

УДК 622.83:550.3

**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](mailto:9043846175@mail.ru)

**Зуев Павел Игоревич**

научный сотрудник,  
лаборатория технологии снижения риска ката-  
строф при недропользовании,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [zuev@igduran.ru](mailto:zuev@igduran.ru);

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ  
ПРИМЕНЕНИЯ РАДОНОМЕТРИИ  
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ УЧАСТКОВ  
РАЗУПЛОТНЕНИЯ В ПОДРАБОТАННОМ  
ГОРНОМ МАССИВЕ\***

*Аннотация:*

Представлены результаты экспериментальных исследований возможности применения радонометрии для выявления и оконтуривания подземных горных выработок на подработанных территориях. Для обеспечения безопасности объектов недропользования на подработанных горными работами территориях необходима диагностика геомеханического состояния подстилающего горного массива – выявление участков горного массива, разуплотненных в результате сдвижения горных пород. Эффективным решением данной задачи является использование геофизических методов. Выполнены исследования возможности применения радонометрии для решения обозначенной задачи. Предпосылками для проведения данных исследований являются свойства радиоактивного газа радон и современные представления о формировании геодинамической составляющей поля радоновых эманацй в почвенном воздухе. Зона сдвижения горных пород над выработанным пространством характеризуется чередованием участков растяжения и сжатия. На исследуемой территории выполнены эманацйонная съемка и исследования по раздельному определению содержания радона и торона в почвенном воздухе, построены карты геодинамической активности по данным радонометрии, карта деформаций растяжения и карта растяжений сжатия. Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о перспективности дальнейших исследований возможности применения радонометрии для изучения подработанных территорий.

*Ключевые слова:* массив горных пород, радон, геодинамическая диагностика, радоновые эманацйи, сдвижение горных пород, деформации растяжения, деформации сжатия.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.143

**Dalatkazim Timur Sh.**

Candidate of Technical Sciences,  
Head of Laboratory of hazard risk  
reducing in mining,  
Institute of Mining UB RAS,  
620075 Ekaterinburg  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [9043846175@mail.ru](mailto:9043846175@mail.ru)

**Zuev Pavel I.**

Researcher,  
Laboratory of hazard risk  
reducing in mining,  
Institute of Mining UB RAS  
e-mail: [zuev@igduran.ru](mailto:zuev@igduran.ru)

**EXPERIMENTAL STUDIES  
OF THE POSSIBILITY OF USING  
RADONOMETRY TO IDENTIFY  
DECAPACITY AREAS  
IN UNDERWORKED ROCK MASSIF**

*Abstract:*

The article presents the results of experimental studies of the possibility of using radonometry to detect and delineate underground mine workings in underworked areas. Ensuring the safety of subsoil use facilities in areas underworked by mining operations requires diagnostics of the geomechanical state of the underlying rock massif – identification of areas of the rock massif that have become recompacted as a result of rock displacement. An effective solution to this problem is the use of geophysical methods. The studies have been carried out to study the possibility of using radonometry to solve the discussed problem. The prerequisites for these studies are the properties of radioactive gas radon and modern concepts of the formation of the geodynamic component of the radon emanation field in the soil air. The zone of rock displacement above the mined-out space is characterized by alternating areas of extension and compression. An emanation survey and studies on separate determination of radon and thoron content in the soil air were carried out on the study area. Maps of geodynamic activity based on radonometry data, a map of extension deformations and a map of compression extensions were constructed. Analysis of the research results allows us to conclude that further research into the possibility of using radonometry to study underworked areas is promising.

*Key words:* rock mass, radon, geodynamic diagnostics, radon emanations, rock displacement, tensile strain, compression strain.

\* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПП, тема 3 (2022 – 2024), (FUW-2022-0005), рег. No1021062010531-8-1.5.1.

