

Зональность и связь радонометрической активности разломов и газоносности углей Донбасса

©2024 А. В. Анциферов, Л. А. Иванов, И. Ю. Николаев[✉]

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела» (РАНИМИ)
ул. Челюскинцев, 291, 243001, Донецк, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: вблизи разломов, по которым проводятся границы полей угольных шахт, формируются мощные, незначительные по протяженности и относительно изолированные газосодержащие коллекторы, которые по своим фильтрационным свойствам приближаются, а иногда и превосходят коллекторы известных газовых месторождений. Дегазация метана в них компенсируется глубинным подтоком газа по геодинамически активным фрагментам разломов. Такие образования рассматриваются как аномальные скопления метана, приуроченные к зонам динамического влияния разломов. Изучение подобных скоплений в межскважинном пространстве, а также текущего напряженно-деформированного состояния верхнего горизонта массива горных пород, выявление геодинамически активных зон возможно с применением радонометрических исследований.

Методика: на поле шахты «Калиновская-Восточная» Донецко-Макеевского угленосного района проведена профильная эманационная съемка для изучения текущего напряженно-деформированного состояния верхнего горизонта массива горных пород и выявления геодинамических зон влияния разломов. Исследовалось раздельное содержание радона и торона в почвенном воздухе с помощью сцинтилляционного эманометра «Радон» на участке сопряжения надвигов Тимошенко и Французского. Рассчитаны значения концентрации радона и торона в почвенном воздухе, радон-торонового отношения и коэффициента контрастности аномалий. Проведено попластовое выделение аномалий газоносности углей.

Результаты и обсуждение: построены графики изменения значений концентрации радона и торона, радон-торонового отношения по профилям. Выделены участки повышенных и пониженных значений концентрации радона и торона. Построены карты распределения значений концентрации радона и торона, радон-торонового отношения и коэффициента контрастности аномалий. Выделены зоны сжатия с низкой активностью разлома, которые характеризуются низкими значениями содержания радона, радон-торонового отношения, коэффициента контрастности аномалий и высоким значением содержания торона. Условие сжатия подтверждается повышенной газоносностью угольных пластов, обусловленной аномально высоким пластовым давлением в углепородном массиве.

Заключение: на территории исследований выделяются участки высоких значений концентрации радона в совокупности с низким содержанием торона, высокими значениями радон-торонового отношения и высоким коэффициентом контрастности аномалий, которые являются геодинамическими зонами растяжения активного крупного разрывного нарушения. Участки низких значений концентрации радона, радон-торонового отношения и коэффициента контрастности в совокупности с высокими значениями концентрации торона соответствуют зонам сжатия с низкой геодинамической активностью. Зона положительных аномалий газоносности в районе смыкания на земной



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Николаев Иван Юрьевич, e-mail: nikolaevoeqi@yandex.ru

поверхности Французского надвига и надвига Тимошенко сочетается с радонометрической зоной сжатия. Аномально высокое давление газа в угольных пластах, определяемое по уровню газоносности углей, связано с областью сжатия, выделяемой по данным радонометрии.

Ключевые слова: радонометрия, газоносность, аномальные скопления метана, эманации, разломы.

Источник финансирования: Работа выполнена в рамках научной темы FRSR-2023-0007 «Разработка геолого-геофизической модели формирования аномальных скоплений метана на угольных шахтах в зонах динамического влияния разломов».

Для цитирования: Анциферов А. В., Иванов Л. А., Николаев И. Ю. Зональность и связь радонометрической активности разломов и газоносности углей Донбасса // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 4. С. 4–16. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/4-16>

Введение

По мере приближения к зонам тектонических структур, которые тяготеют к глубинным разломам, происходит закономерное возрастание концентрации газов и тяжелых углеводородов, а сами разломы при этом являются путями миграции в углепородный массив горючих газов термогенного происхождения и газов, близких к эндогенному генезису из более глубоких слоёв земной коры [1]. При этом вблизи разломов, по которым проводятся границы полей угольных шахт, формируются мощные, незначительные по протяженности и относительно изолированные газосодержащие коллекторы, которые по своим фильтрационным свойствам приближаются, а иногда и превосходят коллекторы известных газовых месторождений. Процесс текущей дегазации в них компенсируется глубинным подтоком газа по геодинамически активным фрагментам разломов. Такие образования рассматриваются как аномальные скопления метана, приуроченные к зонам динамического влияния разломов.

Вскрытие аномальных скоплений метана горными выработками происходит неожиданно, сопровождается выбросами газа и человеческими жертвами. Выявление данных скоплений является сложным вопросом, поскольку они из-за небольших размеров остаются пропущенными в ходе различных стадий геологической разведки. Независимо от эффективности геологических методов, ни один из них не позволяет выявить аномальное скопление метана, если оно локализовано в межскважинном пространстве.

Радонометрия (эманационная съемка) успешно решает задачи изучения текущего напряженно-деформированного состояния верхнего горизонта массива горных пород и позволяет выявлять геодинамически активные зоны (ГДЗ). При этом по тектонофизическим представлениям автохтонное эманирование приповерхностного слоя является чувствительным индикатором изменения напряженно-деформированного состояния в углепородном массиве [2, 3]. Измерения концентраций эманаций в почвенном воздухе позволяют выявить и проследить по простиранию ГДЗ различного типа, а также расшифровать их структуру, её изменчивость, геодинамическую и сейсмическую активность разломов [4, 5].

На шахтных полях Донбасса радонометрия используется для картирования выходов разрывных нару-

шений под покровные отложения, определения изменения напряженного состояния разломов по простиранию и во времени, а также прогнозирования землетрясений, горных ударов, исследований геодинамической обстановки на гидротехнических сооружениях.

Методы радонометрии условно разделяются на две основные группы: ручные методы и автоматизированные. К первой группе можно отнести эманационно-трековый метод изучения радона.

Так, в рамках геолого-геофизических исследований влияния геодинамической активности разрывных нарушений Донбасса на безопасность ведения горных работ на Котлинском надвиге в зоне влияния подработанного массива и за его пределами по данным нивелирования второго класса установлена современная геодинамическая активность надвига [6]. Она проявляется в случайном и периодическом изменении превышений между соседними пикетами с периодом 1–3 часа. Установлено, что относительно приподнятого крыла опущенное крыло, расположенное вблизи мульды сдвижения, в течение года опустилось на 55 мм, а зона нарушенных пород надвига выдавилась вверх на 21 мм. По данным эманационно-трекового метода установлено, что за пределами подработанного массива активность надвига возрастает по простиранию, а ширина области возмущения при этом уменьшается, тогда как в зоне подработки массива активность надвига практически не проявляется. Результаты эманационно-трекового метода подтверждены данными независимых измерений методом естественного импульсного электромагнитного поля Земли и методом сейсмоакустической эмиссии. Полученные результаты указали на существование короткопериодической активности разрывного нарушения.

Для получения более достоверных результатов можно использовать полу-автоматизированный метод радонометрии по схеме вынужденной конвекции. Одно из главных преимуществ метода вынужденной конвекции перед диффузионным – увеличение эффективного объема исследуемых горных пород, т.е. нивелируются существующие неоднородности геологического разреза. Радиус эффективной зоны сбора радона составляет около 700 мм. Это позволяет увеличить чувствительность метода измерений.

Так, для прогнозирования структурно-геологических нарушений углепородного массива и зон, небезо-

пасных по выделению метана, на поле шахты «Южно-Донбасская № 3» в зоне влияния Придолинного сброса были проведены радонометрические исследования по схеме вынужденной конвекции с помощью эманометра ЭМ-6М «Радон», успешное применение которого в сложных условиях Донбасса имеет многолетний опыт. Профильные наблюдения позволили выделить геодинамическую зону, отвечающую Придолинному сбросу, со средними и повышенными значениями суммарной концентрации радиоактивных газов при относительно невысоком радон-тороновом отношении, что относится к категории средней активности.

Целью данной статьи является установление зонального изменения радонометрической активности разломов в связи с аномальным проявлением газоносности угольных пластов на примере участка сочленения двух региональных надвигов Тимошенко и Французского в Донецком угольном бассейне.

