

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

Зуев Павел Игоревич

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ДЕФОРМАЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПО ДАННЫМ ГЕОДЕЗИИ И РАДОНОМЕТРИИ*

Аннотация:

Представлены результаты аналитических исследований по определению эмпирической зависимости между деформационными показателями растяжения и сжатия по данным радонометрии и значениями горизонтальных деформаций по данным геодезического мониторинга для массива горных пород участка промплощадки шахты Северопесчанская. В исследованиях использовались результаты радонометрических и геодезических исследований 2023 г., выполненных для определения возможности использования соотношения содержания долей объемной активности в почвенном воздухе радона-222 и торона для выявления участков деформаций растяжения и участков деформаций сжатия в пределах промплощадки ш. Северопесчанская. Результаты геодезического мониторинга за восьмимесячный период наблюдений использовались как параметрические. Результаты геодезического мониторинга подтвердили достоверность выявления зон деформаций разуплотнения и деформаций сжатия в горном массиве с использованием радонометрии. В результате выполненных аналитических исследований установлены зависимости между значениями деформаций, определенных с использованием геодезии и деформационными показателями, определенными с использованием радонометрии, что позволило определить количественные значения горизонтальных деформаций в радонометрических точках измерения. С использованием метода аппроксимации построена карта распределения горизонтальных деформаций в пределах промплощадки. Опробованная методика, уступаая в точности геодезическим исследованиям, позволяет получить общую картину распределения деформаций не только вдоль профильной геодезической линии, но и по площади исследуемого горного массива с минимальными материальными затратами.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, горный массив, радон, торон, геодезический мониторинг.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.03.077

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

RESULTS OF RESEARCH ON DETERMIN- ING THE DEPENDENCE BETWEEN DEFORMATION PARAMETERS BASED ON GEODESY AND RADONOMETRY DATA

Abstract:

The article presents the results of analytical studies aimed at determining the empirical relationship between the deformation indicators of tension and compression based on radonometry data and the values of horizontal deformations based on geodetic monitoring data for the rock mass of the Severopeschanskaya mine site. The study used the results of radonometry and geodetic surveys conducted in 2023 to determine the possibility of using the ratio of the volume activity of radon-222 and thoron in the soil air to identify areas of tension and compression deformations within the Severopeschanskaya mine site. The results of geodetic monitoring over an eight-month observation period were used as parametric. The results of geodetic monitoring confirmed the reliability of identifying zones of decompaction and compression deformations in the rock mass using radonometry. As a result of the performed analytical studies, the dependencies between the values of deformations determined using geodesy and the deformation indicators determined using radonometry were established. The obtained dependencies allowed for the determination of quantitative values of horizontal deformations at radonometric measurement points. Using the approximation method, a map of the distribution of horizontal deformations within the industrial site was constructed. Although this method is less accurate than geodetic surveys, it provides a general picture of the distribution of deformations not only along the profile geodetic line but also across the area of the studied rock mass with minimal material costs.

Key words: stress-strain state, rock mass, radon, thoron, geodetic monitoring, empirical relationship

* Работа выполнена в рамках Гос. задания №075-00410-25-00. Г.р. № 1022040300093-0-1.5.1.

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).

Введение

Учет напряженно-деформированного состояния массива горных пород имеет определяющее значение для обеспечения безопасности проектируемых, строящихся и эксплуатируемых объектов недропользования. В настоящее время количественные параметры поля напряжений определяются с использованием геодезического мониторинга, для чего создаются наблюдательные станции, состоящие из геодезических профильных линий, оборудованных реперами [1]. Вследствие высокой стоимости и трудоемкости оборудования профильных линий детальность и информативность результатов исследований остается невысокой. Решение данной проблемы видится в развитии новых методик геофизических исследований и их внедрении в повседневную практику геодинамической диагностики [2].

С целью повышения информативности диагностики напряженно-деформированного состояния горного массива выполнены аналитические исследования по установлению эмпирической зависимости между значениями горизонтальных деформаций, определенных по результатам геодезического мониторинга и деформационными показателями разуплотнения ($A_{\text{разупл.}}$) и сжатия ($A_{\text{сжат.}}$) по данным радонометрии, определенных на прилегающем к профильной линии участке промплощадки ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области. Были использованы материалы исследований Института горного дела УрО РАН 2023 г. для проверки следующей гипотезы: в соотношении значений объемной активности радона и торона в почвенном воздухе на участках деформаций разуплотнения увеличивается доля радона, а на участках деформаций сжатия увеличивается доля торона по сравнению с соседними, не охваченными деформациями участками горного массива. Для выявления участков деформаций разуплотнения и деформаций сжатия были предложены показатели:

$$A_{\text{разупл.}} = Q_{\text{Rn}} / Q_{\text{Tn}}, \quad (1)$$

и

$$A_{\text{разупл.}} = Q_{\text{Tn}} / Q_{\text{Rn}}, \quad (2)$$

где Q_{Rn} – объемная активность радона-222 в пробе почвенного воздуха ($\text{Бк}/\text{м}^3$);

Q_{Tn} – объемная активность торона в пробе почвенного воздуха ($\text{Бк}/\text{м}^3$).

