

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

Коновалова Юлия Павловна

старший научный сотрудник,
лаборатория сдвига горных пород,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: lisjul@mail.ru

Зуев Павел Игоревич

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

Шевченко Максим Дмитриевич

младший научный сотрудник,
лаборатория технологии снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: maksim_shevchenko97@inbox.ru

**НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ
РАДОНОМЕТРИИ В КОМПЛЕКСЕ
ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ****Аннотация:*

Представлены результаты исследований по проверке соответствия гипотезы: в соотношении значений объемной активности радона и торона в почвенном воздухе на участках деформаций растяжений увеличивается доля радона, а на участках деформаций сжатия увеличивается доля торона по сравнению с соседними, не охваченными деформациями участками горного массива. Гипотеза сформулирована исходя из современных научных представлений о механизме формирования геодинамической составляющей поля радоновых эманацій в почвенном воздухе и свойств радона и торона. Выполнены экспериментальные исследования на геодинамическом полигоне. Экспериментальные исследования по проверке выдвинутой гипотезы заключались в сравнении результатов радонометрии и геодезических мониторинговых исследований. Экспериментальные исследования полностью подтвердили достоверность выдвинутой гипотезы. Новые возможности использования радонометрии позволяют оперативно, без мониторинговых исследований выявлять участки деформаций растяжения и сжатия в комплексе геодинамической диагностики горного массива для обеспечения безопасности объектов недропользования и в гидрогеологии для определения места заложения гидрогеологических скважин.

Ключевые слова: современная геодинамика, горный массив, деформация растяжения, деформация сжатия, радон, торон.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.034

Dalatkazim Timur Sh.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory of technology for reducing the
risk of catastrophes in subsoil use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiriyaka Str.
e-mail: 9043846175@mail.ru

Konovalova Yuliya P.

Senior Researcher,
Laboratory of technology for reducing the risk of
catastrophes in subsoil use,
Institute of Mining of the Ural Branch of RAS
e-mail: lisjul@mail.ru

Zuev Pavel I.

Researcher, Laboratory of technology for reducing
the risk of catastrophes in subsoil use, Institute of
Mining of the Ural Branch of the RAS
e-mail: zuev@igduran.ru

Shevchenko Maksim D.

Junior Researcher,
Laboratory of technology for reducing the risk of
catastrophes in subsoil use,
Institute of Mining of the Ural Branch RAS
e-mail: maksim_shevchenko97@inbox.ru

**NEW POSSIBILITIES OF RADONOMETRY
IN THE COMPLEX OF GEODYNAMIC
DIAGNOSTICS***Abstract:*

The paper presents the results of studies to test the compliance of the hypothesis: in the ratio of the volumetric activity values of radon and thoron in the soil air, the proportion of radon increases in areas of tensile deformations, and the proportion of thoron increases in areas of compression deformations, compared with neighboring areas not affected by deformations. The hypothesis is formulated based on modern scientific ideas about the mechanism of formation of the geodynamic component of the field of radon emanations in the soil air and the properties of radon and thoron. Experimental studies were carried out at a geodynamic test site. Experimental studies to test the proposed hypothesis consisted of comparing the results of radonometry and geodetic monitoring studies. Experimental studies fully confirmed the reliability of the hypothesis put forward. The results obtained will make it possible to quickly, without monitoring studies, identify areas of tension and compression deformations in the complex of geodynamic diagnostics of a mountain range to ensure the safety of subsoil use objects and in hydrogeology.

Key words: modern geodynamics, mountain range, tensile deformation, compression deformation, radon, thoron.

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

Введение

Напряженно-деформационное состояние массива горных пород имеет определяющее значение для обеспечения безопасности проектируемых, строящихся и эксплуатируемых объектов недропользования.

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 урана (^{238}U , ^{235}U) и тория (^{232}Th). Эти три радиоактивных элемента образуют цепочки последовательно превращающихся один в другой изотопов, вплоть до образования стабильных изотопов свинца. Газообразными продуктами, которые рождаются в процессе распада трех «семейств», являются гелий-4 и изотопы радона и торона. Повсеместное распространение изотопов радия приводит также к *повсеместному* распространению в природе и в горных породах, в частности, их дочерних продуктов – изотопов радона и торона. Изотопы радона, как и уран, торий, радий, являются альфа-излучателями и в процессе распада продуцируют целое семейство других альфа и бета-излучателей. Период полураспада Rn_{222} составляет 3,8 суток, а период полураспада Tn – 55,6 секунд [1]. Изотопы радона и торона представляют собой радиоактивные газообразные вещества – эманации, которые непрерывно генерируются из всех без исключения горных пород. Изотопы радона и торона, будучи радиоактивными, распадаются, испуская в основном альфа-частицы. Альфа-излучение изотопов радона и продуктов их распада используется при измерении эманаций [2].