### *Введение*

На территории г. Березовский Свердловской области, горный массив которой подработан горными работами, зачастую отсутствует документация, позволяющая определить пространственное положение подземных горных выработок. На таких территориях могут образовываться оседания поверхности и провалы [1].

Территория г. Березовский Свердловской области характеризуется следующими особенностями:

- город полностью расположен на территории месторождения;
- месторождение разрабатывается на протяжении 265 лет с полным разнообразием технологий добычи, присущим различным периодам его существования. «Казенная добыча» золота более 150 лет велась в приповерхностной части месторождения на глубинах, не превышавших 45 – 50 м. За этот период было построено более 1000 мелких шахт. Все это время повсеместно велась браконьерская старательская добыча мелкими горными выработками, документация по которым отсутствует. Отсутствие документации, позволяющей определить пространственное положение подземных горных выработок, определяет угрозу для строительства инженерных сооружений, т.к. на подработанном участке могут образовываться оседания поверхности и провалы [1].

Для обеспечения безопасности строительства и эксплуатации объектов недропользования на таких территориях необходима диагностика геомеханического состояния подстилающего горного массива – выявление и оконтуривание участков, дезинтегрированных в результате сдвижения горных пород. Оптимальным решением данной задачи является использование комплекса геофизических методов.

### *Геологическая характеристика*

Коренные породы района работ представлены базальтами афировыми, вариолитами, туфопесчаниками, туфоалевролитами, туффитами, кремнистыми, углеродисто-кремнистыми сланцами, зелеными сланцами, микроамфиболитами, кварцитами, 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, простираение близмеридиональное, падение крутое. К поперечным трещинам разрыва в дайках приурочены короткие крутопадающие кварцеворудные «лестничные» жилы, менее развиты пологие широтные и диагональные. В осадочно-вулканогенных и интрузивных породах имеются «красичные» жилы, однотипные по составу с «лестничными» и местами являющиеся их продолжением во вмещающих породах. Жилы в пределах рудного поля распространены неравномерно.

На территории в пределах глубины до 5,0 – 18,0 м присутствует линейный тип коры выветривания материнских пород. Этот тип образует клинообразные формы продуктов выветривания, которые возникли вдоль контактов пород, зон дробления и разломов. Кора выветривания представлена элювиальными образованиями глыбовой и дисперсной зон.

К глыбовой зоне отнесены:

- полускальные сильнотрещиноватые грунты (рухляки) сланцев желто-коричневого цвета, наблюдаются на глубине 4,5 – 10,0 м;
- полускальные сильнотрещиноватые грунты (рухляки) березитов желто-серого и зеленовато-серого цвета, наблюдаются на глубине 2,3 – 13,0 м.

Дисперсная зона представлена элювиальными суглинками супесями. Элювиальные образования наблюдаются на глубине залегания 1,5 – 7,7 м.

Институтом горного дела в 2024 г. на территории г. Березовский Свердловской области выполнялись исследования возможности применения радонометрии для выяв-

ления и оконтуривания участков сдвижения горных пород, образовавшихся в результате процесса сдвижения в подработанном горном массиве.

Свойства радиоактивного газа радон и современные представления о формировании геодинамической составляющей поля радоновых эманаций в почвенном воздухе являются предпосылками для проведения данных исследований.

Радон является благородным, химически инертным газом – не вступает во взаимодействие с другими элементами, без цвета и запаха, хорошо растворяется в воде. Это источник альфа-излучения, и поэтому уверенно регистрируется даже при малых концентрациях специальными приборами. Он в 7,5 раз тяжелее атмосферного воздуха, обладает высокой проникающей способностью. Период полураспада радона  $^{222}\text{Rn}$  составляет 3,8 суток, торона  $^{220}\text{Rn}$  – 59 сек. Генерация его в горных породах происходит непрерывно [2].