Результаты геодезического мониторинга подтвердили достоверность выявления зон деформаций разуплотнения и деформаций сжатия в горном массиве с использованием радонометрии [3, 4].

Характеристика массива горных пород Северопесчанского 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 $40 - 50^\circ$. 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 $65 - 70^\circ$ [5].

Методика исследований и результаты исследований

Выполнение аналитических исследований по определению зависимости между показателями деформаций по данным радонометрии ($A_{\text{разупл.}}$ и $A_{\text{сжат.}}$) и значениями горизонтальных деформаций, полученных по результатам геодезических измерений для породного массива промплощадки шахты Северопесчанская, происходило в следующей последовательности.

1. Уточнение графика распределения горизонтальных деформаций по профильной линии 12. Числовые параметры горизонтальных деформаций (растяжения, сжатия) земной поверхности определяются на основании периодических инструментальных геодезических измерений расстояний между реперами профильной линии. Положительные значения деформаций соответствуют увеличению интервала – растяжению, отрицательные значения – сжатию. По результатам измерений строится график, на котором максимальные значения горизонтальных деформаций *условно* относят к середине интервала [6 – 7]. Шаг радонометрических измерений при выполнении исследований составлял 10 м, положение значений показателей $A_{\text{разупл.}}$ (1) и $A_{\text{сжат.}}$ (2) на карте определено с использованием интерполяции. При этом расстояния между реперами составляют $23 \div 30$ м и положение пиковых значений на графике распределения деформаций по данным геодезии условно определено на середине интервала между реперами. Следовательно, положение пиковых значений логично определять исходя из данных радонометрии.

Для уточнения местоположения этих пиковых значений на профильной линии использована информация о распределении значений $A_{\text{разупл.}}$ и $A_{\text{сжат.}}$ по участку расположения профильной линии 12. Непосредственно на геодезическом профиле 12 радонометрические измерения выполнить не удалось из-за асфальтового покрытия. Для определения зависимости между показателями $A_{\text{разупл.}}$ и $A_{\text{сжат.}}$ использованы результаты ближайшей радонометрической профильной линии [9].

В результате построен уточненный график деформаций по профильной линии 12 (рис. 1), где пиковые значения деформаций от середины интервала смещаются в место пикового значения деформационного показателя по радонометрии в данном интервале.

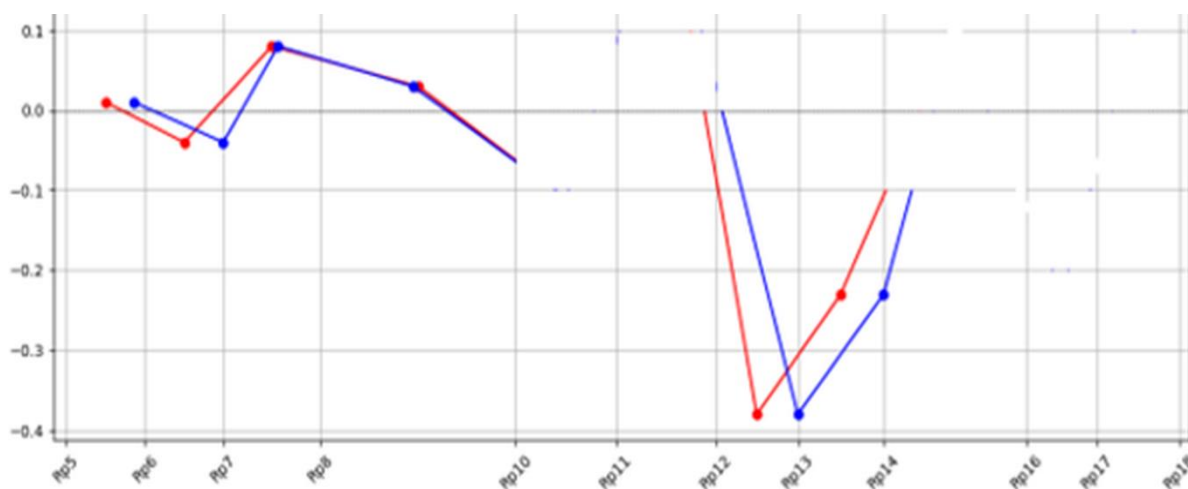


Рис. 1. Графики горизонтальных деформаций по геодезическому профилю 12: красным цветом – распределение деформаций по результатам геодезического мониторинга; синим – распределение деформаций по профильной линии 12 с учетом радонометрии

2. Определение значений деформаций и соответствующие им показатели $A_{\text{разупл.}}$ и $A_{\text{сжат.}}$ с использованием графика распределения значений деформаций по профилю и матрицы распределения значений показателей деформаций по данным радонометрии.

