

## Комплексирование радонометрии и сейсморазведки при изучении современной геодинамической активности

Т. Ш. Далатказин

*Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия;  
e-mail: 9043846175@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2727-5405>*

### Информация о статье

Поступила в редакцию 29.01.2026; получена после доработки 05.03.2026; принята к публикации 13.03.2026

### Ключевые слова:

современная геодинамическая активность, массив горных пород, тектонические нарушения, радон, торон, деформации, геодинамическое районирование, сейсморазведка, коэффициент Пуассона

### Реферат

Комплексирование модернизированных вариантов эманационной съемки и сейсморазведки является эффективным инструментом диагностики геодинамической активности массива горных пород. Опытные методические комплексные геофизические исследования выполнены в 2023 г. на промплощадке шахты Северопесчанская (Свердловская область, г. Краснотурьинск). Уникальные свойства радона и торона определяют их использование в качестве природных индикаторов современной геодинамики. Усовершенствованная методика эманационной съемки позволяет оперативно (без длительных мониторинговых наблюдений) выявлять геодинамическую составляющую формирования поля радона, зоны деформаций растяжения и сжатия в массиве горных пород, оконтуривать и ранжировать по степени опасности участки активных деформаций. Сейсморазведочные исследования обеспечивают получение информации о распределении упругих характеристик горных пород в разрезе, элементах залегания структурных неоднородностей. Результаты комплексных опытно-методических геофизических исследований демонстрируют тот факт, что радоновые аномалии коррелируют с глубинными структурными неоднородностями, установленными сейсморазведкой; полученные данные подтверждаются геологической и геодезической априорной информацией. Предложенный комплексный подход позволяет устранить ограничения радонометрии и значительно повысить информативность геодинамической диагностики, выполняемой для обеспечения безопасности объектов недропользования.

### Для цитирования

Далатказин Т. Ш. Комплексирование радонометрии и сейсморазведки при изучении современной геодинамической активности. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 2. С. 217–227. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-217-227>.

## Integration of radon and seismic surveys in the study of modern geodynamic activity

Timur Sh. Dalatkazin

*Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia;  
e-mail: 9043846175@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2727-5405>*

### Article info

Received 29.01.2026; received in revised 05.03.2026;

accepted 13.03.2026

### Key words:

modern geodynamic activity, rock mass, disjunctive faults, radon, thoron, deformations, geodynamic zoning, seismic exploration, Poisson's ratio

### Abstract

The integration of modernized emanation surveys and seismic exploration is an effective tool for diagnosing the geodynamic activity of rock masses. In 2023, experimental and methodological integrated geophysical surveys were conducted at the Severopeschanskaya mine site (Sverdlovsk region, Krasnoturyinsk). The unique properties of radon and thoron determine their use as natural indicators of recent geodynamics. An improved emanation survey technique allows for the rapid (without lengthy monitoring) identification of the geodynamic component of radon field formation, zones of tensile and compressive deformation in rock masses, and the delineation and ranking of active deformation zones by hazard. Seismic exploration studies provide information on the distribution of elastic properties of rocks in the section and the location of structural heterogeneities. The results of comprehensive experimental and methodological geophysical studies demonstrate that radon anomalies correlate with deep structural heterogeneities identified by seismic exploration; the obtained data are confirmed by prior geological and geodetic information. The proposed integrated approach eliminates the limitations of radon measurements and significantly improves the information content of geodynamic diagnostics performed to ensure the safety of subsoil use facilities.

### For citation

Dalatkazin, T. Sh. 2026. Integration of radon and seismic surveys in the study of modern geodynamic activity. *Vestnik of MSTU*, 29(2), pp. 217–227. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-217-227>.

## Введение

Со второй половины XX в. мировое развитие характеризуется устойчивой тенденцией к увеличению количества, масштабов и тяжести последствий природно-техногенных катастроф, оказывающих возрастающее негативное воздействие на социально-экономическую и экологическую обстановку в глобальном масштабе. Проблема роста крупномасштабных чрезвычайных ситуаций является комплексной, системной и обусловлена не столько увеличением числа природных аномалий, сколько дисбалансом между темпами техногенного развития и мерами по обеспечению безопасности. Игнорирование рисков природного и техногенного характера, стремление сэкономить на исследованиях и защитных мероприятиях во многом связаны с ограниченными знаниями человека о существующих опасностях и негативных последствиях их проявления.

Подвижные тектонические нарушения – источник нарушения равновесия в геологической среде. Для объектов недропользования современная геодинамическая активность является одним из основных факторов риска.

Активным тектоническим разрывным структурам свойственны периоды активизации подвижности и периоды ее снижения. Современная геодинамическая активность распределяется по структуре неравномерно, в том числе и по простиранию. Она проявляется в трендовых и циклических геодинамических движениях различной частоты и интенсивности. Если продолжительность трендовых движений измеряется месяцами и годами, то периоды циклов составляют секунды, минуты и часы. В подвижных зонах разрывных нарушений породы характеризуются открытой повышенной трещиноватостью, дезинтеграцией и водонасыщенностью, что создает условия для карстообразования, вызывает разуплотнение, оседание толщ горных пород. Проявляющиеся в геодинамически активных зонах деформации массива горных пород представляют опасность для инженерных объектов, вызывая повреждения инфраструктурных коммуникаций, горных выработок, зданий, сооружений (Сашурин, 2003; Селюков и др., 2010; Кузьмин, 1999; Николаев, 1988; Ульянов, 2015).

В статье представлены результаты продолжающихся многолетних геофизических исследований, выполняемых в Институте горного дела УрО РАН (ИГД УрО РАН) по структурно-геодинамическому районированию массива горных пород.

## Теоретическая основа метода: радон как уникальный природный индикатор деформаций

В основе структурно-геодинамического картирования – изучение петрофизических эффектов, возникающих в коренных породах и покровных отложениях в результате воздействия на них современной геодинамики. Под воздействием современных геодинамических процессов изменяется степень нарушенности геологической среды. Это позволяет исследовать проявления современной геодинамики с использованием геофизических методов, из которых наиболее чувствительным и информативным является метод эманационной (радон, торон) съемки. Обоснованием применения эманационной съемки для структурно-геодинамического изучения массива горных пород являются результаты исследований, свидетельствующие, что аномалии объемной активности почвенного радона (ОАР,  $Q$ , Бк/м<sup>3</sup>) генетически связаны с геодинамически активными разрывными тектоническими нарушениями (Селюков и др., 2010).