Земная кора содержит радиоактивные природные элементы, которые создают естественный радиоактивный фон, в том числе в горных породах, почве, воде, растениях и тканях живых организмов присутствуют члены радиоактивных семейств  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  – материнские нуклиды, которые имеют очень большие периоды полураспада:  $^{238}\text{U}$  –  $4,5 \times 10^9$  лет,  $^{235}\text{U}$  –  $0,7 \times 10^9$  лет,  $^{232}\text{Th}$  –  $14 \times 10^9$  лет. Газообразными продуктами, которые рождаются в процессе распада, являются гелий-4 и изотопы радона. Наибольший вклад в газовую составляющую естественных радиоактивных элементов вносят радиоактивные семейства  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , в процессе радиоактивного распада которых образуются изотопы  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{224}\text{Ra}$ . Изотопы радона –  $^{222}\text{Rn}$  появляются непосредственно при распаде  $^{226}\text{Ra}$  (период полураспада 1590 лет) и  $^{220}\text{Rn}$  – при распаде  $^{224}\text{Ra}$  (период полураспада 3,66 дня).

Повсеместное распространение изотопов радия приводит также к *повсеместному* распространению в природе и в горных породах изотопов радона. Изотопы радона являются альфа-излучателями. Изотопы радона представляют собой радиоактивные газообразные вещества – эманации.

Эманация радона в почвенном воздухе представляет собой смесь радона –  $\text{Rn}_{222}$  и торона –  $\text{Tn}$  ( $\text{Rn}_{220}$ ). Период полураспада  $\text{Rn}_{222}$  составляет 3,8 суток, а период полураспада  $\text{Tn}$  – 55,6 секунд. Благодаря контрастной разнице величин времени полураспада современный геодинамический процесс определяет соотношение радона –  $\text{Rn}_{222}$  и торона –  $\text{Tn}$  ( $\text{Rn}_{220}$ ) в эманациях в почвенном воздухе [2, 3].

В почвенном воздухе над зоной растяжения в горном массиве аккумулируется смесь радона и торона после миграции к поверхности по раскрытым трещинам после эманации из горных пород. Значительная доля  $\text{Tn}$  в этой смеси уменьшается (по сравнению с соседними, не затронутыми деформационными процессами участками) во время миграции за счет значительно более быстрого распада по сравнению с  $\text{Rn}_{222}$ .

В почвенном воздухе над участком сжатия геодинамическая составляющая процесса эманации радона определяется в основном вибровоздействием на горные породы, возникающим при сжимающих деформациях – трещины смыкаются, что ограничивает миграцию газообразных флюидов из глубины массива. Поступающая в почву газовая смесь здесь формируется в основном вблизи поверхности, и доля нераспавшегося торона больше по сравнению с почвенным слоем над зоной растяжения [4]. Исходя из сказанного соотношение торона и радона в почвенном воздухе можно использовать для выявления, оконтуривания и дифференциации деформаций на участки сжатия и участки растяжения.

С целью определения возможности использования радонометрии для выявления и оконтуривания участков сдвижения горных пород на подработанной территории на экспериментальном участке были выполнены:

- эманационная съемка;
- выявление зон сжатия и зон растяжения с использованием радонометрии.

## Методика исследования

*I. Геодинамическое районирование горного массива на основе применения эманацционной съемки.*

Геодинамическое районирование с использованием радонометрии с применением нормирования позволяет выявить геодинамически активные участки массива, что вызвано деформационным процессом, в том числе и в зоне сдвижения. Геодинамическая составляющая поля радоновых эманацций формируется за счет

- повышенной проницаемости горных пород;
- вибровоздействия на горные породы [5].

Измерения объемной активности радона ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ) в почвенном воздухе выполняются радиометрами альфа-активных газов, например, РГА-500 по профильным линиям из шпуров, глубиной 0,8 – 1,0 м. При выполнении радонометрических исследований на территории г. Березовский шпур для отбора проб почвенного воздуха бурился с использованием бензинового перфоратора М 58, что сократило время и трудозатраты.