С использованием метода построения Делоне в программном обеспечении Surfer формируются матрицы значений $A_{\text{разупл.}}$ и $A_{\text{сжат.}}$ [10, 11]. В ходе применения метода Делоне между значениями матрицы происходит интерполяция.

Используя матрицу распределения значений показателей $A_{\text{разупл.}}$ и $A_{\text{сжат.}}$ по данным радонометрии при их пересечении профильной линии 12 выполнена выборка значений деформаций по данным геодезии (ϵ) и соответствующих им значений $A_{\text{разупл.}}$ и $A_{\text{сжат.}}$.

Зная значение переменных $A_{\text{разупл.}}$ и $A_{\text{сжат.}}$ в каждой точке матрицы, определяем соответствующие им значения горизонтальных деформаций по уточненному по данным радонометрии графику.

3. Выполняем построение графиков зависимости между горизонтальными деформациями растяжения по данным геодезии и показателями деформаций разуплотнения и сжатия по данным радонометрии (рис. 2, 3).

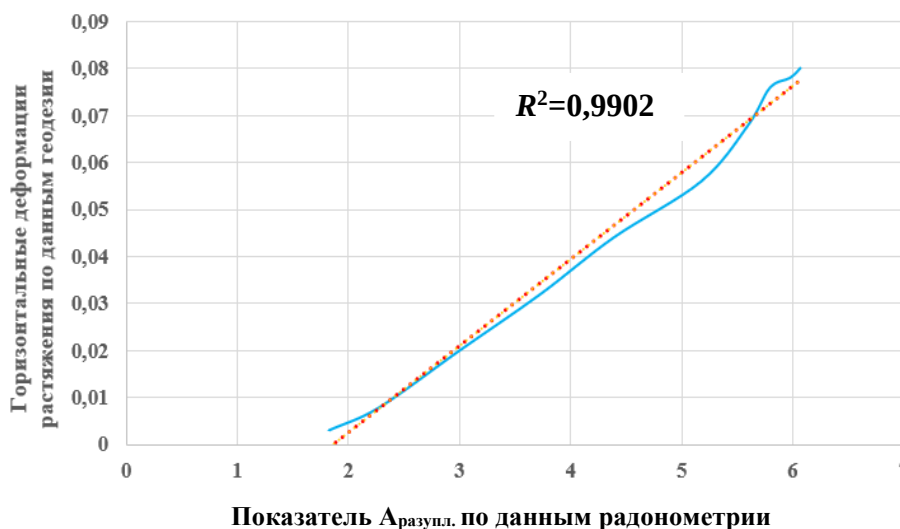


Рис. 2. График зависимости между горизонтальными деформациями растяжения по данным геодезии и показателями деформаций разуплотнения по данным радонометрии. Горный массив ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области, 2023 г.

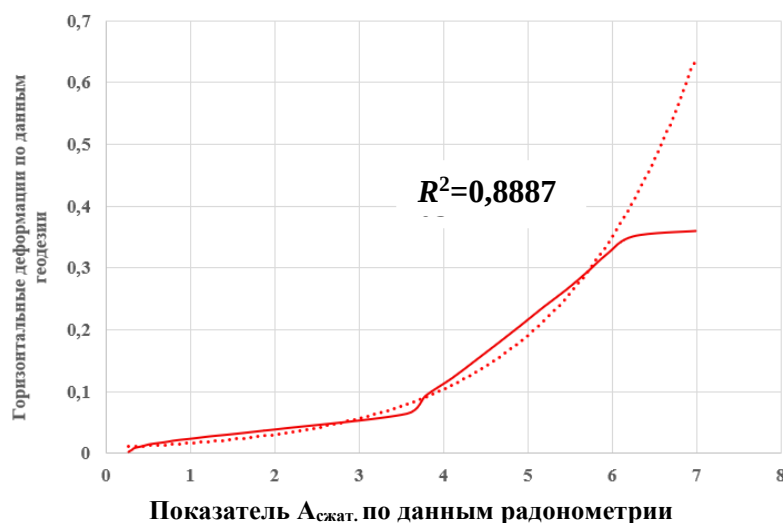


Рис. 3. График зависимости между горизонтальными деформациями сжатия по данным геодезии и показателями деформаций сжатия по данным радонометрии. Горный массив ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области