Методика

Радонометрия заключается в выявлении ореолов радиоактивных эманаций в почвенном воздухе. Сущность эманационных поисков состоит в отборе проб почвенного воздуха из рыхлых отложений и измерении концентраций в них радона и торона. Съемка выполняется с помощью сцинтилляционных полевых модернизированных эманометров «Радон». Проведение работ сводится к бурению шпуров глубиной 900 мм, отбору из них проб почвенного воздуха с помощью конусного пробоотборника и вакуумного насоса, и раздельному определению содержаний радона и торона. Величина ионизационного тока, измеренная за первую экспозицию, характеризует суммарный ионизационный эффект от радона и торона. Второе измерение характеризует концентрацию радона. Для оценки качества съемки в соответствии с требованиями действующих нормативных документов выполняется 10 % контрольных наблюдений по отрезкам профилей.

На участке были заложены профили исследований вкрест простирания основных разрывных нарушений с учетом доступности и возможности проведения измерений на местности. Учитывая характер поставленной задачи и сложную тектоническую обстановку, представленную на рисунке 1, расстояние между точками измерений принято равным 25 м. Увеличение расстояния между точками измерений может привести к потере ценной информации, уменьшение – к неоправданному увеличению трудозатрат и повышению стоимости изысканий. Расстояние между профилями составило 100 м.

С целью исключения возможной суточной трендовой составляющей поведения поля эманаций был заложен контрольный пункт на участке исследований. Здесь в одной и той же скважине проводились измерения объемной активности радона в течение рабочего дня каждые 30 минут при солнечной и безветренной погоде. Результаты полевых измерений на контрольном пункте показали, что за шесть дней значения концентрации радона в скважине контрольного пункта в

течение рабочего дня при размахе от 0.5 до 10.0 эман в среднем составляют от 2 до 6 эман, что соответствует фоновому показателю для Донбасса [3].

Первичная и дальнейшая обработка материалов полевых исследований проводится в соответствии с методическими рекомендациями [3]. На первом этапе вводятся поправки за натуральный фон камеры эманометра и импульсы переводятся в эманы:

$$J_1 = A \cdot (J_{01} - J_f), \quad (1)$$

$$J_2 = A \cdot (J_{02} - J_f), \quad (2)$$

где J_1 – суммарное значение ионизационного тока от концентраций радона и торона, эман;

J_2 – суммарное значение ионизационного тока от концентраций радона, торона и продуктов распада радона через одну минуту после начала измерений радиоактивного распада пробы почвенного воздуха, эман;

A – коэффициент пересчета импульсов в эманы (для Донбасса равен 2);

J_{01} – первый отсчет, импульс;

J_{02} – второй отсчет, импульс;

J_f – остаточный фон рабочей камеры после продувки атмосферным воздухом, импульс.

Концентрация радона находится по формуле:

$$C_{Rn} = 0.5 \cdot (2.5 \cdot J_2 - J_1), \quad (3)$$

где C_{Rn} – концентрация радона, эман.

Концентрация торона находится по формуле:

$$C_{Tn} = J_1 - C_{Rn}, \quad (4)$$

где C_{Tn} – концентрация торона.

Радон-тороновое соотношение K , являющееся важным при геолого-геофизической интерпретации материалов радонометрической съемки, рассчитывается как:

$$K = C_{Rn}/C_{Tn}. \quad (5)$$

Коэффициент контрастности аномалий определяется как отношение значений эманационного поля в аномальной области к фоновым значениям, зафиксированным на профиле. Данный коэффициент указывает на характер активизации горного массива.

За основу интерпретации результатов радонометрии принята модель, предложенная в работе [7]. В соответствии с этой моделью при сжатии трещиновато-пористой породы значение показателя C_{Rn} незначительно увеличивается, затем существенно уменьшается и достигает своего минимума (рис. 2). Указанное увеличение происходит за счет отжатия газа из закрывающихся трещин, а последующее уменьшение – за счет закрытия трещин и потери проницаемости. При растяжении породы на начальном этапе происходит некоторое уменьшение показателя C_{Rn} за счет увеличения объема трещин. Последующее растяжение приводит к раскрытию трещин и, как следствие, к увеличению проницаемости и показателя C_{Rn} . Разрушение породы, обусловленное сжатием или растяжением, сопровождается увеличением показателя C_{Rn} . При перманентной упругой деформации в условиях сжатия и растяжения происходит соответственно уменьшение и увеличение показателя C_{Rn} .

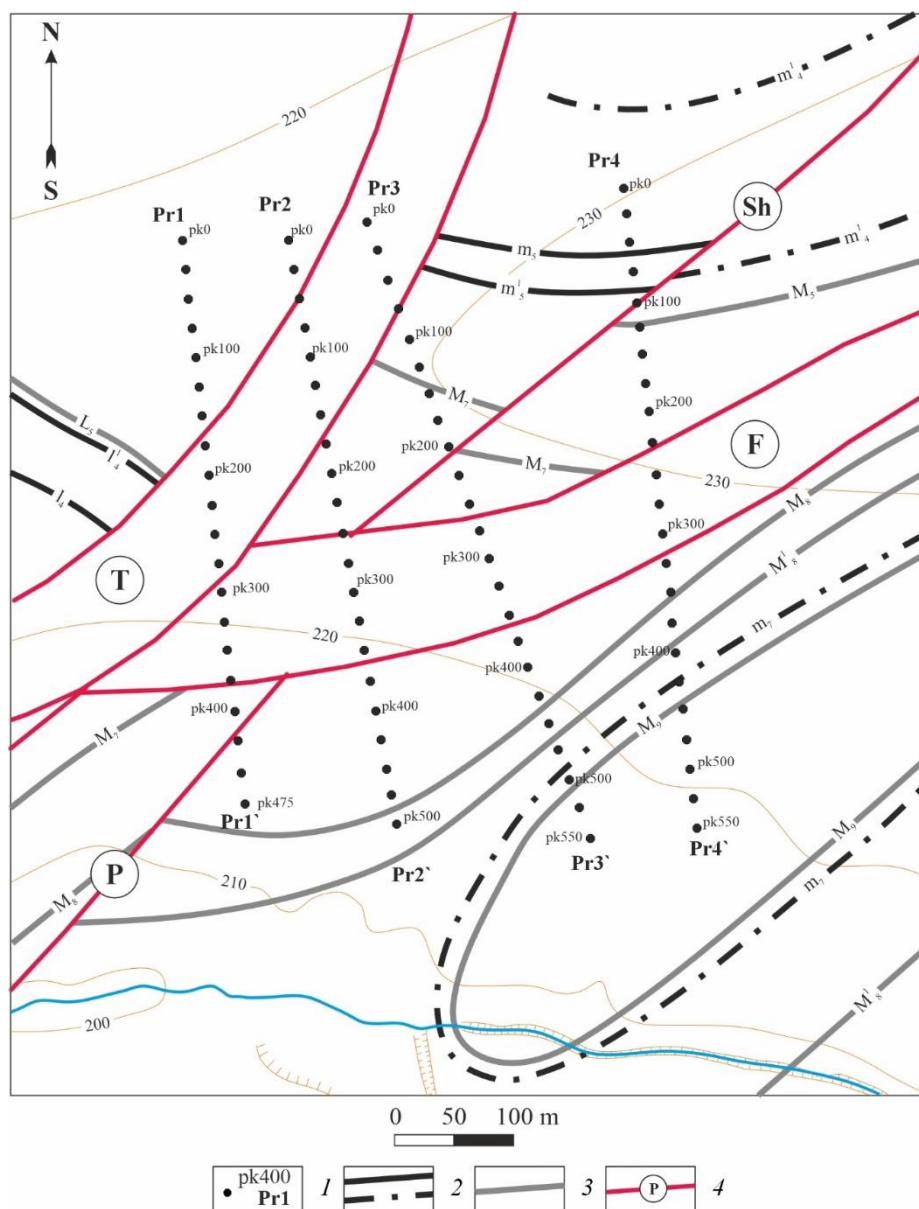


Рис. 1. Карта фактического материала радонометрических исследований на участке поля шахты «Калиновская Восточная»: 1 – пункт радонометрии, его наименование, профиль; 2 – угольный пласт, рабочей и нерабочей мощности; 3 – известняк; 4 – надвиги: P – Промежуточный, Sh – Шахтный, T – Тимошенко, F – Французский.