Проницаемость тектонических разрывов и воздействие упругих волновых колебаний на породный массив зависит от степени геодинамической активности этих структур (Тагильцев, 2003; Алейников, 1983; Грацинский и др., 1967).

Эманациями называются радиоактивные газы, состоящие из изотопов радона: радона <sup>222</sup>Rn и торона <sup>220</sup>Rn. Источником радиоактивных газов в природных условиях являются радиоактивные элементы – радий, торий и их дочерние продукты, рассеянные во всех без исключения горных породах (Зверев и др., 1980). Уран и торий в горных породах распределяются согласно геохимическими закономерностями (Сердюкова и др., 1969).

Радон и торон не вступают во взаимодействие с другими элементами, так как химически инертны. Изотопы радона и торона являются альфа-излучателями. Период полураспада <sup>222</sup>Rn составляет 3,8 сут, а период полураспада <sup>220</sup>Rn – 55,6 с (Баранов, 1955). Перечисленные свойства радона и торона имеют определяющее значение для их практического использования при исследовании современной геодинамики.

Миграция радона и сопутствующих газов в земной коре зависит от проницаемости геологической среды, так как происходит по открытым порам и трещинам под действием трех основных механизмов: диффузионного (за счет градиента концентрации), конвективного (вследствие температурного градиента) и эффузионного (обусловленного градиентом давления). Рыхлые покровные отложения являются коллектором для радона, поступающего из подстилающего массива. Таким образом, поле почвенного радона отражает геодинамическую структуру горного массива (Селюков и др., 2010).

Поле почвенного радона формирует геодинамические и негеодинамические факторы.

Для геодинамической диагностики горного массива интересны геодинамические факторы формирования поля почвенного радона:

– изменение проницаемости геологической среды. Раскрытие трещин в зонах растяжения или дробление пород при сдвиге создают каналы для миграции газов из глубины. Соответственно, при сжатии трещины и поры смыкаются, и возможность миграции уменьшается (Горбушина и др., 1975);

– вибровоздействие на горные породы. Микросейсмические события и упругие волновые колебания, сопровождающие деформации, высвобождают сорбированный и поровый радон (Адушкин и др., 2005; Грацинский и др., 1967; Уткин и др., 2008);

– импульсы давления в трещинах и поровом пространстве. При геодинамических циклических подвижках в трещинах формируются локальные, импульсные участки разряжения и увеличения давления, что способствует продвижению газов по порам и микротрещинам (Киссин, 2009; Шестаков и др., 1992; Sibson et al., 1975).

Согласно перечисленным факторам, над зонами современной геодинамической активности формируются аномалии почвенного радона. Концентрации почвенного радона непосредственно зависят от степени проявления современной геодинамической активности, независимо от глубины заложения разлома и мощности покровных отложений, что позволяет использовать результаты эманационной радоновой съемки для геодинамической диагностики горного массива (Далатказин, 2011). Однако на формирование поля радона оказывают влияние, и существенное, негеодинамические факторы.

К негеодинамическим относятся факторы, не связанные с современной геодинамической активностью:

– геохимический состав горных пород. В магматических горных породах наибольшая концентрация урана и радия регистрируется в кислых породах, а наименьшая – в ультраосновных (Войткевич, 1961);

– метеорологические факторы. На величину ОАР в почвенном воздухе оказывают влияние следующие метеоусловия: изменение атмосферного давления, сезонное промерзание грунта, выпадение атмосферных осадков, изменение температуры приземного слоя атмосферы (Mentes, 2018). При отборе проб почвенного воздуха (глубина шнура 0,8–1,0 м) изменения атмосферного давления влияют на концентрацию радона в пробе в пределах погрешности радиометра (Уткин и др., 2008). Замерзание и сильное смачивание поверхности почвы приводит к уменьшению выделения радона, потому что поры заполняются водой, которая затрудняет его миграцию<sup>1</sup> (Уткин и др., 2008; Баранов, 1955);

– влияние лунно-солнечных приливов. Роль приливного фактора в формировании поля эманаций радона существенна, так как деформации геологической среды, вызванные приливной волной, обуславливают периодические и циклические изменения проницаемости каналов миграции подземных газов (Адушкин и др., 2012; Barberio et al., 2018; Mentes, 2018; Groves-Kirkby et al., 2005; Козлова и др., 2005).

Описанные негеодинамические факторы являются "помехой" при использовании результатов эманационной съемки в ходе исследования современной геодинамической активности массива горных пород.

Для повышения достоверности использования радонометрии при изучении современной геодинамической активности в ИГД УрО РАН на этапе обработки результатов полевых измерений ОАР в почвенном воздухе применяется их нормирование. Результаты геодинамического районирования по данным эманационной съемки с применением нормирования и последующим подтверждением методами геодезического мониторинга, выполненного на участках горных массивов с различными горно-геологическими условиями, в том числе с мощным осадочным чехлом, позволяют сделать следующие выводы:

1) радонометрический метод, основанный на измерениях ОАР в почвенном воздухе с последующим нормированием, обеспечивает высокую достоверность оценки геодинамического состояния массива без периодических измерений, что определяет его ценность в качестве оперативного метода геодинамической диагностики;

2) периодические измерения поля радона позволяют отслеживать динамику геодинамических процессов на исследуемой территории, выявляя их пространственно-временную эволюцию;

3) геодинамическая модель, основанная на нормированной ОАР, интегрирует все проявления современной геодинамики (различной природы – техногенной и естественной) в массиве горных пород разной интенсивности и всего спектра частотных характеристик (Далатказин, 2011; 2023).

На сегодняшний день радонометрия в варианте эманационной съемки является оптимальным геофизическим методом, позволяющим без мониторинговых наблюдений выполнять предварительное геодинамическое районирование горного массива.

Однако опыт практического применения радонометрии для изучения современной геодинамики выявил существенные ограничения, снижающие информативность результатов исследований:

– результаты геодинамического районирования на основе радонометрии не позволяют достоверно разграничить фоновые (геодинамически пассивные) участки и участки деформаций сжатия, поскольку и те и другие характеризуются относительно низкими значениями нормированной ОАР почвенного радона;

– геодинамическое районирование с использованием радонометрии позволяет получить структурно-геодинамическую модель только в плане (без учета ее вертикальной составляющей).