Распределение радона и торона в земной коре определяется геохимическими закономерностями распределения урана в горных породах [3].

По подсчетам Кларка [3] 95 % верхнего шестнадцатикилометрового слоя литосферы сложено магматическими породами и только 5 % приходится на осадочные и метаморфические породы. Однако непосредственно в приповерхностных слоях Земной коры – сфере недропользования – доля осадочных пород резко увеличивается.

Наибольшая концентрация урана и радия в магматических горных породах наблюдается в кислых, далее по убывающей в средних и основных, а наименьшая – в ультраосновных породах [4].

Возникающие из магмы все типы изверженных пород являются исходным материалом для образования всевозможных пород осадочного и метаморфического комплекса, а также в значительной мере и для формирования почв [5]. Обычно они соответствуют радиоактивности горных пород, которые являются их материнскими источниками.

Содержание урана и радия в осадочных горных породах изменяется в широких пределах и связано с физико-химическими и геологическими условиями формирования самих пород.

Наиболее распространенными осадочными породами являются глины, пески, песчаники.

Глины разнообразны по радиоактивности.

Радиоактивность песков и песчаников связана с присутствием некоторых радиоактивных минералов, например, циркона (малакона, циртолита), эпидота, ураненита, монацита, браннерита, карнотита и др. При отсутствии радиоактивных минералов фоновые значения концентрации радона в песках очень низкие.

Метаморфические породы по содержанию урана занимают промежуточное положение между осадочными и магматическими породами [6]. Концентрация урана в этих породах зависит от первоначального содержания и влияния последующих процессов метаморфизма. Метаморфические изменения в зависимости от конкретных геологических особенностей могут приводить как к увеличению, так и к уменьшению содержания урана [6].

Различные условия миграции и эманирования радона обуславливают аномалии радона в горном массиве. Аномалии радона могут формироваться в связи с тем, что он может накапливаться в порах и трещинах тектонических нарушений, куда поступает по системам микротрещин. То есть радоновыделение определяется не только общей радиоактивностью горных пород, но также их коллекторскими свойствами (способностью аккумулировать радон). Проницаемость и коллекторские свойства тектонических разрывов зависят от степени геодинамической активности этих структур.

При тектонических подвижках пород возможность и интенсивность миграции увеличиваются, так как возникают ее новые пути, а также локальные увеличения давления, дающие импульсы, способствующие продвижению газов по порам и микротрещинам. Кроме того, подвижки препятствуют процессу седиментационного заполнения полостей трещин [7 – 10].

Таким образом, использование радонометрии в геодинамической диагностике основано на положительной корреляционной зависимости между интенсивностью эманирования радона из горных пород и степенью воздействия на них напряженно-деформационного поля, поскольку поле радоновых эманаций надразломных участков формируется в соответствии:

- с дифференциацией по степени проницаемости, характерной для подвижных участков разломной зоны и определяющей условия миграции флюидов;
- с распределением степени воздействия упругих волновых колебаний, вызванных современной геодинамической активностью, на горные породы;
- со свойствами радона.

Взаимосвязь геодинамических процессов с интенсивностью эманирования радона подтверждается мониторинговыми геодезическими измерениями с использованием традиционных методов и высокоточных GPS-технологий спутниковой геодезии [11 – 13]. Это позволяет использовать распределение значений объемной активности эманаций радона в почвенном воздухе, состоящих из Rn_{222} и Rn_{220} для геодинамического районирования горного массива [14].

Исходя из современных представлений о механизме формирования геодинамической составляющей поля эманаций радона в почвенном воздухе, свойствах радона и торона, сформулирована гипотеза: в соотношении значений объемной активности радона и торона в почвенном воздухе на участках деформаций растяжений увеличивается доля радона, а на участках деформаций сжатия увеличивается доля торона по сравнению с соседними, не охваченными деформациями участками.