[Fig. 1. Map of the actual material of radonometric studies in the field area of the «Kalinovskaya-Vostochnaya» mine: (1) – radonometry point, its name, profile; (2) – coal seam, working and non-working thickness; (3) – limestone; (4) – overthrusts: P – Promezhtuchnyy, Sh – Shakhtniy, T – Timoshenko, F – Frantczusky.]

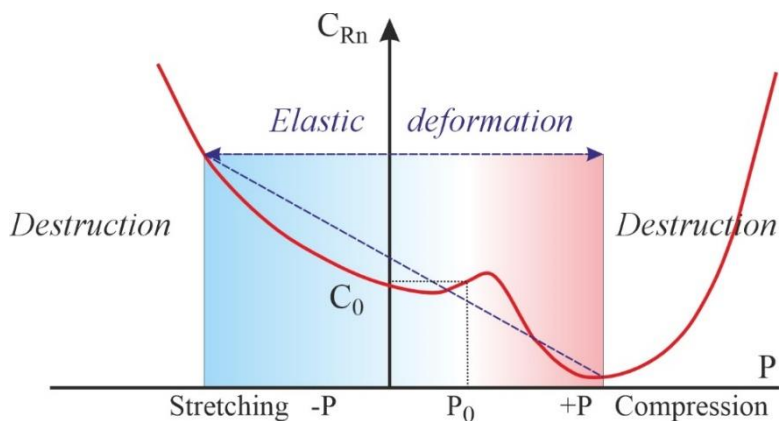


Рис. 2. Изменение концентрации радона в трещиновато-пористой породе при изменении внешней нагрузки по данным [7].

[Fig. 2. Change of radon concentration in fractured-porous rock at change of external load according to data [7].]

На основе данной модели по изменению показателя C_{Rn} на шахтном поле выделяются два типа аномалий и соответствующие им типы напряженного состояния:

- а) отрицательные аномалии и условия сжатия;
- б) положительные аномалии и условия растяжения.

Аномалии газоносности угольных пластов выявляются при помощи геолого-геофизической системы оценки газоносности, разработанной в РАНМИ [8, 9]. В соответствии с данной системой определяется вклад в величину газоносности геолого-генетических и термодинамических факторов. Для клареновых углей, характеризующихся практически одинаковым мацериальным составом, геолого-генетические факторы представлены показателями степени метаморфизма (Пм) и восстановленности (Пв) [10]. Учитывая тесную корреляцию давления, температуры и глубины последняя используется как обобщенный термодинамический показатель. Показатели Пм и Пв устанавливаются по выходу летучих веществ (V^{daf}) и толщине пластического слоя (Y) беззолых (зольность до 10 %) углей, используя классификационную диаграмму клареновых углей Донбасса [11]. По показателям Пм и Пв определялась

газоносность угля для условия зоны стабилизации, т.е. для глубины 1000 м и более. Приведение данной величины к фактической глубине залегания пласта выполнялось по зависимостям газоносности угля от глубины пласта для известной величины газоносности в зоне стабилизации [12, 13]. В результате расчетов определялась величина газоносности угля, соответствующая показателям Пм и Пв при фоновых значениях температуры и давления газа. Существенное отличие расчетной и фактической газоносности интерпретировалось как влияние аномально высокого или аномально низкого пластового давления на газоносность угля.

Результаты и обсуждение

На рисунках 3 и 4 представлены результаты исследования по четырем профилям. По профилю 1 установлен низкий уровень значений показателей C_{Rn} и C_{Tn} , не превышающей соответственно 5 и 18 эман. Выявлено, что графики изменения показателей C_{Rn} и C_{Tn} находятся в противофазе. Выделяются две большие комплексные аномалии, состоящие из положительных аномалий показателей C_{Rn} , К и отрицательной аномалии C_{Tn} .

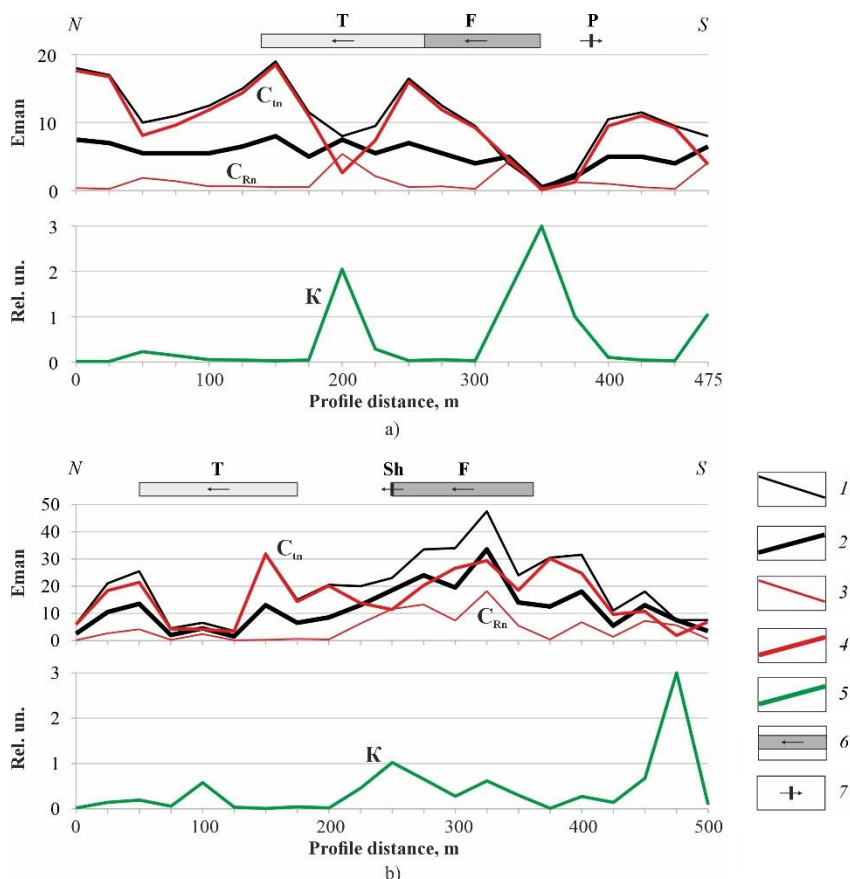


Рис. 3. Результаты радонометрии по профилю 1 (а) и профилю 2 (б): 1 – суммарные значения ионизационного тока от концентраций радона и торона; 2 – суммарные значения ионизационного тока от концентраций радона, торона и продуктов распада радона; 3 – значения концентрации радона (C_{Rn}); 4 – значения концентрации торона (C_{Tn}); 5 – значения радон-торонового отношения (К); 6 – зона деструкции крупного разрывного нарушения, направление его падения; 7 – линия выхода под наносы разрывного нарушения, направление его падения.

[Fig. 3. Results of radonometry along profile (1) (a) and profile (2) (b): (1) – total ionisation current values from radon and thoron concentrations; (2) – total ionisation current values from radon, thoron and radon decay products concentrations; (3) – radon concentration values (C_{Rn}); (4) – thoron concentration values (C_{Tn}); (5) – radon-thoron ratio values (K); (6) – destruction zone of a large discontinuity, its dip direction; (7) – line of the discontinuity outcrop, its dip direction.]