Для определения путей решения этих проблем Институтом горного дела УрО РАН были выполнены комплексные опытно-методические геофизические исследования с использованием эманационной съемки и сейсморазведки.

<sup>1</sup> Новиков Г. Ф. Радиометрическая разведка. Л. : Недра, 1989. 407 с.

## Объект исследований

Геофизические исследования проведены на геодинамическом полигоне, расположенном на промплощадке шахты Северопесчанская (Свердловской область, г. Краснотурьинск) в 2023 г.

Наличие априорной геологической и геодезической информации послужило критерием при выборе полигона для данных опытно-методических исследований.

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°. 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°<sup>2</sup>.

В районе промплощадки шахты залегают вулканогенные образования, представленные кристаллокластическими и литокристаллическими туфами роговообманково-плагиоклазовых порфиритов, реже роговообманково-плагиоклазовыми порфиритами андезитового и еще реже андезито-базальтового состава, слагающими богословскую толщу и входящими в состав башмаковской толщи Краснотурьинской свиты  $D_1kT$ .

На участке исследований расположена жильная порода, представленная габбродолеритом, совпадающая с крутопадающим разломом субмеридионального простирания. Контакты дайки с вмещающими породами, как правило, нарушены, а параметры залегания близки к параметрам основных тектонических нарушений.

На скальных породах палеозоя повсеместно залегает кора выветривания пород триас-юрского возраста, представленная глинистыми породами. На коре выветривания залегают песчано-глинистые элювиально-делювиальные отложения четвертичного возраста. Мощность четвертичных отложений может достигать 10 м<sup>3</sup>.

## Результаты и обсуждение

Комплексные опытно-методические геофизические исследования с использованием эманационной съемки и сейсморазведки, направленные на повышение информативности исследований современной геодинамической активности, выполнялись по девяти радонометрическим профилям и одному сейсморазведочному. Расположение и длина геофизических профилей на участке исследований определены с учетом наличия асфальтового покрытия, зданий и сооружений (рис. 1).

По первому направлению исследования состояли в проверке предположений:

– в почвенном воздухе над участками деформаций растяжения в соотношении  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  увеличивается доля  $^{222}\text{Rn}$ , поскольку в условиях растягивающих напряжений происходят раскрытие трещин и рост вертикальной миграции газов, что увеличивает подток глубинных эманаций, обогащенных как  $^{222}\text{Rn}$ , так и  $^{220}\text{Rn}$ . Однако вследствие экспоненциально более быстрого распада  $^{220}\text{Rn}$  за время движения к поверхности его концентрация существенно снижается. Таким образом, в почвенном воздухе над данной зоной формируется смесь с относительно повышенной долей  $^{222}\text{Rn}$  по сравнению с фоном, где миграция в основном диффузионная;

– при сжимающих деформациях открытые трещины и поры смыкаются, что ограничивает поступление глубинных эманаций с преобладанием  $^{222}\text{Rn}$ . Основной вклад в формирование состава эманаций почвенного воздуха вносят приповерхностные породы. В результате в почвенном воздухе над зоной сжатия в соотношении  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  должна увеличиться доля  $^{220}\text{Rn}$  по сравнению с фоном (Далатказин и др., 2023).

<sup>2</sup> Геология СССР. Т. XII : Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Ч. I : Полезные ископаемые / гл. ред. А. В. Сидоренко ; ред. тома: К. К. Золоев [и др.]. М. ; Л. : Недра, 1973. 632 с.

<sup>3</sup> Комплект цифровых материалов к листу О-41-1 Государственной геологической карты РФ масштабом 1 : 200 000. Карта рекомендована к изданию НРС Роснедра 22 декабря 2017 г. / Г. Н. Бороздина, А. Н. Глушков, Ю. Н. Кошевой, В. В. Стефановский [и др.]. М. : ВСЕГЕИ, 2023.

Исследования проводились на участке расположения 12-й геодезической профильной линии на промплощадке (рис. 1). Материалы геодезического мониторинга за восьмимесячный период использовались для подтверждения результатов радонометрических исследований.

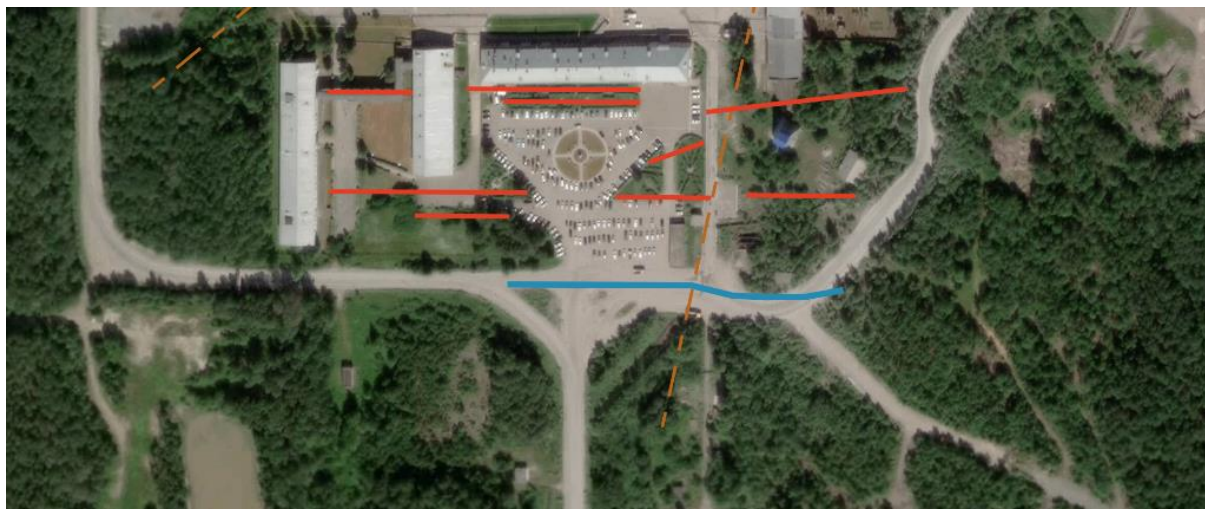


Рис. 1. Схема расположения радонометрических (красный цвет) и сейсморазведочных (синий цвет) профильных линий. Оранжевые пунктирные линии обозначают оси дизъюнктивных нарушений согласно фондовым материалам (Далатказин и др., 2023)

Fig. 1. Layout of emanation survey and seismic reflection profiles. Red lines denote emanation survey profiles; the blue line indicates the seismic profile. Orange dashed lines show the axes of disjunctive faults based on archive data (Dalatkazin et al., 2023)

Экспериментальные исследования по проверке возможностей радонометрии для выявления зон растяжения и сжатия включали следующие этапы:

1. Раздельное определение объемной активности радона-222 ( $Q^{222\text{Rn}}$ , Бк/м<sup>3</sup>) и торона ( $Q^{220\text{Rn}}$ , Бк/м<sup>3</sup>) в почвенном воздухе при осуществлении эманационной съемки. Измерения проведены в 45 точках по 9 радонометрическим профильным линиям; расстояние между точками измерения на профильной линии составило 10 м (рис. 1).