4. Используя функционал программы Microsoft Excel, определены:
– эмпирическая зависимость между показателем деформаций разуплотнения по данным радонометрии ($A_{\text{разупл.}}$) и по результатам геодезии:

$$\varepsilon_{\text{разупл.}} = 0,0184A_{\text{разупл.}} - 0,0343, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{разупл.}}$ – величина деформаций разуплотнения;

$A_{\text{разупл.}}$ – показатель деформаций разуплотнения по отношению объемной активности Rn (Бк/м³) к объемной активности Tn (Бк/м³) в почвенном воздухе точки измерения;

– эмпирическая зависимость между показателем деформаций сжатия по данным радонометрии ($A_{\text{разупл.}}$) и по результатам геодезии;

$$\varepsilon_{\text{сжат.}} = 0,0091e^{0,6085A_{\text{сжат.}}}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{\text{сжат.}}$ – величина деформаций сжатия,

$A_{\text{сжат.}}$ – показатель деформаций сжатия по отношению объемной активности Tn (Бк/м³) к объемной активности Rn (Бк/м³) в почвенном воздухе точки измерения.

5. Используя полученные зависимости (3) – (4), для каждой точки измерения определены численные значения горизонтальных деформаций.

6. На основе полученных значений деформаций построена карта горизонтальных деформаций по результатам комплекса геодезических и радонометрических исследований промплощадки ш. Северопесчанская (рис. 4) [12].

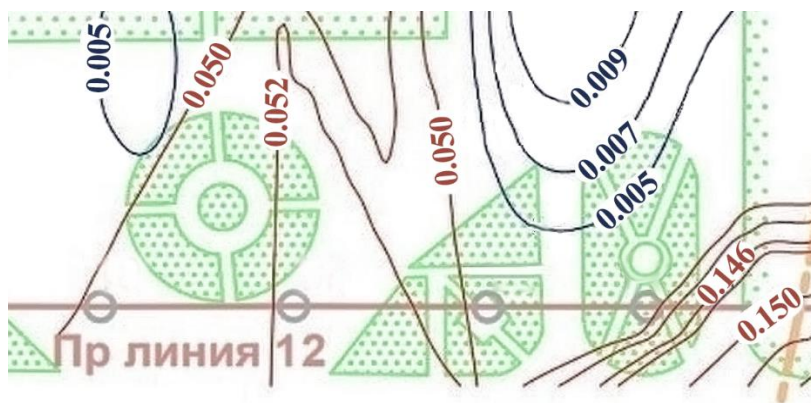


Рис. 4. Фрагмент карты горизонтальных деформаций промплощадки ш. Северопесчанская по данным комплекса геодезических и радонометрических исследований.

Горный массив ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области:
красные изолинии – деформации растяжения; синие изолинии – деформации сжатия

Выводы

В результате выполненных аналитических исследований установлена зависимость между значениями деформаций, определенных на геодезической профильной линии 12, расположенной на промплощадке ш. Северопесчанская и деформационными показателями $A_{\text{разупл.}}$ и $A_{\text{сжат.}}$ по данным радонометрии. Геодезическая профильная линия 12 использовалась как параметрическая. Показатели $A_{\text{разупл.}}$ и $A_{\text{сжат.}}$ определены по соотношению долей объемной активности радона-222 и торона в почвенном воздухе на свободных от искусственного покрытия участках промплощадки без мониторинговых наблюдений.

Полученные зависимости справедливы только для горного массива промплощадки ш. Северопесчанская.

Полученные зависимости позволили определить количественные значения горизонтальных деформаций в радонометрических точках измерения и далее, используя метод аппроксимации, построить карту распределения горизонтальных деформаций в

пределах промплощадки.

Опробованная методика, уступая в точности геодезическим исследованиям, позволяет получить общую картину распределения деформаций не только вдоль профильной геодезической линии, но и по площади исследуемого горного массива с минимальными материальными затратами.