Рассмотрим геодинамические особенности формирования состава почвенного радона над зоной деформаций растяжения и над зоной деформаций сжатия в горном массиве с одинаковыми прочими параметрами.

Над зоной растяжения в горном массиве в почвенном воздухе аккумулируется смесь радона и торона после миграции к поверхности по раскрытым трещинам после эманации из горных пород. В процессе миграции за счет значительно более быстрого распада по сравнению с Rn_{222} значительная доля Tn в этой смеси уменьшится.

В зоне сжатия трещины в массиве преимущественно сомкнуты. Соответственно, миграция газов из глубины ограничена. Над зоной сжатия в почвенном воздухе эманация радона формируется в основном за счет вибровоздействия на горные породы, возникающем при сжимающих деформациях. Поскольку в данном случае эманация формируется в большей степени вблизи поверхности, то доля нераспавшегося торона по сравнению с долей радона в ней больше по сравнению с соседними, не подверженными сжимающим деформациям участками.

Исходя из вышесказанного гипотетически появляется возможность использовать соотношение торона и радона в почвенном воздухе для выявления и оконтуривания зон сжатия и растяжения в массиве горных пород.

С целью практического подтверждения выдвинутой гипотезы и повышения информативности результатов радонометрии при выполнении геодинамической диагностики, Институтом горного дела УрО РАН в 2023 г. выполнены экспериментальные исследования на геодинамическом полигоне, расположенном в районе г. Краснотурьинск Свердловской области (горный массив промплощадки шахты Северопесчанская).

Характеристика горного массива полигона

Северо-Песчанское месторождение является обособленной группой рудных тел Песчанского железорудного месторождения.

Месторождение приурочено к западному контакту Песчанского диоритового массива, прорывающего осадочные и осадочно-вулканогенные толщи коблецкого яруса нижнего девона. В районе месторождения массив представлен диоритами, габбро-диоритами и габбро. Среди образований коблецкого яруса выделяются внизу мраморизованные известняки и мраморы фроловско-васильевской толщи мощностью свыше 800 м. Стратиграфически выше лежат переслаивающиеся туфопесчаники, туфосланцы и туфы андезитовых порфиритов с прослоями известняков башмаковской или «слоистой» толщи; сверху – роговообманково-плагиоклазовые порфириты и их туфы с резко подчиненным количеством туфопесчаников богословской толщи. С поверхности богословская толща слагает всю площадь Песчанского месторождения.

Вмещающие вулканогенно-осадочные породы и прилегающая часть массива пересекаются многочисленными дайками диабазовых, диоритовых и габбро-диабазовых порфиритов. В пределах Северо-Песчанского месторождения они имеют субмеридиональное простирание с западным падением под углом $40^\circ - 50^\circ$. В целом вмещающие породы залегают полого и срезаются крутым контактом интрузии.

Северо-Песчанский меридиональный разлом прослежен как в пределах одноименного участка, так и к северу и югу от него. Направление падения плоскости смесителя в пределах Северо-Песчанского месторождения восточное под углом $65^\circ - 70^\circ$ [15].

Методы исследований

Экспериментальные исследования по проверке выдвинутой гипотезы заключались в сравнении результатов радонометрии и геодезических мониторинговых исследований.

Экспериментальные исследования по использованию радонометрии для выявления зон растяжения и сжатия состояли из

1) раздельного определения Rn_{222} и Tn при выполнении эманационной съемки; построения карт деформаций растяжения и сжатия исследуемого горного массива по данным радонометрии;

2) сравнительного анализа результатов выявления зон растяжения и сжатия по данным радонометрии с результатами мониторинговых геодезических исследований.

Измерения объемной активности радона ($Bк/м^3$) в почвенном воздухе выполнялись радиометром альфа-активных газов РГА-500 по профильным линиям из шпуров глубиной 0,8 – 1,0 м. Всего было выполнено 45 измерений. Значительная часть исследуемой территории заасфальтирована, на ней расположены производственные здания и сооружения, что не позволило равномерно распределить сеть радонометрических наблюдений, что существенно ограничило исследования. Участок исследований расположен в пределах промплощадки ш. Северопесчанская. На участке оборудована профильная наблюдательная геодезическая линия № 12.

Раздельное определение Rn_{222} и Tn (Rn_{220}) в отбираемых пробах почвенного воздуха выполнялось по следующей методике.