В ходе раздельного определения  $Q^{222\text{Rn}}$  и  $Q^{220\text{Rn}}$  в отбираемых пробах, основанного на различии периодов полураспада радона-222 (3,82 сут) и торона (55,6 с), выполнены следующие действия:

- отобрана проба почвенного воздуха и сразу выполнено измерение суммарной объемной активности смеси радона-222 и торона ( $Q^{222\text{Rn}} + Q^{220\text{Rn}}$ , Бк/м<sup>3</sup>) с экспозицией 60 с;
- проба почвенного воздуха оставлена в измерительной камере (краны радиометра закрыты); выдержана временная пауза продолжительностью 300 с; за этот период  $^{220}\text{Rn}$ , содержащийся в пробе, распадается;
- выполнено повторное измерение с экспозицией 60 с, в результате которого определена  $Q^{222\text{Rn}}$ ;
- вычислена  $Q^{220\text{Rn}} = (Q^{222\text{Rn}} + Q^{220\text{Rn}}) - Q^{222\text{Rn}}$ , Бк/м<sup>3</sup> (4).

2. По результатам полевых исследований вычисление предложенных автором показателей деформаций растяжения  $A_{\text{раст}}$  и сжатия  $A_{\text{сжат}}$  для каждой точки измерения (Далатказин и др., 2023):

$$A_{\text{раст}} = \frac{Q^{222\text{Rn}}}{Q^{220\text{Rn}}}, \quad A_{\text{сжат}} = \frac{Q^{220\text{Rn}}}{Q^{222\text{Rn}}}.$$

3. Построение карт деформаций растяжения (рис. 2) и сжатия (рис. 3) исследуемого массива горных пород по данным радонометрии.

Данные геодезических мониторинговых наблюдений подтвердили достоверность результатов выявления зон деформаций растяжения и сжатия в горном массиве с использованием радонометрии (Далатказин и др., 2023).

По результатам радонометрических измерений выполнено геодинамическое районирование участка исследований по нормированным значениям ОАР в почвенном воздухе (рис. 4) (Далатказин и др., 2023).

<sup>4</sup> Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные методы разведки. Л. : Недра, 1965. 759 с.

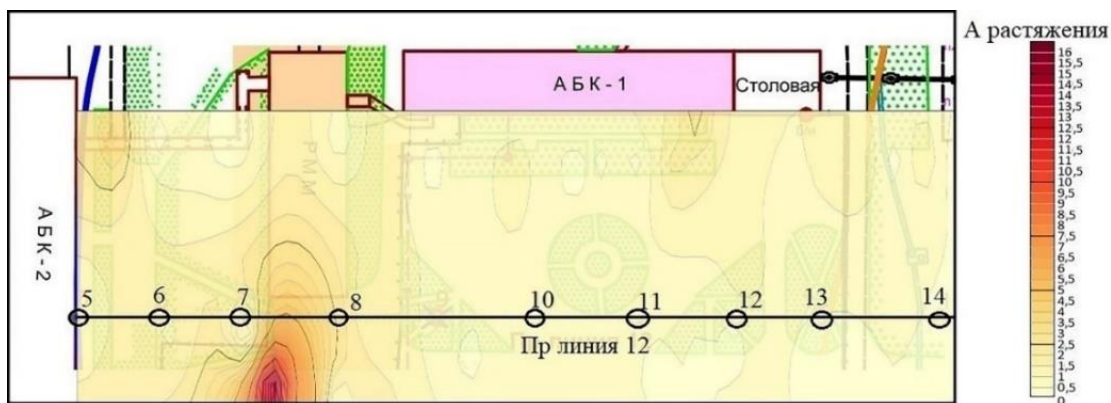


Рис. 2. Карта деформаций растяжения по данным радонометрии (по соотношению  $A_{\text{раст}}$ ). Цифрами на 12-й профильной линии обозначены геодезические реперы (Далатказин и др., 2023)

Fig. 2. Map of tensile deformations based on emanation survey data (a tensile index). Numbers along profile 12 indicate the locations of geodetic benchmarks (Dalatkazin et al., 2023)

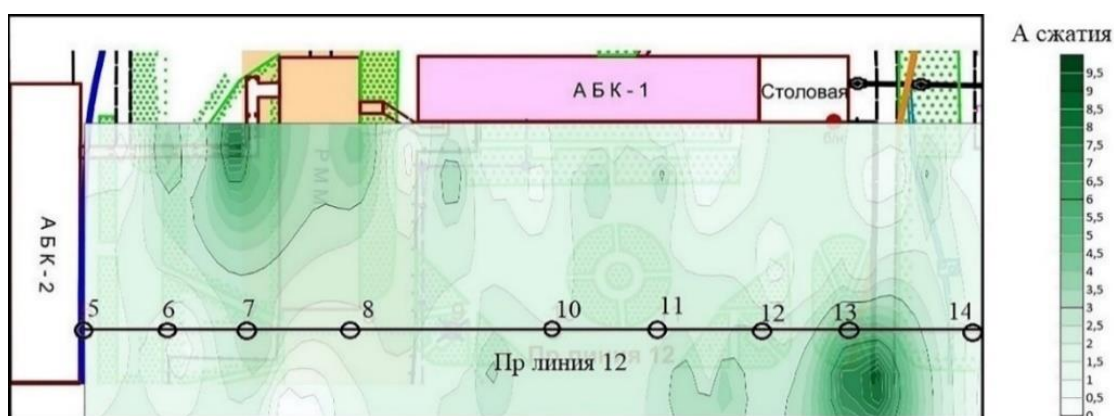


Рис. 3. Карта деформаций сжатия по данным радонометрии (по соотношению  $A_{\text{сжат}}$ ). Цифрами на 12-й профильной линии обозначены геодезические реперы (Далатказин и др., 2023)