Список литературы

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025620941 РФ. Данные наблюдений за процессом сдвижения на Северопесчанском железорудном месторождении за 1974–2002 гг.: заявл. 14.02.2025; опублик. 27.02.2025 / С.В. Усанов, С.А. Ногин, Ю.П. Коновалова [и др.]; правообладатель ИГД УрО РАН.
2. Далатказин Т.Ш., Ведерников А.С., Григорьев Д.В., Зуев П.И., 2022. Опыт применения геофизических методов в комплексе геодинамической диагностики горного массива. *Горная промышленность*, № S1, С.105 – 110.
3. 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.
4. Далатказин Т.Ш., Коновалова Ю.П., Зуев П.И., Шевченко М.Д., 2023. Новые возможности радонометрии в комплексе геодинамической диагностики горного массива. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 34–42.
5. *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. Москва: Недра, 1973, 632 с.
6. *Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. СП 317.1325800.2017*: издание официальное: принят и введен в действие с 23 июня 2018 г. Минстрой России, «АИИС», ООО «ИГИИС». Москва: Минстрой России, 2017, 79 с. (Свод правил).
7. *Инженерно-геодезические изыскания для строительства. СП 11-104-97*: издание официальное: принят и введен в действие с 1 января 1998 г / ПНИИИС, ГО «Ростройизыскания», ЦНИИГАиК. Москва, 2005, 76 с. (Система нормативных документов в строительстве).
8. Усанов С.В., Коновалова Ю.П., Ногин С.А., Зотов Д.С., 2025. Систематизация данных многолетнего мониторинга развития сдвижения на Песчанском скарново-магнетитовом месторождении. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 25 – 35.
9. Далатказин Т.Ш., 2023. Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 64 – 69.
10. Скворцов А.В., 2002. *Триангуляция Делоне и её применение*. Томск: Издательство Томского университета, 128 с.
11. Мальцев К.А., Мухарамова С.С., 2014. *Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer)*. Учеб. пособие. Казань: Казанский университет, 103 с.
12. Голубинский А.Н., 2007. Методы аппроксимации экспериментальных данных и построения моделей. *Вестник Воронежского Института МВД России*, № 2, С.138 – 143.

References

1. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2025620941 RF. Dannye nablyudenii za protsessom sdvizheniya na Severopeschanskom zhelezorudnom

mestorozhdenii za 1974–2002 gg. [Data on observations of the displacement process at the Severo-Peschanskoe iron ore deposit for 1974–2002]: zayavl. 14.02.2025; opubl. 27.02.2025 / S.V. Usanov, S.A. Nogin, Yu.P. Konovalova [i dr.]; pravoobladatel' IGD UrO RAN.

2. Dalatkazin T.Sh., Vedernikov A.S., Grigor'ev D.V., Zuev P.I., 2022. Opyt primeneniya geofizicheskikh metodov v komplekse geodinamicheskoi diagnostiki gornogo massiva [Experience of using geophysical methods in a complex of geodynamic diagnostics of a mountain range]. Gornaya promyshlennost', № S1, P.105 – 110.

3. 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 [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.

4. Dalatkazin T.Sh., Konovalova Yu.P., Zuev P.I., Shevchenko M.D., 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.

5. 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. territori-al'noe geologicheskoe upravlenie; gl. red. A.V. Sidorenko; red. toma: K.K. Zoloev. Moscow: Nedra, 1973, 632 p.

6. Inzhenerno-geodezicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva . Obshchie pravila proizvodstva rabot. SP 317.1325800.2017 [Engineering and geodetic surveys for construction. General rules of work. SP 317.1325800.2017]: izdanie ofitsial'noe: prinyat i vveden v deistvie s 23 iyunya 2018 g. Ministroi Rossii, "AIIS", OOO "IGIIS". Moscow: Ministroi Rossii, 2017, 79 p. (Svod pravil).

7. Inzhenerno-geodezicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. SP 11-104-97 [Engineering and geodetic surveys for construction. SP 11-104-97]: izdanie ofitsial'noe: prinyat i vveden v deistvie s 1 yanvarya 1998 g / PNIIS, GO "Rosstroiiizyskaniya", TsNIIGAiK. Moscow, 2005, 76 p. (Sistema normativnykh dokumentov v stroitel'stve).

8. Usanov S.V., Konovalova Yu.P., Nogin S.A., Zotov D.S., 2025. Sistematizatsiya dannykh mnogoletnego monitoringa razvitiya sdvizheniya na Peschanskom skarnovo-magnetitovom mestorozhdenii. Problemy nedropol'zovaniya, № 1, P. 25 – 35.

9. 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.

10. Skvortsov A.V., 2002. Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye [Delaunay triangulation and its application]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, 128 p.

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

12. Golubinskii A.N., 2007. Metody approksimatsii eksperimental'nykh dannykh i postroeniya modelei [Methods of experimental data approximation and model construction]. Vestnik Voronezhskogo Instituta MVD Rossii, № 2, P.138 – 143.