

П. И. Зувев¹✉

Исследование современной геодинамики методом радонометрии

¹Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация
e-mail: zuev@igduran.ru

Аннотация. В статье представлены результаты комплексных геофизических исследований, направленных на оценку эффективности радонометрии для мониторинга современной геодинамической активности и идентификации структурно-геодинамических зон в пределах территорий, подверженных горным работам. Полевые работы выполнены на участке Берёзовского золоторудного месторождения, расположенном над ликвидированной подземной выработкой, контуры которой были предварительно установлены методами электротомографии и сейсморазведки. Анализ эманиционных данных позволил выявить устойчивые корреляции между радонометрическими параметрами растяжения и сжатия горного массива и уровнем его геодинамической напряжённости. На основе полученных зависимостей разработана методика пространственного выявления и классификации деформационных зон, что расширяет возможности прогноза геодинамических рисков на подработанных территориях.

Ключевые слова: радон, торон, сжатие, растяжение, геодинамика

P. I. Zuev¹✉

Study of present-day geodynamics using radonometry

¹Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russian Federation
e-mail: zuev@igduran.ru

Abstract. This paper presents the results of comprehensive geophysical studies aimed at evaluating the effectiveness of radonometry for monitoring present-day geodynamic activity and identifying structural-geodynamic zones within areas affected by mining operations. Fieldwork was conducted at a test site within the Berezovskoye gold deposit, located directly above a backfilled underground mine working, whose boundaries were previously delineated using electrical resistivity tomography and seismic survey methods. Analysis of emanation data revealed consistent correlations between radonometric parameters indicating tension and compression in the rock mass and the level of its geodynamic stress. Based on these established relationships, a methodology for spatial detection and classification of deformation zones has been developed, enhancing the capability to predict geodynamic hazards in mined areas.

Keywords: radon, thoron, compression, tension, geodynamics

Введение

Комплексное инженерно-геофизическое обследование подработанных массивов горных пород является необходимым условием обеспечения промышленной безопасности и устойчивости ответственных объектов недропользования.

Объектом исследований выступил участок в пределах Берёзовского золоторудного месторождения, здесь велась активная подземная разработка с XVIII до

начала XX века, характеризовалась отработкой на глубинах до 50 м. Было заложено свыше тысячи мелких шахтных стволов, так же осуществлялась нелегальная добыча, место таких выработок не зафиксировано [1,2,3].

Для локализации потенциально опасных зон сначала применялась электро-томография. На одном из профилей на глубине около 10 м была зафиксирована чёткая геоэлектрическая аномалия, интерпретированная как зона разуплотнения массива, связанная с погашенной горизонтальной выработки. Для верификации полученных данных были проведены сейсморазведочные работы. Анализ разреза коэффициента Пуассона подтвердил наличие локального участка с пониженными упругими характеристиками грунтов на глубине ~ 10 м, что пространственно коррелирует с результатами электротомографии.

Несмотря на успешную локализацию неоднородностей, для оценки геодинамических процессов были проведены радонометрические исследования, в том числе для выявления и пространственного оконтуривания деформационных зон в плане, что и составляет предмет настоящего исследования. Материал статьи представляет собой продолжение предыдущих геофизических исследований лаборатории.

Методы и материалы

Измерения объёмной активности радона (ОАР, Бк/м³) в почвенном воздухе выполнялись радиометром альфа-активных газов РГА-500 по профильным линиям. Отбор проб осуществлялся из шпуров глубиной 0,8 м.

Для выделения геодинамической составляющей в формировании радонового поля проводилось нормирование измеренных значений ОАР. С этой целью данные группировались по однородным геохимическим и гидрогеологическим условиям [4,5,6,7]. Рассчитываются нормированные значения ОАР для каждой точки измерения:

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

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

Составляется карта распределения нормированных значений объёмной активности радона в почвенном воздухе, далее осуществляется геодинамическое районирование. Определялось суммарное и раздельное содержание объёмной активности почвенного радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Tn): $Q^{222}\text{Rn} + Q^{220}\text{Rn}$, $Q^{222}\text{Rn}$ и $Q^{220}\text{Rn}$ [8,9].