Fig. 3. Map of compressive deformations derived from emanation survey data (a compressional index). Numbers along profile 12 indicate the locations of geodetic benchmarks (Dalatkazin et al., 2023)

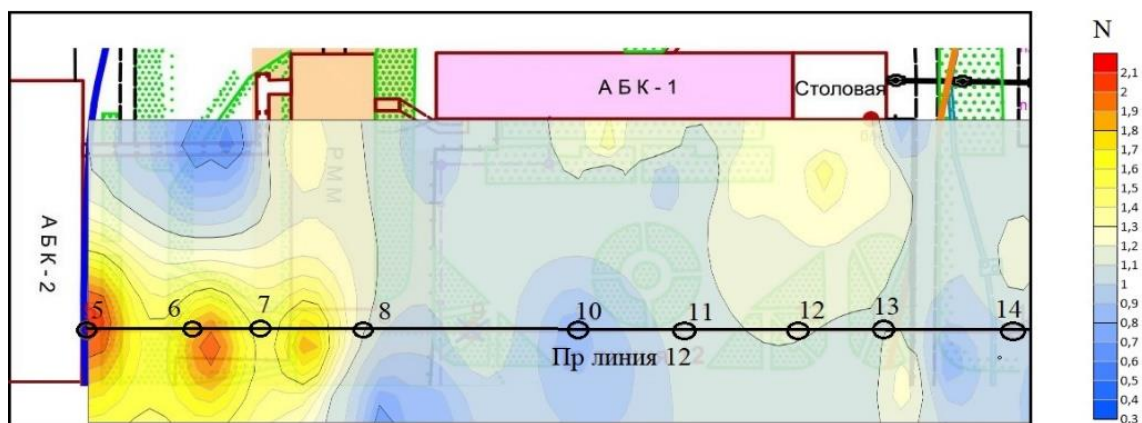


Рис. 4. Карта геодинамического районирования по данным радонометрии (по нормированным значениям ОАР в почвенном воздухе).

Цифрами на 12-профильной линии обозначены геодезические реперы (Далатказин и др., 2023)  
 Fig. 4. Map of geodynamic zoning based on emanation survey data (normalized volumetric radon activity in soil air). Numbers along profile 12 denote geodetic benchmarks (Dalatkazin et al., 2023).

На полученной карте геодинамического районирования участки с повышенными значениями нормированной объемной активности почвенного радона  $N_i$  соответствуют участкам растяжения по данным геодезического мониторинга. В случае с участками с пониженными значениями  $N_i$  на карте районирования

такого соответствия не выявлено. Данные участки могут быть обусловлены как отсутствием современной геодинамической активности, так и сжимающими деформациями.

С учетом распределения показателя  $A_{\text{сжат}} = \frac{Q^{220}_{Rn}}{Q^{222}_{Rn}}$  дифференцированы участки с низкими

нормированными значениями ОАР на участки с деформацией сжатия и участки с отсутствием деформационных процессов (рис. 3, 5); определены зоны деформаций сжатия, где низкие значения ОАР сочетаются с относительно повышенными значениями  $A_{\text{сжат}}$ :

- зона с эпицентром деформации сжатия в районе репера 13-й геодезической профильной линии;
- зона с эпицентром деформации сжатия, расположенная севернее репера 7-й геодезической профильной линии.

Соответственно, участки с относительно низкими значениями нормированной ОАР и пониженными значениями показателя  $A_{\text{сжат}}$  отнесены к фоновым, характеризующимся отсутствием современной геодинамической активности. Данные выводы подтверждаются априорной информацией геодезического мониторинга, проведенного в течение 8 месяцев (Далатказин и др., 2023).

Одновременно с радонометрическими исследованиями с целью повышения и информативности применения геофизических методов для получения структурно-геодинамической модели горного массива Северо-Песчанского полигона были выполнены исследования с помощью методов сейсморазведки.

Сейсморазведка в целом основана на изучении распространения в среде упругих волн, возбуждаемых чаще всего искусственным путем. Упругие волны распространяются во всех направлениях от места их возбуждения и проникают на большую глубину в толщу земной коры.

Возможности использования сейсмических методов для обнаружения и прослеживания зон тектонических нарушений основаны: 1) на резком различии сейсмических свойств трещиноватых пород, приуроченных к зоне тектонических нарушений и пород, находящихся вне ее пределов; 2) сложном характере рельефа коренных пород на границах зоны тектонического нарушения.

В изучаемых с использованием сейсморазведки волновых полях определяются соответствующие изменения в скоростях упругих волн в среде и зависящих от них физических параметрах (коэффициент Пуассона, модуль Юнга и т. п.)<sup>5</sup>.

Сейсморазведка позволяет получить информацию о распределении упругих характеристик пород, уточнить границы структурных неоднородностей в плане и разрезе, определить элементы их залегания.

Сейсморазведочные исследования выполнены по одной профильной линии (рис. 1); общая длина сейсморазведочного профиля составила 172 м; произведено 48 записей, которые обработаны как единый профиль каждым из упомянутых выше методов.

Исследования массива выполнены двумя сейсморазведочными методами.

Метод преломленных волн (МПВ) для получения разреза скорости распространения продольных волн  $V_p$ , м/с, является одним из основных методов сейсморазведки, основанным на определении времени распространения упругих волн, преломившихся в пласте, в котором скорость сейсмических волн больше, чем в слоях, расположенных выше. После определения времени пробега сейсмических волн до нескольких точек наблюдения осуществляется построение прямого и встречного годографов; далее вычисляются глубина и наклон пласта, характеризующегося повышенной скоростью распространения волны. По величине скорости делается вывод о физических свойствах и геологической природе преломляющего пласта.

Скоростной разрез, полученный методом преломленных волн по продольным волнам, представлен на рис. 5. Распределение скоростей в разрезе в целом однородно; в верхней части отмечается слой дисперсных грунтов мощностью до первых метров.