В процессе выполнения эманационной съемки, после измерения объемной активности смеси ($Rn_{222} + Tn$) ($Bк/м^3$), 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} [6].

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

$$A_{\text{раст}} = \frac{Q_{Rn222}}{Q_{Tn}},$$

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

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

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

$$A_{\text{сжат}} = \frac{Q_{Tn}}{Q_{Rn222}}.$$

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

Числовые параметры горизонтальных деформаций (растяжения, сжатия) земной поверхности определяются на основании инструментальных геодезических измерений расстояний между реперами профильной линии. Измерения выполняются с помощью электронного тахеометра, среднеквадратическая погрешность измерения углов которого не превышает $\pm 2''$. Измерение расстояний между реперами профильных линий тахеометром проводится в прямом и обратном направлениях. Расхождение дважды измеренной длины интервала не должно превышать ± 3 мм. Горизонтальные деформации интервала между реперами ε за период между двумя наблюдениями определяются по формуле:

$$\varepsilon = \frac{d_n - d_{n-1}}{d},$$

где d , d_n , d_{n-1} – горизонтальные проложения интервалов, соответственно, из начального, предыдущего и последующего наблюдений.

Положительные значения деформаций соответствуют увеличению интервала – растяжению, отрицательные значения – сжатию. По результатам измерений строятся графики, на которых горизонтальные деформации относят к середине интервала.

Результаты исследований

В результате выполненных исследований построены:

- карта деформаций растяжения исследуемого участка (рис. 1);
- карта деформаций сжатия исследуемого участка (рис. 2);
- график горизонтальных деформаций реперных интервалов вдоль профильной линии на основании данных геодезических измерений за период 8 месяцев (рис. 3).

Выполнен сравнительный анализ результатов выявления характерных участков горизонтальных деформаций по соотношениям $A_{\text{раст}}$ и $A_{\text{сжат}}$ (см. рис. 1, 2), и данных геодезического мониторинга (см. рис. 3).

По соотношению $A_{\text{раст}}$ выявлена зона растяжений между реперами $Rp7$ и $Rp8$, а по соотношению $A_{\text{сжат}}$ – зона сжатий в окрестностях репера $Rp13$. По данным геодезических измерений за период 8 месяцев на реперном интервале $Rp7$ - $Rp8$ наблюдается повышенное значение растягивающих горизонтальных деформаций на уровне $0,1 \times 10^{-3}$, а на интервале $Rp12$ - $Rp13$ зафиксированы максимальные сжимающие деформации – минус $0,4 \times 10^{-3}$ (рис. 4).

Участок реперной линии 12 в интервале $Rp10$ - $Rp12$ заасфальтирован. Радонометрические измерения здесь выполнить невозможно. Поэтому результаты геодезического мониторинга на указанном интервале не представлены.

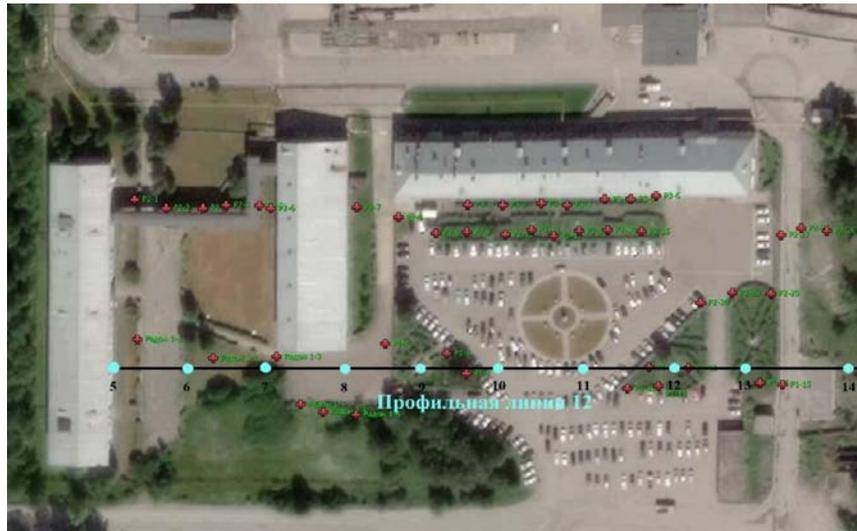


Рис. 1. Схема радонометрических и геодезических исследований. Горный массив участка промплощадки ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области, 2023 г.