С целью определения геодинамической составляющей формирования поля радона выполняется нормирование значений объемной активности радона в почвенном воздухе. Для этого полученные в результате измерений значения объемной активности радона группируются по принадлежности к однотипным участкам:

- 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 период измерений. Рассчитываются нормированные значения объемной активности радона для каждой точки измерения группы:

$$N_i = Q_i / Q_{\text{ср. группы}},$$

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,  $\text{Бк}/\text{м}^3$ ;  $Q_{\text{ср. группы}}$  – среднеарифметическое значение объемной активности радона в почвенном воздухе группы значений,  $\text{Бк}/\text{м}^3$ .

Составляется карта распределения нормированных значений объемной активности радона в почвенном воздухе изучаемой территории, на основе которой осуществляется ее геодинамическое районирование [6, 7, 8].

*II. Радонометрические исследования для выявления зон растяжения и сжатия.*

В зоне сдвижения наблюдается чередование зон растяжения и зон сжатия. Для оперативного выявления и оконтуривания зон деформаций растяжения и сжатия в массиве горных пород применяется методика использования соотношения  $Q_{\text{Rn222}}$  и  $Q_{\text{Tn}}$  в почвенном воздухе. Данная методика заключается в следующем:

1. Раздельное определение  $\text{Rn}_{222}$  и  $\text{Tn}$  при выполнении эманацционной съемки.
2. Определение показателя растяжения и показателя сжатия по данным радонометрии.
3. Построение карт деформаций растяжения и сжатия исследуемого горного массива по данным радонометрии.

Измерения объемной активности радона ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ) в почвенном воздухе выполняются радиометрами альфа-активных газов, например, РГА-500 по профильным линиям из шпуров глубиной 0,8 – 1,0 м.

Для раздельного определения  $\text{Rn}_{222}$  и  $\text{Tn}$  ( $\text{Rn}_{220}$ ) в отбираемых пробах почвенного воздуха использовалась следующая методика.

В процессе выполнения эманацционной съемки, после измерения объемной активности смеси ( $\text{Rn}_{222} + \text{Tn}$ ) ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ), проба почвенного воздуха остается в измеритель-

ной 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 определяется показатель  $A_{\text{раст}}$ :

$$A_{\text{раст}} = \frac{Q_{Rn_{222}}}{Q_{Tn}},$$

где  $Q_{Rn_{222}}$  – объемная активность  $Rn_{222}$ , Бк/м<sup>3</sup>;  $Q_{Tn}$  – объемная активность  $Tn$ , Бк/м<sup>3</sup>.

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

Для выявления зон сжатий в горном массиве исследуемой территории определяется показатель  $A_{\text{сжат}}$ :

$$A_{\text{сжат}} = \frac{Q_{Tn}}{Q_{Rn_{222}}}.$$

По значениям  $A_{\text{сжат}}$  строится карта сжатий [10].

### *Результаты исследований*

На локальном участке полигона в г. Березовский в 43 точках измерения было последовательно определено по вышеприведенной методике суммарное содержание  $Rn$  и  $Tn$  ( $\Sigma Rn + Tn$ ), содержания  $Rn$  и содержание  $Tn$  в почвенном воздухе по двум профильным линиям.

Всего выполнено 43 измерения с шагом 10 м по двум параллельным профильным линиям. Расстояние между профильными линиями 20 м.

По результатам полевых исследований были определены значения нормированной объемной активности радона в почвенном воздухе ( $N_i$ ), показатель растяжения (разуплотнения)  $A_{\text{раст}}$  и показатель сжатия для каждой точки измерения  $A_{\text{сжат}}$  (табл. 1). Далее были построены карты каждого определенного параметра (рис. 1).