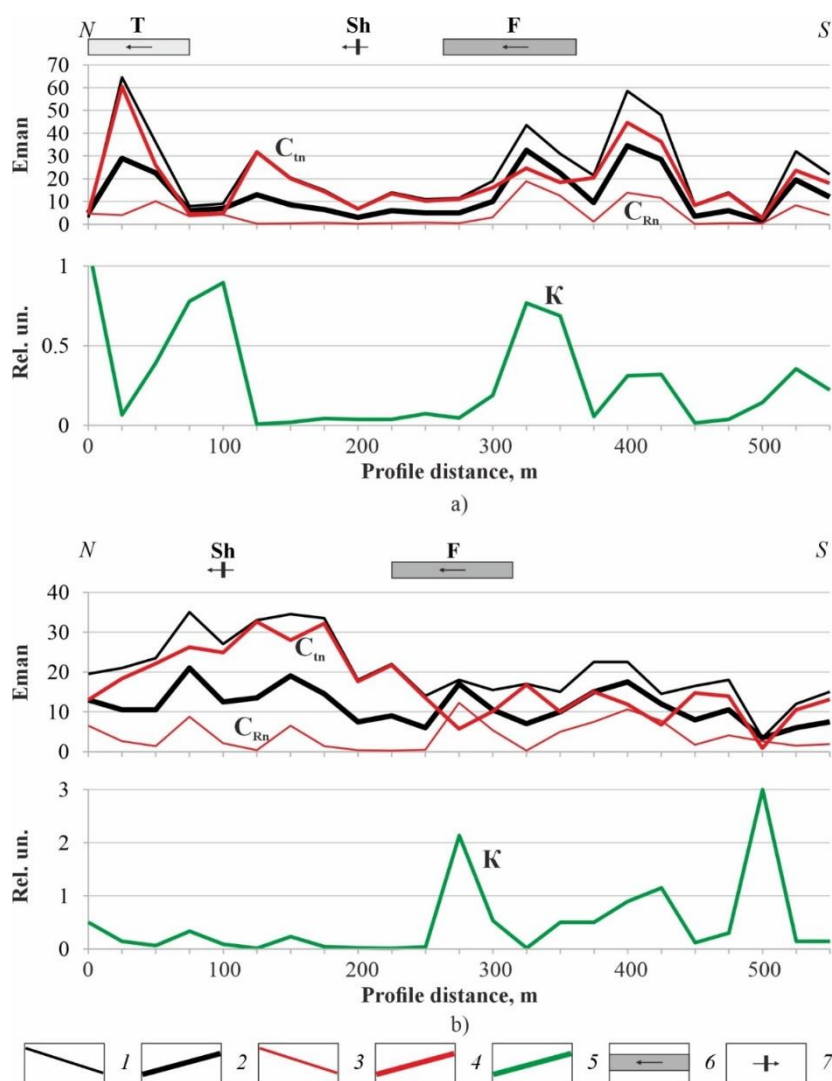


Рис. 4. Результаты радонометрии по профилю 3 (а) и профилю 4 (б): 1 – суммарные значения ионизационного тока от концентраций радона и торона; 2 – суммарные значения ионизационного тока от концентраций радона, торона и продуктов распада радона; 3 – значения концентрации радона (C_{Rn}); 4 – значения концентрации торона (C_{Tn}); 5 – значения радон-торонового отношения (K); 6 – зона деструкции крупного разрывного нарушения, направление его падения; 7 – линия выхода под наносы разрывного нарушения, направление его падения.

[Fig. 4. Results of radonometry along profile 3 (a) and profile 4 (b): (1) – total ionisation current values from radon and thoron concentrations; (2) – total ionisation current values from radon, thoron and radon decay products concentrations; (3) – radon concentration values (C_{Rn}); (4) – thoron concentration values (C_{Tn}); (5) – radon-thoron ratio values (K); (6) – destruction zone of a large discontinuity, its dip direction; (7) – line of the discontinuity outcrop, its dip direction.]

Вторая аномалия соответствует всяческому крылу и частично зоне деструкции Французского надвига. На границе зоны деструкции надвига Тимошенко показатель C_{Tn} характеризуется максимальными значениями. Следовательно, на данном профиле, где смыкаются надвиги Тимошенко и Французский, зоны их деструкции проявляются в небольших положительных аномалиях показателя C_{Rn} , в больших отрицательных аномалиях показателя C_{Tn} и в значимых положительных аномалиях показателя K .

На профиле 2 уровень значений показателей C_{Rn} и C_{Tn} становится сравнительно большим и достигает соответственно 18 и 30 эман. Показатель K варьирует от 0 до 3 отн. ед. По отрицательным аномалиям показателей C_{Rn} и C_{Tn} и небольшой положительной аномалии показателя K выделяется центральная часть зоны деструкции надвига Тимошенко. На границах данной зоны образуются отчетливые положительные аномалии показателей C_{Rn} и C_{Tn} .

Зона деструкции Французского надвига в отличие от Тимошенко выделяется по положительным аномалиям показателей C_{Rn} и C_{Tn} . При этом изменение

показателя K не позволяет выделить данный надвиг. Следовательно, на профиле 2 зона деструкции Французского надвига, как и на профиле 1, выделяется по положительной аномалии показателя C_{Rn} . Однако, в отличие от профиля 1, данная зона выделяется по положительной аномалии показателя C_{Tn} . Иную характеристику имеет надвиг Тимошенко. На профиле 2 зона его деструкции выделяется по отрицательным аномалиям показателей C_{Rn} и C_{Tn} и по их положительным аномалиям на границах данной зоны. Следует отметить, что показатель K в данном случае является слабо информативным при выделении разрывных нарушений.

Профиль 3 характеризуется сравнительно высоким уровнем значений показателей C_{Rn} и C_{Tn} , достигающих соответственно 20 и 60 эман. Как на профиле 2, фазы изменения данных показателей совпадают.

При этом образуется максимальное количество аномалий: пять положительных и четыре отрицательных. Зона деструкции Французского надвига выделяется, как на профиле 2, по положительным аномалиям показателей C_{Rn} и C_{Tn} , а также по положительной

аномалии показателя К. В зону деструкции надвига Тимошенко попадают две аномалии: положительная вблизи висячего крыла и отрицательная около лежащего крыла. Следует отметить, что выделение зон деструкции надвигов по аномалиям показателей C_{Rn} и C_{Tn} , характеризуется неоднозначностью, поскольку вне зон влияния надвигов в южной части профиля выделяются подобные аномалии. Возможно, они указывают на не выявленные в ходе геологической разведки разрывные нарушения.

Профиль 4 пересекает лишь зону деструкции Французского надвига. Данная зона выделяется по положительным аномалиям показателей C_{Rn} , К и отрицательной аномалии показателя C_{Tn} . Однако такая же аномалия по показателю К в комплексе с отрицательными аномалиями по показателям C_{Rn} и C_{Tn} выделяется за пределами разрывных нарушений.

Рисунки 5 и 6 отражают латеральное изменение показателей C_{Rn} , C_{Tn} , К и коэффициента контрастности. Анализ данных рисунков показывает, что аномалии рассматриваемых показателей не приурочены сугубо к зонам деструкции надвигов, а охватывают соседние разломы и пространство между ними. Наиболее протяженная аномалия охватывает два региональных разлома (надвиги Тимошенко и Французский) и один небольшой разлом (надвиг Шахтный). Длина аномалии составляет 500 м, ширина – около 150 м. Данная аномалия показывает, что области динамического влияния соседних разломов, расположенных на расстоянии от 0 до 500 м, сливаются в одну область. При этом аномалии являются общими для различных элементов разлома: для зоны деструкции и прилегающих крыльев. Поэтому выделить сместитель по такой аномалии не представляется возможным.

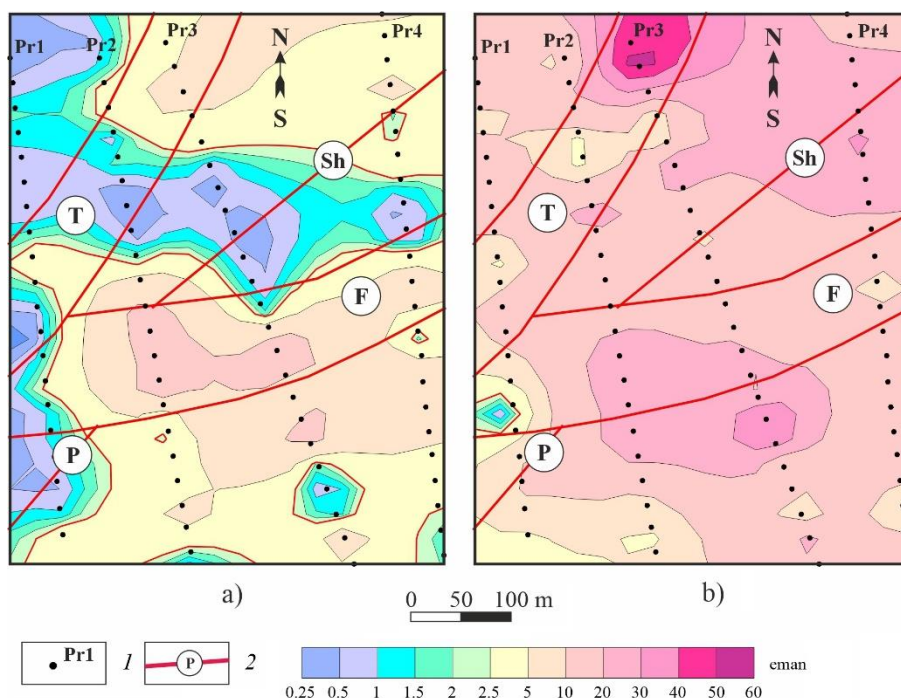


Рис. 5. Распределение значений концентрации радона (а) и торона (б) на участке радонометрических исследований: 1 – пункт радонометрии, профиль; 2 – надвиги: P – Промежуточный, Sh – Шахтный, T – Тимошенко, F – Французский.