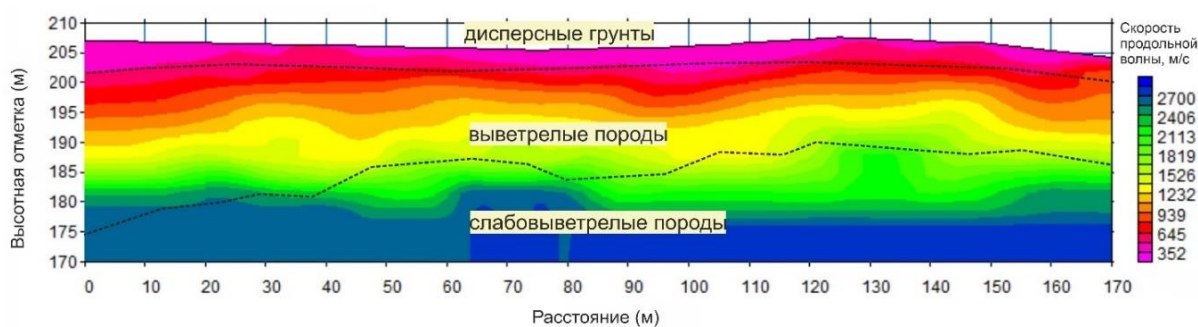


Рис. 5. Разрез скоростей продольных волн по методу преломленных волн  
Fig. 5. P-wave velocity section from seismic refraction survey

<sup>5</sup> Гурвич И. И. Сейсморазведка. М.: Недра, 1964. 440 с.

Многоканальный анализ поверхностных волн (MASW, Multichannel Analysis of Surface Waves) – метод, применяемый для получения разреза скорости распространения поперечных волн  $V_s$ , м/с, и основанный на изучении распространения поверхностных волн в геологической среде. Одним из важнейших свойств этих волн является дисперсия – зависимость фазовой скорости распространения волны от частоты, которая и определяет глубину проникновения сигнала вглубь породного массива. С помощью метода MASW выполняется выделение поверхностных волн на каждой зарегистрированной сейсмограмме с дальнейшим построением спектров фазовых скоростей и выделением дисперсионных кривых. После чего производится их инверсия, итогом которой для каждой кривой является одномерное распределение скорости поперечных волн  $V_s$ . Полученные вертикальные скоростные законы относятся к середине расстановки, а их объединение позволяет построить двумерное или трехмерное изображение изучаемой среды.

В данных исследованиях использована модификация метода MASW-CMPCC (Common Middle Point Cross-Correlation) с общей средней точкой. Основное отличие от базовой методики заключается в процедурах обработки: для каждой пары трасс рассчитываются корреляционные зависимости, затем они сортируются по общей средней точке, и трассы с одинаковой геометрией складываются во временной области. За счет данного усложнения обработки повышаются точность и разрешающая способность метода.

Разрез по профилю скоростей поперечных волн, выполненный с использованием метода MASW-CMPCC, показан на рис. 6.

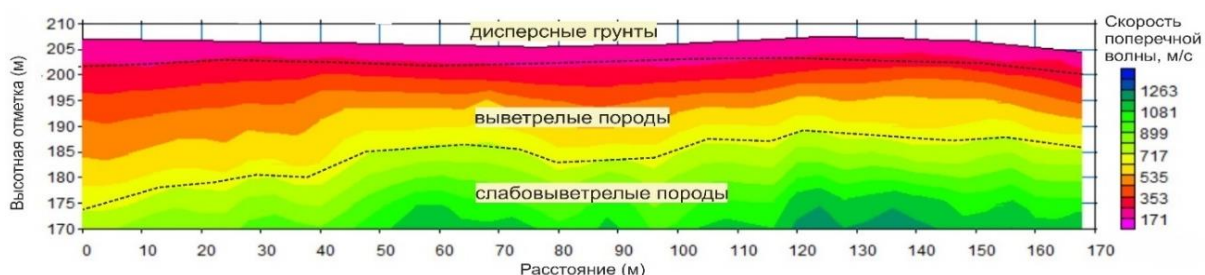


Рис. 6. Разрез скоростей поперечных волн по методу MASW-CMPCC  
Fig. 6. Shear-wave velocity section obtained using the MASW-CMPCC method

Полученные распределения скоростей продольных и поперечных волн позволяют построить распределение физических величин, зависящих от скоростей упругих волн и характеризующих массив. Коэффициент Пуассона – безразмерная величина, которая отражает упругие свойства изотропного материала и показывает, как материал деформируется при растяжении в поперечном направлении и сжатии – в продольном.

Значения коэффициента Пуассона определяются по формуле

$$\mu = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)},$$

где  $V_s$  – скорость распространения поперечных волн, м/с;  $V_p$  – скорость распространения продольных волн, м/с<sup>6</sup> (Lane et al., 2008).

На рис. 7 представлен разрез распределения значений коэффициента Пуассона, характеризующий упругие свойства изучаемого массива.

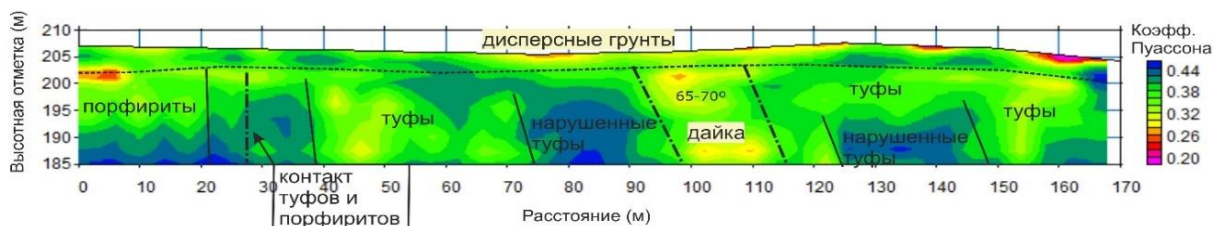


Рис. 7. Разрез распределения коэффициента Пуассона по данным сейсморазведки  
Fig. 7. Poisson's ratio distribution section based on seismic survey data

Информация о распределении полученных упругих свойств пород массива позволяет расчленить представленный разрез на геологические элементы. В ходе сейсморазведочных исследований зафиксирован разлом и связанная с ним дайка габбро-диабазов. Угол падения дайки составляет ~67°, что хорошо коррелирует с существующей геологической информацией. На разрезе распределения коэффициента Пуассона показано, что дайке сопутствуют мощные зоны нарушенных туфов; их суммарная ширина достигает 75 м.