В целом по исследуемому участку зоны сжатия чередуются с зонами растяжения. В целом значения  $A_{\text{раст}}$  изменяются от 0,3 до 4. Особое внимание вызывает аномальное значение показателя растяжения  $A_{\text{раст}} = 38,5$ . Данный показатель свидетельствует об интенсивной степени дезинтеграции горных пород и может рассматриваться как признак расположения здесь горизонтальной горной выработки.

Интересен тот факт, что в точках с аномальными значениями показателя  $A_{\text{раст}}$  (в табл. 1 отмечены красным цветом), значения  $N_i$  имеют величины ниже фоновых. Это может свидетельствовать о том, что в целом данный участок имеет невысокие значения природной составляющей современной геодинамической активности. Здесь отсутствует природный канал поступления  $Rn$  (геодинамически активного дизъюнктивного нарушения). При этом разуплотнение обеспечивается объектом, вероятно, техногенного происхождения, расположенным на относительно небольшой глубине. В маломощном, приповерхностном и разуплотненном участке с повышенной пористостью  $Rn$  под влиянием диффузного (наличие градиента концентрации), конвективного (вследствие температурного градиента) и эффузионного (вызывается градиентом давления) механизмов распространения перемещается к земной поверхности. В результате разуплотнения относительно маломощного участка горного массива концентрация  $Rn$  снижается по сравнению с соседними, не разуплотненными участками. В то же время закономерность формирования долей содержания  $Rn$  и  $Tn$  сохраняется. Таким образом, аномальные значения показателя  $A_{\text{раст}}$  при пониженных значениях  $N_i$  могут свидетельствовать о наличии малоглубинного объекта разуплотнения.

В точках наблюдения 8, 13, 16, 35, 36 замечено сочетание аномальных значений показателя  $A_{\text{сжат}}$  и повышение значений  $N_i$ . Данный факт объясняется повышенным эманированием радона из горных пород за счет вибровоздействия на них, возникающего при сжимающих деформациях.

Таблица 1  
Значения нормированной активности  $R_n$ , показателя растяжения, показателя сжатия  
на локальном участке территории г. Березовский.  
Жирным шрифтом выделены аномальные значения показателя  $A_{\text{растяж.}}$

№ точек измерений	$N_i$	$A_{\text{растяж.}}$	$A_{\text{сжат.}}$
1	0,1	0,5	2,0
2	0,1	1,2	0,8
3	0,6	0,8	1,2
4	0,5	0,5	1,9
5	0,1	1,0	1,0
6	0,1	<b>2,4</b>	0,4
7	2,4	-	-
8	1,5	0,4	2,4
9	0,6	1,1	0,9
10	0,5	0,9	1,1
11	0,4	1,3	0,8
12	1,7	1,1	0,9
13	1,5	0,5	2,1
14	0,4	1,6	0,6
15	1,1	0,5	1,9
16	1,1	0,4	2,4
17	0,5	1,0	1,0
18	0,7	1,0	1,0
19	0,8	0,3	3,3
20	1,5	1,2	0,8
21	0,4	<b>38,5</b>	0,03
22	0,3	1,0	1,1
23	0,2	<b>3,5</b>	0,3
24	1,1	0,5	2,1
25	1,0	0,4	2,5
26	0,7	0,5	2,1
27	0,2	1,0	1,0
28	0,6	0,4	2,7
29	3,4	1,6	0,7
30	0,7	0,9	1,1
31	0,9	0,7	1,4
32	5,8	1,2	0,8
33	3,4	0,5	1,9
34	0,7	2,8	0,4
35	1,3	0,4	2,3
36	1,5	0,4	2,4
37	0,4	<b>2,3</b>	0,4
38	1,4	1,2	0,8
39	0,5	<b>3,1</b>	0,3
40	0,8	1,5	0,7
41	1,2	1,2	0,9
42	0,6	<b>4,0</b>	0,3
43	0,8	1,0	1,0