[Fig. 5. Distribution of radon (a) and thoron (b) concentration values at the radonometric survey site: (1) – radonometry point, its name, profile; (2) – overthrusts: P – Promezhutochniy, Sh – Shakhtniy, T – Timoshenko, F – Frantczuskiy.]

Коэффициент контрастности аномалий по простиранию надвига Тимошенко изменяется волнообразно от 0.5 до 3.0 отн. ед. и в среднем составляет 1.5 отн. ед. Французский надвиг характеризуется сравнительно большим средним значением (2.0 отн. ед.) и также волнообразным изменением в диапазоне от 1.3 до 4.0 отн. ед. Коэффициент контрастности аномалий указывает на большую геодинамическую активность надвига Тимошенко по сравнению с Французским надвигом, а также на изменчивость активности по простиранию данных разломов с шагом от 100 до 200 м.

Результаты интерпретации радонометрических исследований зоны динамического влияния разломов в понятиях напряженного состояния представлены на рисунке 7. На исследуемом шахтном поле выделяются три участка, образуемые надвигами Тимошенко и Французского: их пересечение и удаленные от него фрагменты. Данные участки существенно отличаются по напряжен-

ному состоянию. Пересечение надвигов представляет собой I зону сжатия протяженностью около 200 м и видимой шириной 50 м. Фрагмент надвига Тимошенко характеризуется чередованием зон сжатия и растяжения. Выделяются III зона сжатия, II и IV зоны растяжения, простирающиеся почти перпендикулярно к сместителю. Ширина зон в пределах надвига составляет от 100 до 200 м. Французский надвиг, в отличие от Тимошенко, представлен одной IV зоной растяжения, простирающейся по сместителю на протяжении 450 м.

Исходные данные для выделения зон сжатия и растяжения получены из подпочвенного слоя и поэтому возникает вопрос о глубинности метода радонометрии на исследуемом участке. Для решения данного вопроса использованы результаты выделения положительных и отрицательных аномалий газоносности по 12 угольным пластам, залегающим в интервале глубин от 200 до 1200 м.

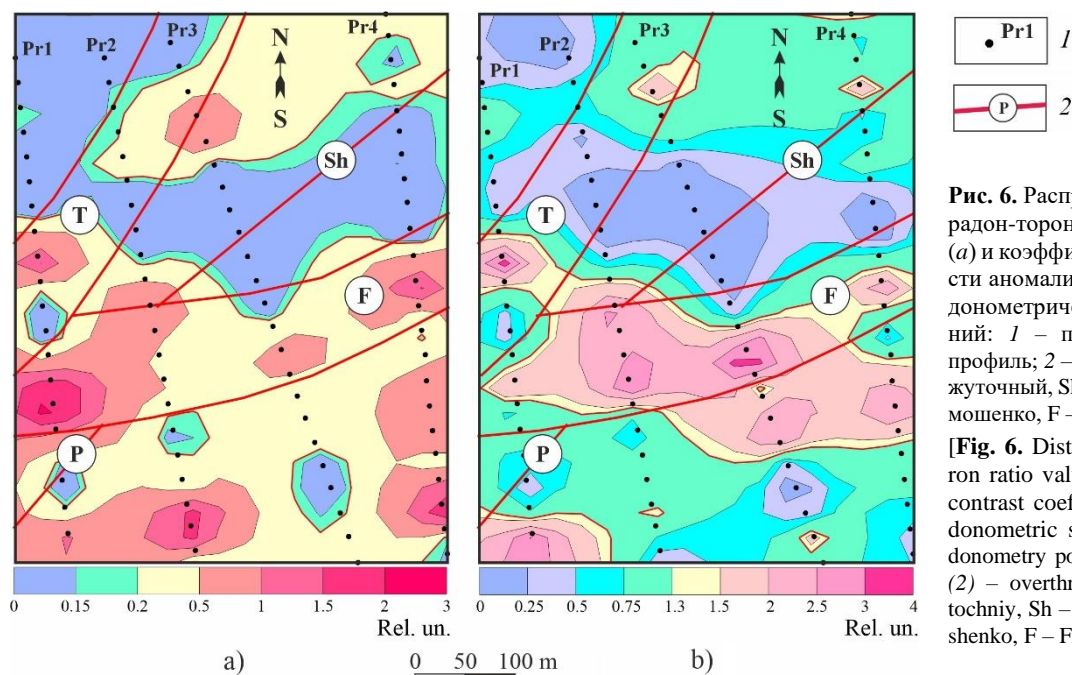


Рис. 6. Распределение значений радон-торонового отношения (а) и коэффициента контрастности аномалий (б) на участке радонометрических исследований: 1 – пункт радонометрии, профиль; 2 – надвиги: Р – Промежуточный, Sh – Шахтный, Т – Тимошенко, F – Французский.

[Fig. 6. Distribution of radon-toron ratio values (a) and anomaly contrast coefficient (b) at the radonometric survey site: (1) – radonometry point, its name, profile; (2) – overthrusts: P – Promezhutochniy, Sh – Shakhtniy, T – Timoshenko, F – Frantczusky.]

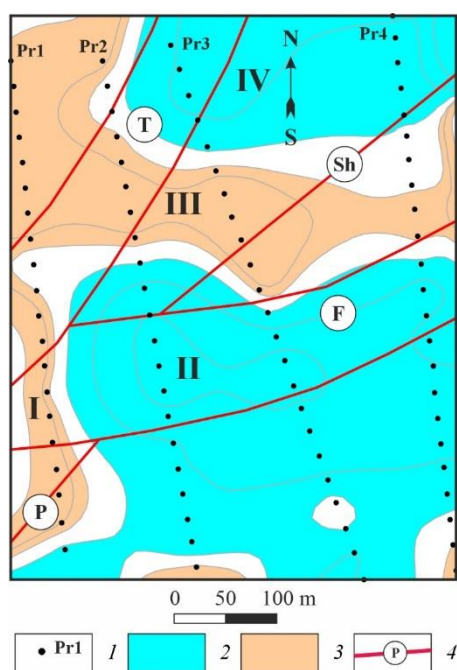


Рис. 7. Напряженное состояние области динамического влияния надвигов Тимошенко и Французского на поле шахты «Калиновская Восточная»: 1 – геофизические профили; 2 – зоны растяжения; 3 – зоны сжатия; 4 – надвиги (Т – Тимошенко, F – Французский, P – Промежуточный, Sh – Шахтный); I-IV – номера зон сжатия и растяжения.

[Fig. 7. Stress state of the area of dynamic influence of Timoshenko and Frantczusky thrusts in the field of «Kalinovskaya Vostochnaya» mine: (1) – geophysical profiles; (2) – stretching zones; (3) – compression zones; (4) – overthrusts (T – Timoshenko, F – Frantczusky, P – Promezhutochniy, Sh – Shakhtniy); I-IV – numbers of compression and stretching zones.]

В ходе исследования установлены общие черты распределения аномалий и выполнена их увязка со структурно-геологическим строением шахтного поля и дан-

ными радонометрии. Основной чертой аномалий является их пространственное группирование, т.е. в пределах зоны образуется несколько аномалий определенного (положительного или отрицательного) знака. Такие аномалии являются многопластовыми. Их расположение контролируется осью синклинали и надвигами, т.е. участками образования тектонической трещиноватости. На шахтном поле выделяются три зоны положительных и одна зона отрицательных аномалий (рис. 8).

I зона положительных аномалий располагается на юге шахтного поля, где северо-восточное простирание Итальянского надвига изменяется субширотное. Зона состоит из аномалий по пластам k_8 , l_3 и l_4 .

II зона положительных аномалий находится на юге шахтного поля и занимает место вблизи оси Макеевской синклинали и ее пересечения с субширотным фрагментом Итальянского надвига. Зона объединяет аномалии по пластам k_5 , k_8 , l_1 , l_3 .

