoring methods for studying geodynamically active zones of the mountain range]. Zhurnal teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki, № 3 (72), P. 57 – 64.
14. Seminskii K.Zh., Bobrov A.A., Demberel S., 2019. Radonovaya i tektonicheskaya aktivnost' razlomov zemnoi kory (na primere Tsentral'noi Mongolii) [Radon and tectonic activity of crustal faults (on the example of Central Mongolia)]. Geologiya i geofizika, Vol. 60, № 2, P. 243 – 255
15. Spivak A.A., 2008. Ob'emnaya aktivnost' podpochvennogo radona v zonakh tektonicheskikh narushenii [The volume activity of subsurface radon in the zones of tectonic disturbances]. Geofizika mezhgeosfernykh vzaimodeistvii. Moscow: GEOS, P. 235 – 247.
16. Utkin V.I., Yurkov A.K., Kozlova I.A., 2008. Vyделение radona iz gornykh porod pri vozdeistvii na nikh uprugikh kolebaniy razlichnogo diapazona [Isolation of radon from rocks when exposed to elastic vibrations of various ranges] // Geofizika XXI stoletiya: sb. tr. devyatykh geofizicheskikh chtenii im. V.V. Fedynskogo. Tver': OOO Izd-vo "GERS", P. 317 - 320.
17. Ball T.K., Cameron D.G., Colman T.B., Roberts P.D. 1991. Behaviour of radon in the geological environment: a review. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol, V. 24, P. 169 – 182.
18. Adushkin V.V. [i dr.], 2005. Rezonansnye osobennosti eskhalyatsii prirodnogo radona [Resonant features of natural radon escalation]. DAN, Vol. 400, № 3, P. 369 – 371.
19. Selyukov E.I., Stigneeve L.T., 2010. Kratkie ocherki prakticheskoi mikrogeodinamiki [Brief sketches of practical microgeodynamics]. Sankt-Peterburg: Piter, 176 p.