Для картирования деформационных зон растяжения (A_p) и сжатия (A_c) применялись расчётные соотношения:

$$A_p = Q^{222}\text{Rn} / Q^{220}\text{Rn} \quad (2)$$

$$A_c = Q^{220}Rn / Q^{222}Rn \quad (3)$$

где $Q^{222}Rn$ – объёмная активность ^{222}Rn , Бк/м³; $Q^{220}Rn$ – объёмная активность ^{220}Rn , Бк/м³.

После отбора проба почвенного воздуха выдерживалась в измерительной камере в течение 300с для полного распада короткоживущего ^{220}Rn (период полураспада ~55с). Повторное измерение позволяло определить объёмную активность ^{222}Rn . Исследования проводились на участке размером 20×35 м, над аномалией разуплотнения, выявленной ранее методами электротомографии. Съёмка выполнялась по регулярной сети 5×5 м, в 40 точках.

Результаты

Согласно карте геодинамического районирования, аномалии нормированных значений ОАР в почвенном воздухе пространственно приурочены к местам расположения погашенных вертикальных горных выработок, что подтверждает эффективность предложенного подхода для локализации скрытых деформационных зон [10,11] (рис.1,2,3).

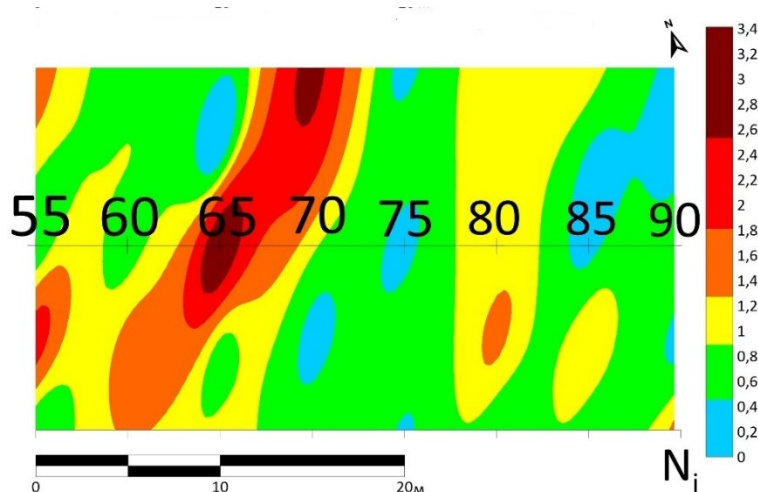


Рис. 1. Карта относительной современной геодинамической активности N_i .

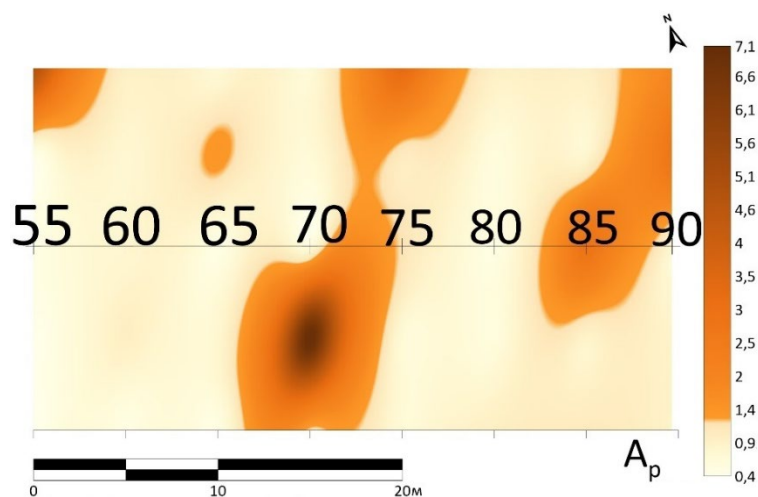


Рис. 2. Карта распределения показателя деформаций растяжения A_p .