III зона положительных аномалий находится на севере шахтного поля. Она располагается вблизи оси Макеевской синклинали, параллельного ей Каменскому надвигу, а также вблизи надвигов «S» и № 10, которые пересекают ось синклинали. Зона объединяет аномалии по угольным пластам k_6^H (два случая), k_8 , l_4 , l_8^1 (три случая), m_3 .

IV зона состоит из отрицательных аномалий по пластам k_5^1 , k_8 , l_1^1 . Находится в пределах западного примыкания к оси Макеевской синклинали.

Совместный анализ распространения зон радонометрической активности и зон аномалий газоносности угольных пластов показывает, что III зона положительных аномалий газоносности, прослеживаемая в широком стратиграфическом диапазоне (свиты C_2^5 , C_2^6 , C_2^7) на земной поверхности пересекается с I радонометрической зоной сжатия активного крупного разрывного нарушения.

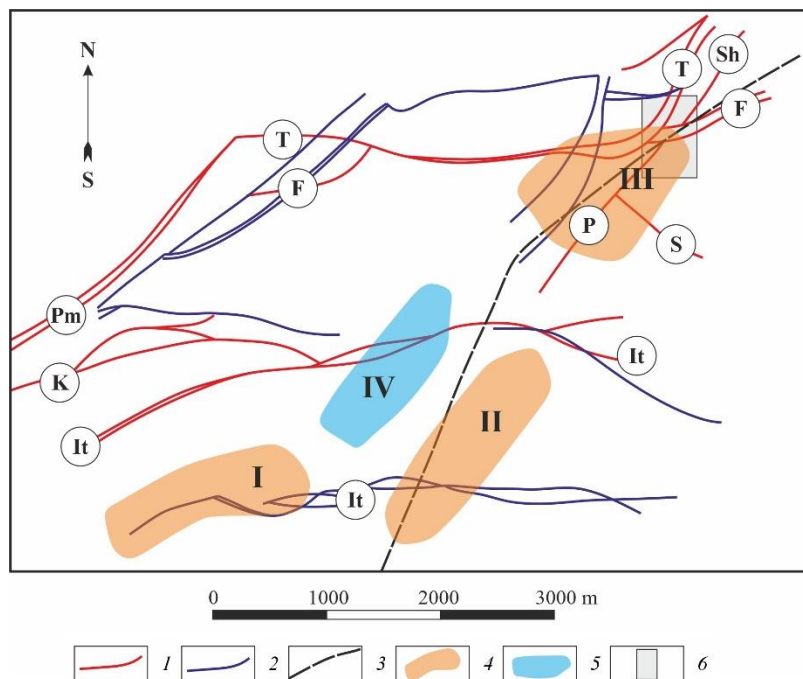


Рис. 8. Зональное распределение аномалий газоносности угольных пластов, приведенной к зоне стабилизации, на поле шахты «Калиновская Восточная»: 1 – разломы на уровне земной поверхности; 2 – разломы на уровне угольного пласта k_8 ; 3 – ось Макеевской синклинали; 4 – зона положительных аномалий; 5 – зона отрицательных аномалий; 6 – участок радонометрических исследований. Надвиги: Pm – Первомайский; Т – Тимошенко; F – Французский; К – Калиновский; It – Итальянский; P – Промежуточный; S – «S»; Sh – Шахтный. I-IV – номера зон многопластовых аномалий газоносности.

[**Fig. 8.** Zonal distribution of anomalies of coal seam gas content, reduced to the stabilisation zone, in the field of «Kalinovskaya-Vostochnaya» mine: (1) – faults at the ground surface level; (2) – faults at the level of coal seam k_8 ; (3) – axis of Makeevskaya syncline; (4) – zone of positive anomalies; (5) – zone of negative anomalies; (6) – area of radonometric studies. Overthrusts: Pm – Pervomaysky; T – Timoshenko; F – Frantczusky; K – Kalinovskiy; It – Italiansky; P – Promezhutochniy; S – «S»; Sh – Shakhtniy. I-IV – numbers of zones of multilayer anomalies of gas content.]

Наложение указанных зон происходит на участке смыкания надвига Тимошенко и Французского надвига на земной поверхности. Из данного соотношения зон следует, что аномально высокое давление газа, обусловившее образование положительных аномалий газоносности угольных пластов, связано с областью сжатия, выделяемой по низким значениям содержания радона в подпочвенном слое. Глубина распространения аномалий газоносности составляет от 380 до 1040 м. Исходя из глубины данных аномалий, глубинность метода радонометрии оценивается величиной не менее 400 м и, возможно, она достигает 1000 м.

В качестве обсуждения полученных результатов следует обратить внимание на неоднозначное поведение разломов по их простиранию. В случае низкого уровня значений показателя C_{Rn} знак его аномалии совпадает с C_{Th} (профиль 1), тогда как при высоких значениях показателя C_{Rn} (профили 2, 3, 4) знаки данных аномалий могут как совпадать, так и не совпадать. Зоны деструкции надвигов выделяются по аномалиям рассматриваемых показателей, однако не все аномалии подтверждаются разломами. В этом проявляется неоднозначность выделения разломов по данным радонометрии. Рассматриваемая неоднозначность обусловлена широким варьированием напряженного состояния разлома от условия сжатия до растяжения. Поэтому определение местоположения разлома требует

подтверждения методами разведочной геофизики.

Наиболее отчетливо по показателю C_{Rn} выделяются широкие зоны деструкции разрывных нарушений. При этом они характеризуются как положительными, так и отрицательными аномалиями. Объяснение различного знака аномалий заключается в чередовании по простиранию разлома областей сжатия и растяжения, обусловленных современными движениями земной поверхности, а также соответствующей реакцией радонового поля на сжатие и растяжение.

Результаты исследований современных тектонических движений свидетельствуют, что активность разрывных нарушений на порядок больше участков, где их нет. Кроме этого, геодинамическая активность разрывных нарушений является разнонаправленной и может изменяться во времени с периодом более одного месяца, а в пространстве ограничиваться участками размером около 100 м [14]. Отметим, что в полном соответствии с указанной величиной находится ширина зон сжатия и растяжения в пределах надвигов Тимошенко и Французского. Результаты по данным надвигам доказывают существование общего механизма дробления земной коры под влиянием тектонических сил.

В целом мозаичный характер пространственного распределения зон сжатия и растяжения, выявленный на исследуемом участке, является обычным атрибутом зоны динамического влияния разлома. Об этом свиде-

тельствуют результаты исследования радоновой и геодинамической активности разломов земной коры за пределами Донбасса [15]. В соответствии с этими данными увеличение показателя C_{Rn} обусловлено увеличением вклада растяжения в динамической обстановке и усилением сейсмичной активности, а также приуроченностью к узким участкам концентрации дизъюнктивов вдоль главного сместителя. На основе этих данных распространение зон сжатия и растяжения по надвигам Тимошенко и Французского определяется различным вкладом растяжения в динамической обстановке исследуемого участка.

Следует отметить, что чередование зон сжатия и растяжения, простирающихся перпендикулярно сместителю, соответствует субмеридиональному фрагменту надвига Тимошенко, тогда как единая зона растяжения – субширотному фрагменту Французского надвига. Распределение зон сжатия и растяжения обусловлено напряженным состоянием Донбасса. Для альпийского (последнего) этапа тектонического развития установлена сдвиговая обстановка с субмеридиональным направлением оси максимального нормального напряжения [16]. В соответствии с этой обстановкой субмеридиональные нарушения должны характеризоваться открытой трещиноватостью и положительными аномалиями показателя C_{Rn} , а субширотные – закрытой трещиноватостью и отрицательными аномалиями [17]. Однако данные по радонометрии рассматриваемых надвигов лишь частично соответствуют этой схеме. Для субмеридионального фрагмента надвига присуща не отрицательная аномалия, а чередование отрицательных и положительных аномалий. Субширотный фрагмент надвига характеризуется не отрицательной, а слабо выраженной положительной аномалией данного показателя.

Отметим, что реальное распределение аномалий показателя C_{Rn} подтверждается аномалиями других радонометрических показателей и газоносности углей, что свидетельствует о достоверности полученных результатов. Поэтому из реального расположения зон сжатия и растяжения следует вывод: локальное поле современных напряжений на исследуемом участке отличается от регионального поля альпийских напряжений Донбасса. Данное отличие следует учитывать при исследовании напряженного состояния углепородного массива шахтного поля.