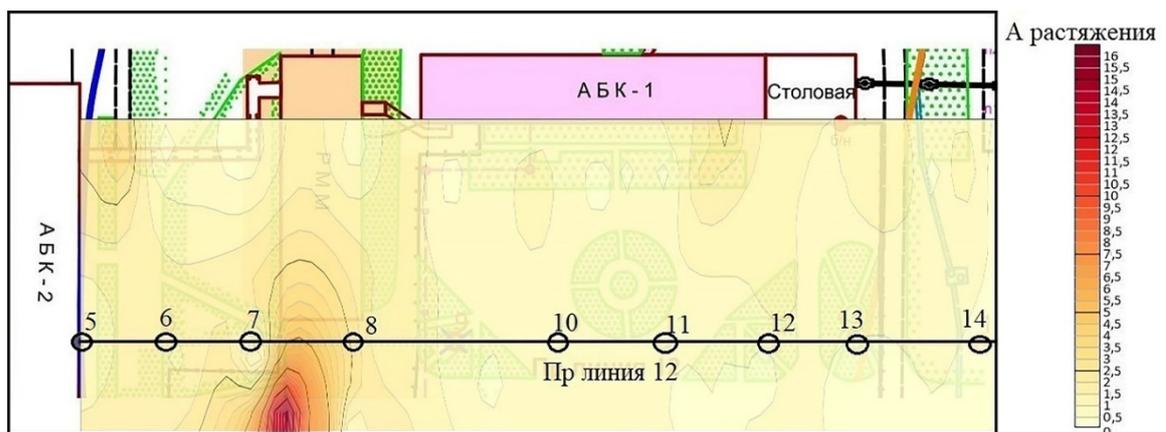


Рис. 2. Карта растягивающих деформаций по соотношению $A_{\text{раст}}$. Горный массив участка промплощадки ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области, 2023 г.

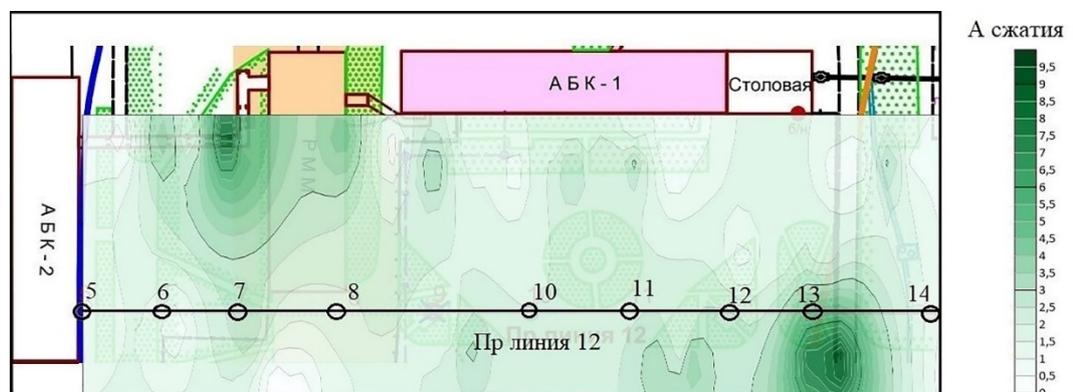


Рис. 3. Карта сжимающих деформаций по соотношению $A_{\text{сжат}}$. Горный массив участка промплощадки ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области, 2023 г.



Рис. 4. График горизонтальных деформаций по профильной геодезической линии 12 за период 8 месяцев. Участок промплощадки ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области, 2023 г.

Кроме того, была построена карта геодинамического районирования по нормированным значениям объемной активности радона в почвенном воздухе [14] исследуемого горного массива (рис. 5).