<sup>6</sup> Гурвич И. И. Сейсморазведка. М.: Недра, 1964. 440 с.

Анализ априорной геологической информации и данных об упругих свойствах пород, слагающих исследуемый массив, дает возможность достоверно расчленить разрез на геологические элементы. Установленные границы структурных неоднородностей с использованием сейсморазведки подтверждаются независимыми данными. Полученные результаты свидетельствуют о том, что зафиксированные ранее изменения, связанные с проявлением геодинамики, обусловлены выявленным геофизическими методами разломом и сопутствующей ему дайкой габбро-диабазов (угол падения  $\sim 67^\circ$ ). Важным практическим результатом является идентификация мощных (суммарно до 75 м) зон нарушенных туфов, сопровождающих дайку, что необходимо учитывать при оценке устойчивости массива.

### **Заключение**

В результате проведенных опытно-методических геофизических исследований на Северо-Песчанском полигоне, включающих эманационную съемку и сейсморазведку:

- выполнена дифференциация территории исследуемого массива горных пород по степени современной геодинамической активности;
- разделены участки с низкими нормированными ОАР на участки деформаций сжатия и участки с отсутствием деформационных процессов;
- выявлена блочная структура исследуемого породного массива в разрезе;
- установлены границы структурных неоднородностей;
- определены элементы залегания структурных неоднородностей.

Комплексирование геофизических методов при выполнении геодинамической диагностики массива горных пород повышает их достоверность и информативность, позволяет эффективно использовать превентивное управление рисками на этапах проектирования, строительства и эксплуатации объектов недропользования, повышая промышленную, экологическую и экономическую безопасность.

### **Благодарности**

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

### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

- Адушкин В. В., Спивак А. А., Кожухов С. А., Кукушкин Ю. В. Резонансные особенности эсхалации природного радона // Доклады Академии наук. 2005. Т. 400, № 3. С. 369–371. EDN: HSFRBB.
- Адушкин В. В., Спивак А. А., Харламов В. А. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора – атмосфера // Физика Земли. 2012. № 2. С. 14–26. EDN: OOWGLR.
- Баранов В. И. Радиометрия. М. : Изд-во АН СССР, 1955. 327 с.
- Войткевич Г. В. Проблемы радиогеологии. М. : Госгеолтехиздат, 1961. 272 с.
- Горбушина Л. В., Рябоштан Ю. Ш. Эманационный метод индикации геодинамических процессов при инженерно-геологических изысканиях // Советская геология. 1975. № 4. С. 48–50.
- Грацинский В. Г., Горбушина Л. В., Тыминский В. Р. О выделении радиоактивных газов из образцов горных пород под действием ультразвука // Известия АН СССР. Физика Земли. 1967. № 10. С. 91–94.
- Далатказин Т. Ш. Использование радонометрии при изучении современной геодинамики на территориях, перекрытых мощным чехлом осадочных пород для решения задачи обеспечения безопасной эксплуатации объектов недропользования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 7. С. 97–100. EDN: ONBPXD.
- Далатказин Т. Ш. Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии // Проблемы недропользования. 2023. № 1(36). С. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.01.064>. EDN: CNUAHE.
- Далатказин Т. Ш., Коновалова Ю. П., Зуев П. И., Шевченко М. Д. Новые возможности радонометрии в комплексе геодинамической диагностики // Проблемы недропользования. 2023. № 4(39). С. 34–42. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.04.034>. EDN: RHLOHF.
- Зверев В. Л., Токарев А. Н., Тыминский В. Г., Швец В. М. Изотопы радона при обнаружении современных геодинамических процессов земной коры // Радиоизотопная геохимия. М. : Недра, 1980. 201 с.
- Киссин И. Г. Флюиды в земной коре : геофизические и тектонические аспекты. М. : Наука, 2009. 327 с.
- Козлова И. А., Юрков А. К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // Уральский геофизический вестник. 2005. № 1(7). С. 30–34. EDN: RBKTJN.

- Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М., 1999. 220 с.
- Николаев Н. И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М. : Недра, 1988. 491 с.
- Сашурин А. Д. Современная геодинамика и техногенные катастрофы // Геомеханика в горном деле : докл. междунар. конф., 19–21 ноября 2002 г. Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2003. С. 180–191. EDN: REFMUB.
- Селюков Е. И., Стигнеева Л. Т. Краткие очерки практической микрогеодинамики. СПб. : Питер, 2010. 175 с.
- Сердюкова А. С., Капитанов Ю. Т. Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе. М. : Атомиздат, 1969. 312 с.
- Ульянов В. Ю. Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС в асейсмичных регионах // Проблемы недропользования. 2015. № 1(4). С. 103–107. EDN: ТМОКНР.
- 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, 2008. С. 317–320.
- Шестаков В. А., Киссин И. Г. Импульсный перенос флюидов в литосфере // Доклады Академии наук. 1992. Т. 323, № 3. С. 486–490.
- Barberio M. D., Gori F., Barbieri M., Billi A. [et al.]. Diurnal and semidiurnal cyclicity of radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) in groundwater, Giardino Spring, Central Apennines, Italy // Water. 2018. Vol. 10, Iss. 9. Article number: 1276. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10091276>.
- Groves-Kirkby C. J., Denman A. R., Crockett R. G. M., Phillips P. S. [et al.]. Identification of tidal and climatic influences within domestic radon time-series from Northamptonshire, UK // Science of The Total Environment. 2006. Vol. 367, Iss. 1. P. 191–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.11.019>.
- Lane J. W., Jr., White E. A., Steele G. V., Cannia J. C. Estimation of bedrock depth using the horizontal-to-vertical (H/V) ambient-noise seismic method // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, April 6–10, 2008, Philadelphia, Pennsylvania, Proceedings: Denver, Colorado, Environmental and Engineering Geophysical Society, 2008. P. 490–502. DOI: <https://doi.org/10.4133/1.2963289>.
- Mentes G. Investigation of the relationship between rock strain and radon concentration in the tidal frequency-range // Journal of Applied Geophysics. 2018. Vol. 155. P. 232–236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.06.019>.
- Sibson R. H., Moore J. Mc. M., Rankin A. H. Seismic pumping – a hydrothermal fluid transport mechanism // Journal of the Geological Society. 1975. Vol. 131, Iss. 6. P. 653–659. DOI: <https://doi.org/10.1144/gsjgs.131.6.0653>.