При решении вопроса о глубинности радонометрии обычно исходят из тектонофизического положения «подпочвенный радон – индикатор напряженно-деформированного состояния коренных пород» и выявления связи аномалий показателя C_{Rn} с элементами геологического строения и характеристиками горных выработок на определенных глубинах. При этом суждение о связи обычно базируется на пространственном совпадении рассматриваемых явлений [3]. Использование данных газоносности позволило установить глубинность показаний радонометрии не по пространственному совпадению, а на основании причинно-следственной связи. В данном случае изменение пока-

зателя C_{Rn} в подпочвенном слое и газоносности в углепородном массиве обусловлены общей причиной, которой является субвертикальная область сжатия.

Поэтому метод радонометрии может эффективно использоваться для выделения участков, в геологическом разрезе которых встречаются аномальные скопления метана.

Заключение

В ходе исследования зональности радонометрической активности разломов на участке поля шахты «Кашиновская Восточная» установлено:

1. На территории исследований выделяются участки высоких значений концентрации радона в совокупности с низким содержанием торона, высокими значениями радон-торонового отношения и высоким коэффициентом контрастности аномалии, которые являются геодинамическими зонами растяжения активного крупного разрывного нарушения. Участки низких значений концентрации радона, радон-торонового отношения и коэффициента контрастности в совокупности с высокими значениями концентрации торона соответствуют зонам сжатия с низкой геодинамической активностью.
 2. Геодинамическая зона растяжения активного крупного разрывного нарушения в северной части планшета соответствует субмеридиональному участку надвига Тимошенко.
 3. Участок пересечения надвига Тимошенко с Французским надвигом и субширотное продолжение последнего выделяется как геодинамическая зона сжатия активного крупного разрывного нарушения.
 4. Зоны сжатия с низкой геодинамической активностью соответствуют диагональным надвигам Промежуточному в южной части и Шахтному в северной части планшета.
 5. Выделены три положительные и одна отрицательная зоны многопластовых аномалий газоносности углей, контролируемые осью Макеевской синклинали, изгибом и субширотным фрагментом Итальянского надвига, Каменским надвигом, надвигами «S», № 10. Установлено, что зона положительных аномалий газоносности, прослеживаемая от свиты C_2^5 до C_2^7 , в районе смыкания на земной поверхности Французского надвига и надвига Тимошенко сочетается с радонометрической зоной сжатия.
 6. Аномально высокое давление газа в угольных пластах, определяемое по уровню газоносности углей, связано с областью сжатия, выделяемой по данным радонометрии.
 7. Полученные результаты позволяют использовать данные радонометрии и газоносности углей при выделении участков, благоприятных для формирования аномальных скоплений метана и соответственно для постановки геофизических работ по выявлению этих скоплений с целью дегазации до начала ведения работ по добычи угля.
- Конфликт интересов:* Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Л. А. Геологические показатели модели аномального скопления метана // *Труды РАНИМИ*. 2023. № 22 (37). С. 9–18.
2. Возжеников Г. С., Бельшев Ю. В. Радиометрия и ядерная геофизика. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. 305 с.
3. Рябоштан Ю. С. Методические рекомендации по структурно-геодинамическому картированию. Донецк: МУП СССР, ПО «Укруглегеология», 1988. 204 с.
4. Семинский К. Ж., Бобров А. А. Соотношение радоновой и сейсмической активности в Байкальской рифтовой зоне по данным эманационного мониторинга // *Геодинамика и тектонофизика*. 2024. Т. 15. Вып. 1. С. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0744>
5. Андреев А. И., Ковкин А. А., Медведева М. Б. Радон как индикатор сейсмогеодинамической активности // *Безопасность в техносфере*. 2011. № 5. С. 8–14.
6. Туманов В. В., Иванов Л. А., Савченко А. В., Мартынов Г. П., Богак М. Ю., Ялпуга Е. А. Геодинамические, горно-геологические и инженерно-геологические исследования геофизическими методами, проводимые в РАНИМИ // *Труды РАНИМИ*. 2019. № 8 (23). Ч. 2. С. 75–84.
7. Уткин В. И., Юрков А. К. Радон – надежный индикатор геодинамических процессов // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2009. № 1. Вып. 13. С. 165–169.
8. Иванов Л. А. Геолого-геофизическая система оценки газоносности угольных месторождений по связанному газу // *Труды РАНИМИ*. 2020. № 10–11 (25–26). С. 157–172.
9. Анциферов А. В., Туманов В. В., Иванов Л. А., Савченко А. В., Анциферов В. А. Практическая проверка погрешности геолого-геофизической системы оценки газоносности углей // *Труды РАНИМИ*. 2020. № 10–11 (25–26). С. 125–132.
10. Иванов Л. А. Генетическая модель газоносности углей // *Труды РАНИМИ*. 2019. № 8 (23). Ч. 2. С. 132–146.
11. Левенштейн М. Л., Спирина О. И. Комплект карт метаморфизма углей Донецкого бассейна. К.: ЦТЭ, 1991. 104 с.
12. Иванов Л. А. Глубина как фактор газоносности углей // *Труды РАНИМИ*. 2020. № 9 (24). С. 48–54.
13. Анциферов А. В., Тиркель М. Г., Хохлов М. Т., Привалов В. А., Голубев А. А., Майборода А. А., Анциферов В. А. Газоносность угольных месторождений Донбасса. К.: Наук. Думка, 2004. 231 с.
14. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломных зон // *Физика Земли*. 2004. № 10. С. 95–111.
15. Семинский К. Ж., Боров 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. DOI: <https://doi.org/10.15372/GiG2019016>.
16. Корчемагин В. А. Геологическая структура и поля напряжений в связи с эволюцией эндогенных режимов Донбасса: дисс. ... д-р геол. мин. наук. Москва, 1984. 380 с.
17. Иванов Л. А., Туманов В. В., Савченко А. В. Структурно-геодинамические предпосылки использования микросейсм для поиска аномальных скоплений метана // *Труды РАНИМИ*. 2022. № 16–17 (31–32). С. 46–59.

Zonality and relationship between radonometric activity of faults and gas content of Donbass coals

©2024 A. V. Antciferov, L. A. Ivanov, I. Yu. Nikolaev✉

*Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics,
Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), Chelyuskintsev str., 291, Donetsk, 263004*

Abstract

Introduction: in the vicinity of faults, along which the boundaries of coal mine fields are drawn, thick, insignificant in length and relatively isolated gas-bearing reservoirs are formed, which by their filtration properties approach and sometimes exceed the reservoirs of known gas fields. Methane degassing in them is compensated by deep gas flow along geodynamically active fault fragments. Such formations are considered as anomalous accumulations of methane confined to zones of dynamic influence of faults. The study of such accumulations in the interwell space, as well as the current stress-strain state of the upper horizon of the rock massif, identification of geodynamically active zones is possible with the use of radonometric studies.

Methodology: in the field of the mine «Kalinovskaya-Vostochnaya» of Donetsk-Makeevskiy coal-bearing region profile emanation survey was carried out to study the current stress-strain state of the upper horizon of the rock massif and to identify geodynamic zones of influence of faults. The separate content of radon and thoron in the soil air was studied using the scintillation emanometer «Radon» at the area of conjunction of Timoshenko and Frantczusky overthrusts. The values of radon and thoron concentration in soil air, radon-thoron ratio and contrast coefficient of anomalies were calculated. Anomalies of coal gas content anomalies by seams were identified.

Results and discussion: plots of changes in values of radon and thoron concentrations, radon-thoron ratio along the profiles were constructed. Areas of increased and decreased values of radon and thoron concentrations were singled out. Maps of distribution of values of radon and thoron concentration, radon-thoron ratio and contrast coefficient of anomalies are constructed. The compression zones with low fault activity were identified, which are characterised by low values of radon content, radon-thoron ratio, anomaly contrast ratio and high values of thoron content. The compression condition is confirmed by increased gas content of coal seams due to anomalously high formation pressure in the coal-rock massif.