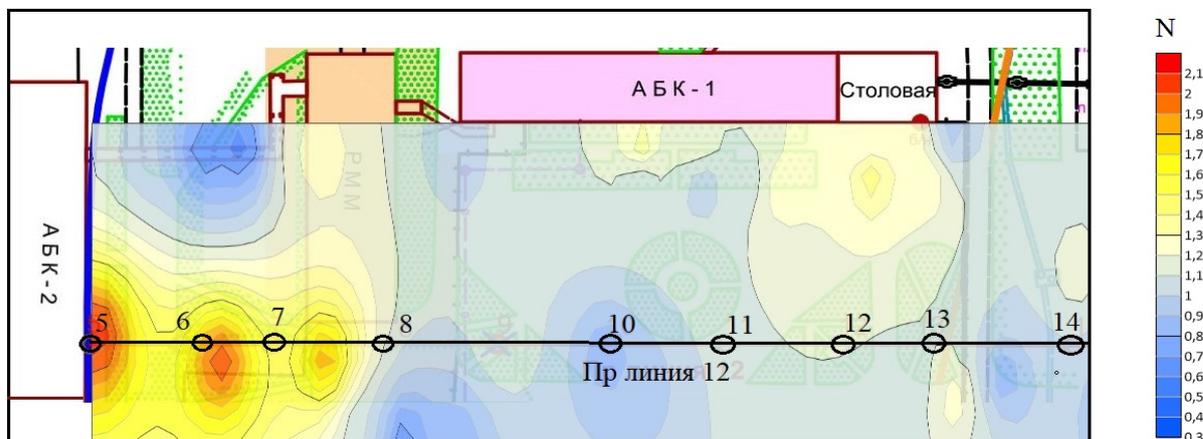


Рис. 5. Карта геодинамического районирования по нормированным значениям объемной активности радона в почвенном воздухе. Горный массив участка промплощадки ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области, 2023 г.

Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований возможности использования соотношения объемной активности (Q , Бк/м³) радона и торона в почвенном воздухе для выявления зон растяжения и сжатия в массиве горных пород и результатов геодинамического районирования по данным радонометрии (см. рис. 2, 3, 5) подтвердил их соответствие.

Заключение

1. Геодезические наблюдения подтвердили достоверность результатов выявления зон деформаций растяжения и деформаций сжатия в горном массиве с использованием радонометрии.

2. Использование соотношения Q_{Rn222} и Q_{Tn} в почвенном воздухе позволяет оперативно, без периодических измерений выявлять и оконтуривать зоны деформаций растяжения и сжатия в массиве горных пород.

3. Распределение соотношений Q_{Rn222} и Q_{Tn} соответствует результатам геодинамического районирования, отражающим напряженно-деформационное состояние изучаемого массива на момент измерений.

Новые возможности использования радонометрии позволят оперативно, без мониторинговых исследований выявлять участки деформаций растяжения и сжатия в комплексе геодинамической диагностики горного массива для обеспечения безопасности объектов недропользования и в гидрогеологии для определения места заложения гидрогеологических скважин.

Список литературы

1. Баранов В.И., 1955. *Радиометрия*. Москва: Изд-во АН СССР, 327 с.
2. Бондаренко В.М. и др., 1983. *Новые методы инженерной геофизики*. Москва: Недра, 224 с.
3. Сердюкова А.С., Капитонов Ю.Т., 1969. *Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе*. Москва: Атомиздат, 312 с.
4. Войткевич Г.В., 1961. *Проблемы радиогеологии*. Москва: Госгеолтехиздат, 272 с.
5. Граммаков А.Г., Никонов А.И., Тафеев Г.П., 1957. *Физические и геологические основы методов разведочной радиометрии*. Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 308 с.
6. Новиков Г.Ф., Капков Ю.Н., 1965. *Радиоактивные методы разведки*. Ленинград: Недра, 759 с.
7. Тагильцев С.Н., 2003. *Основы гидрогеомеханики скальных массивов*. Екатеринбург: УГГГА, 88 с.
8. Бондаренко В. М. и др., 1983. *Новые методы инженерной геофизики*. Москва: Недра, 224 с.
9. Ульянов В.Ю. 2015. Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС в асейсмичных регионах. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 103 - 107.
10. Ялпуга Е.А., Базеева Р.П., Донченко Э.В. и др., 2020. Методы мониторинга радоновыделения для изучения геодинамически активных зон горного массива. *Журнал теоретической и прикладной механики*, №3 (72), С. 57 – 64.
11. Адушкин В.В. и др., 2005. Резонансные особенности эсхалации природного радона. *ДАН*, Т. 400, № 3.
12. 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. науч. тр. девярых геофизических чтений им. В.В. Федынского*. Тверь: ООО Изд-во «ГЕРС», С. 317 – 320.
13. Грацинский В.Г., Горбушина Л.В., Тыминский В.Г., 1967. О выделении радиоактивных газов из образцов горных пород под действием ультразвука. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, № 10, С. 91 – 94.
14. Далатказин Т.Ш., 2023. Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 64 – 69. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.01.064>

15. Геология СССР. Т. XII. Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Ч. I. Полезные ископаемые. Министерство геологии СССР, Урал. территориальное геологическое управление; гл. ред. А.В. Сидоренко; ред. тома: К.К. Золоев [и др.]. Москва: Недра, 1973, 632 с.