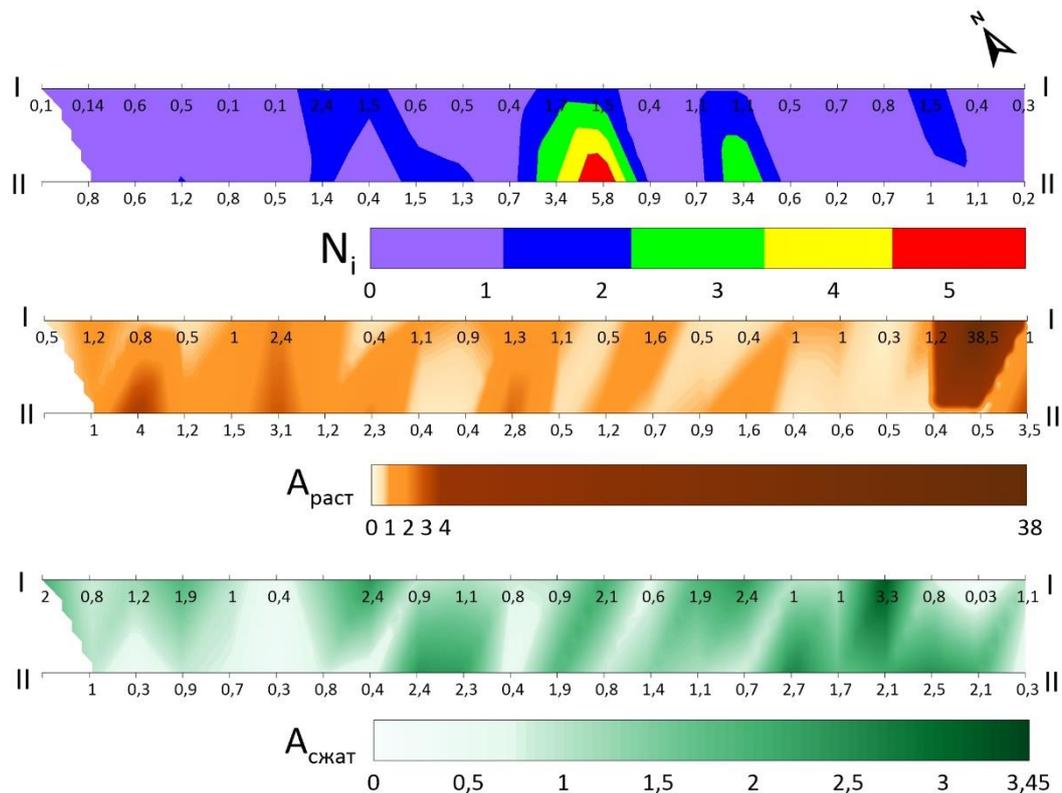


Рис. 1. Распределение зон растяжения и сжатия по данным радонометрии на исследуемом локальном участке, территория г. Березовский Свердловской области

### Выводы

Результаты проведенных исследований на участке на юго-западной окраине г. Березовский Свердловской области по возможности использования радонометрии для выявления и оконтуривания подземных горных выработок, вероятно, свидетельствуют о наличии следующей закономерности: аномальные значения показателя  $A_{\text{раст}}$  при пониженных значениях  $N_i$  могут свидетельствовать о наличии малоуглубленного объекта разуплотнения, что говорит о перспективности дальнейших исследований в данном направлении.

### Список литературы

1. Усанов С.В., 2011. Методика оценки безопасности застройки территорий над старыми горными выработками. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, Отд. вып. № 11. Проблемы недропользования, С. 260 – 266.
2. Сердюкова А.С., Капитонов Ю.Т., 1969. *Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе*. Москва: Атомиздат.
3. 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. Сборник трудов Девярых геофизических чтений им. В.В. Федынского*. Тверь: ООО Изд-во «ГЕРС», С. 317– 320.
4. Далатказин Т.Ш., Коновалова Ю.П., Шевченко М.Д., Зуев П.И., 2023. Новые возможности радонометрии в комплексе геодинамической диагностики горного массива. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 34 – 42. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.034.
5. Далатказин Т.Ш., Коновалова Ю. П., Ручкин В.И., Зуев П.И., 2019. Исследования по модернизации использования эманацционной съемки в качестве экспресс-метода при геодинамической диагностике. *Известия Тульского государственного университета*.