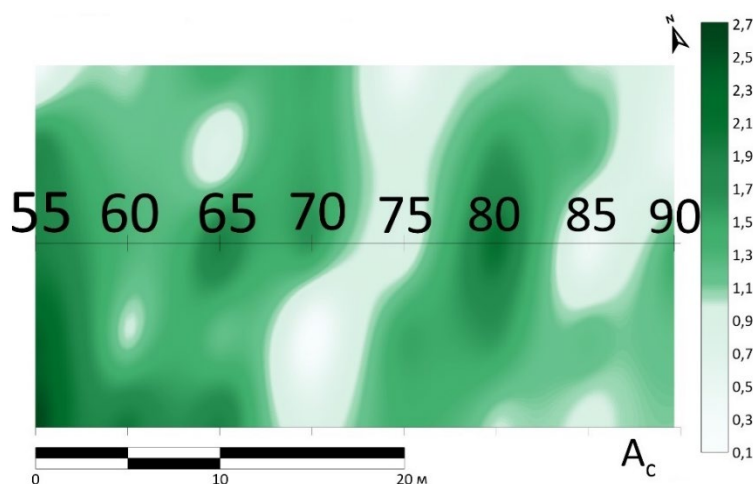


Рис. 3. Карта распределения показателя деформаций сжатия A_c .

Обсуждение

Интерпретация полученных данных проведена с учётом современных представлений о механизмах формирования почвенного радона (^{222}Rn) [12,13,14,15,16]:

1. Аномальные значения показателя A_p приурочены к зонам, где нарушен естественный канал поступления ^{222}Rn . Разуплотнение пород, вызванное неглубоким техногенным объектом, формирует приповерхностный слой с повышенной пористостью. В таких условиях миграция ^{222}Rn к поверхности осуществляется преимущественно диффузионным, конвективным и эффузионным путями, что приводит к снижению его концентрации. При этом сохраняется исходное соотношение $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$, что указывает на неизменность генетических процессов изотопного образования. Следовательно, отклонения показателя A_p могут служить надёжным индикатором зон разуплотнения [17,18].

2. К западу и востоку от выявленной зоны разуплотнения прослеживаются субмеридиональные участки с повышенными значениями показателя A_c . Увеличение концентрации почвенного радона здесь обусловлено вибрационным воздейст-

вием, сопровождающим процессы сжатия и деформирования горного массива, что повышает газопроницаемость пород и способствует локальной аккумуляции радона.

3. В северо-западной части исследуемой территории зафиксирована аномалия A_p , пространственно сопряжённая с зоной активного дизъюнктивного нарушения. Преобладание растягивающих деформаций в данной зоне создаёт условия для интенсивной миграции газообразных флюидов, что и отражается в изменении показателя A_p [19,20].

Заключение

На основе современных теоретических представлений о формировании почвенного радонового поля экспериментально подтверждена устойчивая корреляция между радонометрическими показателями и характером геодинамических напряжений в горном массиве. Установленные закономерности позволили надёжно идентифицировать и классифицировать типы деформационных структур по характеру радоновых аномалий на: – малоглубинные зоны разуплотнения; – активные дизъюнктивные нарушения; – участки деформаций сжатия.