References

1. Baranov V.I., 1955. Radiometriya [Radiometry]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 327 p.
2. Bondarenko V.M. i dr., 1983. Novye metody inzhenernoi geofiziki [New methods of engineering geophysics]. Moscow: Nedra, 224 p.
3. Serdyukova A.S., Kapitonov Yu.T., 1969. Izotopy radona i korotkozhivushchie produkty ikh raspada v prirode [Isotopes of radon and shortlived radioactive products of their decay in nature]. Moscow: Atomizdat, 312 p.
4. Voitkevich G.V., 1961. Problemy radiogeologii [Problems of radiogeology]. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 272 p.
5. Grammakov A.G., Nikonov A.I., Tafeev G.P., 1957. Fizicheskie i geologicheskie osnovy metodov razvedochnoi radiometrii [Physical and geological foundations of exploration radiometry methods]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo literatury po geologii i okhrane neдр, 308 p.
6. Novikov G.F., Kapkov Yu.N., 1965. Radioaktivnye metody razvedki [Radioactive exploration method]. Leningrad: Nedra, 759 p.
7. Tagil'tsev S.N., 2003. Osnovy gidrogeomekhaniki skal'nykh massivov [Fundamentals of hydrogeomechanics of rock masses]. Ekaterinburg: UGGGA, 88 p.
8. Bondarenko V. M. i dr., 1983. Novye metody inzhenernoi geofiziki [New methods of engineering geophysics]. Moscow: Nedra, 224 p.
9. Ul'yanov V.Yu. 2015. Organizatsiya i metodika provedeniya monitoringa radona na ploshchadkakh AES v aseismichnykh regionakh [Organization and methodology of monitoring radon emissions at NPP sites in anti-seismic regions]. Problemy nedropol'zovaniya, № 1, S. 103 – 107.
10. Yalputa E.A., Bazeeva R.P., Donchenko E.V. i dr., 2020. Metody monitoringa radonovydeleniya dlya izucheniya geodinamicheski aktivnykh zon gornogo massiva [Methods of monitoring radon emission for studying geodynamically active zones of the mountain range]. Zhurnal teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki, №3 (72), P. 57 – 64.
11. Adushkin V.V. i dr., 2005. Rezonansnye osobennosti eskhalyatsii prirodnogo radona [Resonant features of natural radon exhalation]. DAN, V. 400, № 3.
12. 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. Sb. nauch. tr. devyatykh geofizicheskikh chtenii im. V.V. Fedynskogo. Tver': OOO Izd-vo "GERS", P. 317 – 320.
13. Gratsinskii V.G., Gorbushina L.V., Tyminskii V.G., 1967. O vydelenii radioaktivnykh gazov iz obraztsov gornykh porod pod deistviem ul'trazvuka [On the effusion of radioactive gases from rock samples under the influence of ultrasound]. Izv. AN SSSR. Fizika Zemli, № 10, P. 91 – 94.
14. Dalatkazin T.Sh., 2023. Metodicheskie voprosy geodinamicheskogo raionirovaniya massiva gornykh porod s ispol'zovaniem radonometrii [Methodological issues of geodynamic zoning of rock massifs using radonometry]. Problemy nedropol'zovaniya, № 1, P. 64 – 69. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.01.064>
15. Geologiya SSSR. T. XII. Permskaya, Sverdlovskaya, Chelyabinskaya i Kurganskaya oblasti. Ch. I. Poleznye iskopaemye [Geology of the USSR. Vol. XII. Perm, Sverdlovsk, Chelyabinsk and Kurgan regions. Part I. Minerals]. Ministerstvo geologii SSSR, Ural. territorial'noe geologicheskoe upravlenie; gl. red. A.V. Sidorenko; red. тома: К.К. Золоев [и др.]. Москва: Недра, 1973, 632 p.