ного университета. *Науки о Земле*, № 4, С. 206 – 220.

6. Далатказин Т.Ш., 2023. Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 64 – 69. DOI : 10.25635/2313-1586.2023.01.064.

7. Мальцев К.А., Мухарамова С.С., 2014. *Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): Учебное пособие*. Казань: Казанский университет, 103 с.

8. Скворцов А.В., 2002. *Триангуляция Делоне и ее применение*. Томск: Изд-во Том. ун-та, 128 с.

9. Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н., 1965. *Радиоактивные методы разведки*. Ленинград: Недра, 759 с.

10. 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*, № 4, С. 324 – 332. DOI: 10.25635/r8348-0456-9118-w.

### References

1. Usanov S.V., 2011. Metodika otsenki bezopasnosti zastroiki territorii nad starymi gornymi vyrabotkami [Methodology for assessing the safety of building territories over old mine workings]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, Otd. vyp. № 11. Problemy nedropol'zovaniya, P. 260 – 266.

2. Serdyukova A.S., Kapitonov Yu.T., 1969. Izotopy radona i korotkozhivushchie produkty ikh raspada v prirode [Radon isotopes and radon progenies decay in nature]. Moscow: Atomizdat.

3. Utkin V.I., Yurkov A.K., Kozlova I.A., 2008. Vydelenie radona iz gornykh porod pri vozdeistvii na nikh uprugikh kolebaniy razlichnogo diapazona [Release of radon from rocks when exposed to elastic vibrations of various ranges]. *Geofizika XXI stoletiya. Sbornik trudov Devyatykh geofizicheskikh chtenii im. V.V. Fedynskogo*. Tver': OOO Izd-vo "GERS", P. 317– 320.

4. Dalatkazin T.Sh., Konovalova Yu.P., Shevchenko M.D., Zuev P.I., 2023. Novye vozmozhnosti radonometrii v komplekse geodinamicheskoi diagnostiki gornogo massiva . [New possibilities of radonometry in the complex of geodynamic diagnostics of the mountain range]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4, P. 34 – 42. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.034.

5. 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 for geodynamic diagnostics]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 4, P. 206 – 220.

6. Dalatkazin T.Sh., 2023. Metodicheskie voprosy geodinamicheskogo raionirovaniya massiva gornykh porod s ispol'zovaniem radonometrii [Methodological issues of geodynamic zoning of a rock mass using radonometry]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1, P. 64 – 69. DOI : 10.25635/2313-1586.2023.01.064.

7. Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S., 2014. Postroenie modelei prostranstvennykh peremennykh (s primeneniem paketa Surfer): Uchebnoe posobie [Building models of spatial variables (using the Surfer package): An educational tool]. Kazan': Kazanskii universitet, 103 p.

8. Skvortsov A.V., 2002. Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye [Delaunay triangulation and its application]. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 128 p.

9. Novikov G. F., Kapkov Yu. N., 1965. Radioaktivnye metody razvedki [Radioactive methods for exploration activities]. Leningrad: Nedra, 759 p.



---

10. Dalatkazin T.Sh., Konovalova Yu.P., Zuev P.I., Shevchenko M.D., 2023. Vyyavlenie zon deformatsii rastyazheniya i szhatiya v massive gornykh porod s ispol'zovaniem radonometrii. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta [Identification of zones of tension and compression deformations in a rock mass using radonometry]. Nauki o Zemle, № 4, P. 324 – 332. DOI: 10.25635/r8348-0456-9118-w.