Практическая апробация радонометрии на локальном участке подработанной территории подтвердила её высокую информативность для оперативной оценки современной геодинамической активности. Полученные результаты свидетельствуют о значительном потенциале метода для решения прикладных задач инженерной геологии, мониторинга устойчивости горных массивов и прогнозирования деформационных процессов в зонах техногенного воздействия.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00408-26-00. № гос. рег. 123012300007-7. Тема 3 (2025-2027). Выявление закономерностей развития геодинамических процессов в условиях техногенного преобразования недр и разработка мер по повышению безопасности горного производства (FUWE-2025-0003).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zuev P., Vedernikov A., Grigoriev D. Using the method of electrical imaging for obtaining the modulus of elasticity in open cast mining // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 192. Art. 01030. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201030.
2. Electric resistivity and seismic refraction tomography: a challenging joint underwater survey at Äspö Hard Rock Laboratory / M. Ronczka, K. Hellman, T. Günther, R. Wisén, T. Dahlin, // Solid Earth. 2017. V. 8. 671 – 682. doi.org/10.5194/se-8—671—2017.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000: объясн. записка к листу О-41-XXV / Р. Д. Калугина, В. Ф. Копанев, Е. В. Стороженко [и др.]; Роснедра, ОАО «Уральская ГСЭ». 2-е изд. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2017. 156 с.
4. Уткин В.И. Юрков А.К. Радон как индикатор геодинамических процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 2. С. 277 – 286.
5. Далатказин Т.Ш. Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии // Проблемы недропользования. 2023. № 1. С. 64 – 69.

6. Методы мониторинга радоновыделения для изучения геодинамически активных зон горного массива / Е.А. Ялпуга, Р.П. Базеева, Э.В. Донченко, О.Л. Шалованов, С.Г. Салий, Д.С. Бородин // Журнал теоретической и прикладной механики. 2020. № 3 (72). С. 57 – 64
7. Уткин В. И., Юрков А. К., Козлова И. А. 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: ГЕРС, 2008. С. 317–320.
8. Bossew P. The radon emanation power of building materials, soils and rocks. Appl. Radiat. Isot. 2003. V. 59. 389 – 392.
9. Ульянов В.Ю. Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС в асейсмичных регионах // Проблемы гедропользования. 2015. № 1. С. 103 – 107.
10. Далатказин Т. Ш., Зуев П. И. Способ выявления, определения характера и причин образования деформаций в массиве горных пород: пат. 2849486 Рос. Федерация, МПК G01V 9/00; заявл. 14.02.2025; опубл. 27.10.2025.
11. Далатказин Т. Ш., Зуев П. И. Способ геодинамического районирования горного массива с использованием радонометрии: пат. 2793085 Рос. Федерация, МПК G01V 9/00; заявл. 25.05.2022; опубл. 28.03.2023.
12. Сердюкова А. С., Капитонов Ю.Т. Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе. М.: Атомиздат, 1969. 312 с.
13. Исследования по модернизации использования эманационной съемки в качестве экспресс-метода при геодинамической диагностике / Т.Ш. Далатказин, Ю.П. Коновалова, В.И. Ручкин, П.И. Зуев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. Вып. 4. С.206 – 220
14. A universal laboratory method for determining physical parameters of radon migration in dry granulated porous media / Y.J. Ye, Y.F. Zhang, X.T. Dai, D.X. Ding // J. Environ. Radioact. 2017. V. 177. 135 – 141.
15. Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С. Радоновая и тектоническая активность разломов земной коры (на примере Центральной Монголии) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 2. С. 243 – 255
16. Спивак А.А. Объемная активность почвенного радона в зонах тектонических нарушений. Геофизика межгеосферных взаимодействий. М.: ГЕОС, 2008. С. 235 – 247.
17. Уткин В. И., Юрков А. К., Козлова И. А. 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», 2008. С. 317 – 320.
18. Behaviour of radon in the geological environment: a review / Т.К. Ball, D.G. Cameron, Т.В. Colman, P.D. Roberts // Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 1991. V. 24. P. 169 – 182.
19. Резонансные особенности эсхалиции природного радона / В. В. Адушкин [и др.] // ДАН. 2005. Т. 400. № 3. С. 369 – 371.
20. Селюков Е.И., Стигнеева Л.Т. Краткие очерки практической микрогеодинамики. СПб.: Питер, 2010. 176 с.

© П. И. Зуев, 2026