## References

- Adushkin, V. V., Spivak, A. A., Kozhukhov, S. A., Kukushkin, Yu. V. 2005. Resonant features of natural radon exhalation. *Doklady Akademii Nauk*, 400(3), pp. 369–371. EDN: HSFRRB. (In Russ.)
- Adushkin, V. V., Spivak, A. A., Kharlamov, V. A. 2012. Influence of lunisolar tides on variations of geophysical fields at the Earth's crust – atmosphere boundary. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2, pp. 14–26. EDN: OOWGLR. (In Russ.)
- Baranov, V. I. 1955. Radiometry. Moscow. (In Russ.)
- Voitkevich, G. V. 1961. Problems of Radiogeology. Moscow. (In Russ.)
- Gorbushina, L. V., Ryaboshtan, Yu. Sh. 1975. Emanation method for indicating geodynamic processes during engineering-geological surveys. *Sovetskaya Geologiya*, 4, pp. 48–50. (In Russ.)
- Gratzinsky, V. G., Gorbushina, L. V., Tyminskii, V. R. 1967. On the release of radioactive gases from rock samples under the action of ultrasound. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 10, pp. 91–94. (In Russ.)
- Dalatkazin, T. Sh. 2011. The use of radonometry in the study of modern geodynamics in territories covered by a thick sedimentary cover to ensure the safe operation of subsoil facilities. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 7, pp. 97–100. EDN: ONBPXD. (In Russ.)
- Dalatkazin, T. Sh. 2023. Methodological issues of geodynamic zoning of rock mass using radonometry. *Problems of Subsoil Use*, 1(36), pp. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.01.064>. EDN: CNUAHE. (In Russ.)
- Dalatkazin, T. Sh., Konovalova, Yu. P., Zuev, P. I., Shevchenko, M. D. 2023. New possibilities of radonometry in the complex of geodynamic diagnostics. *Problems of Subsoil Use*, 4(39), pp. 34–42. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.04.034>. EDN: RHLOHF. (In Russ.)
- Zverev, V. L., Tokarev, A. N., Tyminskii, V. G., Shvets, V. M. 1980. Radon isotopes in the detection of modern geodynamic processes of the Earth's crust. In *Radioisotope Geochemistry*. Moscow. (In Russ.)
- Kissin, I. G. 2009. Fluids in the Earth's crust: Geophysical and tectonic aspects. Moscow. (In Russ.)
- Kozlova, I. A., Yurkov, A. K. 2005. Methodological issues of measuring radon-222 content in soil air during monitoring observations. *Ural'skii Geofizicheskii Vestnik*, 1(7), pp. 30–34. EDN: RBKTJN. (In Russ.)
- Kuz'min, Yu. O. 1999. Modern geodynamics and assessment of geodynamic risk in subsoil use. Moscow. (In Russ.)
- Nikolaev, N. I. 1988. Recent tectonics and geodynamics of the lithosphere. Moscow. (In Russ.)

- Sashurin, A. D. 2003. Modern geodynamics and man-made disasters. In: Geomechanics in Mining: Proceedings of the International Conference, Yekaterinburg, 19–21 November, 2002. Yekaterinburg, pp. 180–191. EDN: REFMUB. (In Russ.)
- Selyukov, E. I., Stigneeva, L. T., 2010. Brief essays on practical microgeodynamics. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Serdyukova, A. S., Kapitonov, Yu. T. 1969. Radon isotopes and their short-lived decay products in nature. Moscow. (In Russ.)
- Ulyanov, V. Yu. 2015. Organization and methodology of radon monitoring at NPP sites in aseismic regions. *Problems of Subsoil Use*, 1(4), pp. 103–107. EDN: TMOKHR. (In Russ.)
- Utkin, V. I., Yurkov, A. K., Kozlova, I. A. 2008. Radon release from rocks under the influence of elastic vibrations of different ranges. Proceedings of the Ninth Fedynsky Geophysical Readings *Geophysics of the 21st Century*. Tver, pp. 317–320. (In Russ.)
- Shestakov, V. A., Kissin, I. G. 1992. Pulse transport of fluids in the lithosphere. *Doklady Akademii Nauk*, 323(3), pp. 486–490. (In Russ.)
- Barberio, M. D., Gori, F., Barbieri, M., Billi A. et al. 2018. Diurnal and semidiurnal cyclicity of radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) in groundwater, Giardino Spring, Central Apennines, Italy. *Water*, 10(9). Article number: 1276. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10091276>.
- Groves-Kirkby, C. J., Denman, A. R., Crockett, R. G. M., Phillips, P. S. et al. 2006. Identification of tidal and climatic influences within domestic radon time-series from Northamptonshire, UK. *Science of The Total Environment*, 367(1), pp. 191–202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.11.019>.
- Lane, J. W., Jr., White, E. A., Steele, G. V., Cannia, J. C. 2008. Estimation of bedrock depth using the horizontal-to-vertical (H/V) ambient-noise seismic method. Proceedings: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, April 6–10, 2008, Philadelphia, Pennsylvania, Denver, Colorado, Environmental and Engineering Geophysical Society, pp. 490–502. DOI: <https://doi.org/10.4133/1.2963289>.
- Mentes, G. 2018. Investigation of the relationship between rock strain and radon concentration in the tidal frequency-range. *Journal of Applied Geophysics*, 155, pp. 232–236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.06.019>.
- Sibson, R. H., Moore, J. Mc. M., Rankin, A. H. 1975. Seismic pumping – a hydrothermal fluid transport mechanism. *Journal of the Geological Society*, 131(6), pp. 653–659. DOI: <https://doi.org/10.1144/gsjgs.131.6.0653>.

#### Сведения об авторе

**Далатказин Тимур Шавкатович** – ул. Мамина-Сибиряка, 58, г. Екатеринбург, Россия, 620075;  
Институт горного дела УрО РАН, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник;  
e-mail: 9043846175@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2727-5405>

**Timur Sh. Dalatkazin** – 58 Mamina-Sibiryaka Str., Yekaterinburg, Russia, 620075;  
Institute of Mining of Ural Branch of RAS, Cand. Sci. (Engineering), Senior Research Scientist;  
e-mail: 9043846175@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2727-5405>