Conclusion: the areas of high values of radon concentration together with low thoron content, high values of radon-thoron ratio and high contrast coefficient of the anomaly, which are geodynamic zones of stretching of active large discontinuity, are identified in the study area. The areas of low values of radon concentration, radon-thoron ratio and contrast ratio together with high values of thoron concentration correspond to compression zones with low geodynamic activity. The zone of positive anomalies of gas content in the area of the Frantczusky overthrust and Timoshenko overthrust interlocking on the earth's surface is combined with the radonometric compression zone. Anomalously high gas pressure in coal seams, determined by the level of gas content of coals, is associated with the compression zone, identified by radonometric data.

Keywords: radonometry, gas content, anomalous accumulations of methane, emanations, faults.

Funding: The work was carried out within the framework of scientific theme FRSR-2023-0007 «Development of geological and geophysical model of formation of anomalous accumulations of methane at coal mines in zones of dynamic influence of faults».



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Nikolaev Ivan Yurievich, e-mail: nikolaevoeigi@yandex.ru

For citations: Antciferov A. V., Ivanov L. A., Nikolaev I. Yu. Zonality and relationship between radonometric activity of faults and gas content of Donbass coals // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 4, pp. 4–16. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/4-16>

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Ivanov L. A. Geologicheskie pokazateli modeli anomal'nogo skopleniya metana [Geological indicators of the model of abnormal accumulation of methane]. *Trudy RANIMI – Transactions of RANIMI*, 2023, vol. 22 (37), pp. 9–18 (In Russ).
2. Vozzhenikov G. S., Belyshev Yu. V. *Radiometriya i yadernaya geofizika* [Radiometry and nuclear geophysics]. Ekaterinburg, Izd-vo UrO RAN publ., 2000, 305 p. (In Russ).
3. Ryaboshtan Yu. S. *Metodicheskie rekomendatsii po strukturno-geodinamicheskomu kartirovaniyu* [Methodological recommendations on structural-geodynamic mapping]. Donetsk, MUP SSSR, PO «Ukruglegeologiya» publ., 1988, 204 p. (In Russ).
4. Seminskii K. Zh., Bobrov A. A. Sootnoshenie radonovoi i seismicheskoi aktivnosti v Baikal'skoi riftovoi zone po dannym emanatsionnogo monitoringa [Correlation of radon and seismic activity in the Baikal rift zone according to emanation monitoring data]. *Geodinamika i tektonofizika – Geodynamics & Tectonophysics*, 2024, vol. 15 (1), pp. 1–14 (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0744>.
5. Andreev A. I., Kovkin A. A., Medvedeva M. B. Radon kak indikator seismogeodinamicheskoi aktivnosti [Radon as an indicator of seismogeodynamic activity]. *Bezopasnost' v tekhnosfere – Safety in technosphere*, 2011, vol. 5, pp. 8–14 (In Russ).
6. Tumanov V. V., Ivanov L. A., Savchenko A. V., Martynov G. P., Bogak M. Yu., Yalputa E. A. Geodinamicheskie, gorno-geologicheskie i inzhenerno-geologicheskie issledovaniya geofizicheskimi metodami, provodimye v RANIMI [Geodynamic, Mining-and-Geological and Geotechnical Surveys Conducted in RANIMI Using Geophysical Methods]. *Trudy RANIMI – Transactions of RANIMI*, 2019, vol. 8 (23/2), pp. 75–84 (In Russ).
7. Utkin V. I., Yurkov A. K. Radon – nadezhnyi indikator geodinamicheskikh protsessov [Radon is a reliable indicator of geodynamic processes]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle – Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center»*. *Earth Sciences*, 2009, vol. 13, no. 1, pp. 165–169 (In Russ).
8. Ivanov L. A. Geologo-geofizicheskaya sistema otsenki gazonosnosti ugol'nykh mestorozhdenii po svyazannomu gazu [Geological and Geophysical System for Estimating Gas Content of Coal Deposits by Tightly Gas]. *Trudy RANIMI – Transactions of RANIMI*, 2020, vol. 10–11 (25–26), pp. 157–172 (In Russ).
9. Antciferov A. V., Tumanov V. V., Ivanov L. A., Savchenko A. V., Antciferov V. A. Prakticheskaya proverka pogreshnosti geologo-geofizicheskoi sistemy otsenki gazonosnosti uglei [Practical Verification of Geological and Geophysical System Error for Estimating Gas Content of Coals]. *Trudy RANIMI – Transactions of RANIMI*, 2020, vol. 10–11 (25–26), pp. 125–132 (In Russ).
10. Ivanov L. A. Geneticheskaya model' gazonosnosti uglei [Genetic Model of Coal Gas Content]. *Trudy RANIMI – Transactions of RANIMI*, 2019, vol. 8 (23/2), pp. 132–146 (In Russ).
11. Levenshtein M. L., Spirina O. I. *Komplekt kart metamorfizma uglei Donetskogo basseina* [Set of maps of coal metamorphism in the Donetsk Basin]. Kiev, TsTE publ., 1991, 104 p. (In Russ).
12. Ivanov L. A. Glubina kak faktor gazonosnosti uglei [Depth as a Factor of Coal Gas Content]. *Trudy RANIMI – Transactions of RANIMI*, 2020, vol. 9 (24), p. 48–54 (In Russ).
13. Antciferov A. V., Tirkel' M. G., Khokhlov M. T., Privalov V. A., Golubev A. A., Maiboroda A. A., Antciferov V. A. *Gazonosnost' ugol'nykh mestorozhdenii Donbassa* [Gas content of Donbass coal deposits]. Kiev, Naukova dumka publ., 2004, 231 p. (In Russ).
14. Kuz'min Yu. O. Sovremennaya geodinamika razlomnykh zon [Recent geodynamics of fault zones]. *Fizika Zemli – Physics of the Solid Earth*, 2004, vol. 10, pp. 95–111 (In Russ).
15. Seminskii K. Zh., Borov A. A., Demberel S. Radonovaya i tektonicheskaya aktivnost' razlomov zemnoi kory (na primere Tsentral'noi Mongolii) [Radon and tectonic activities of crustal faults: the case of Central Mongolia]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60, no. 2, pp. 243–255 (In Russ). DOI: <https://doi.org/10.15372/GiG2019016>.
16. Korchemagin V. A. *Geologicheskaya struktura i polya napryazhenii v svyazi s evolyutsiei endogennykh rezhimov Donbassa*: dis. dr. geol. min. nauk [Geological structure and stress fields in connection with the evolution of endogenous regimes in Donbass. PhD diss.]. Moscow publ., 1984, 380 p. (In Russ).
17. Ivanov L. A., Tumanov V. V., Savchenko A. V. Strukturno-geodinamicheskie predposylki ispol'zovaniya mikrozeism dlya poiska anomal'nykh skoplenii metana [Structural and geodynamic prerequisites for using microseisms to search for anomalous methane accumulations]. *Trudy RANIMI – Transactions of RANIMI*, 2022, vol. 16–17 (31–32), pp. 46–59 (In Russ).

Анциферов Андрей Вадимович, член-корр. НАНУ, д.т.н., профессор, науч. руководитель ФГБНУ РАНМИ, Донецк, Российская Федерация; e-mail: antciferov_a@mail.ru; ORCID 0009-0005-6660-2332

Иванов Леонид Анатольевич, к.г.-м.н., доцент, в.н.с. ФГБНУ РАНМИ, Донецк, Российская Федерация; e-mail: ivanov.donetsk@mail.ru; ORCID 0009-0006-8341-8235

Николаев Иван Юрьевич, к.г.н., в.н.с. ФГБНУ РАНМИ, Донецк, Российская Федерация; e-mail: nikolaevoeqi@yandex.ru; ORCID 0000-0003-2208-0032

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Andrey V. Antciferov, Corresponding member of the NASU, PhD. Dr. habil. in Tech., Professor, Scientific supervisor RANIMI, Donetsk, Russian Federation; e-mail: antciferov_a@mail.ru; ORCID 0009-0005-6660-2332

Leonid A. Ivanov, PhD in Geol.-Min., Associate professor, Leading Researcher of the RANIMI, Donetsk, Russian Federation; e-mail: ivanov.donetsk@mail.ru; ORCID 0009-0006-8341-8235

Ivan Yu. Nikolaev, PhD in Geol., Leading Researcher of the RANIMI, Donetsk, Russian Federation; e-mail: nikolaevoeqi@yandex.ru; ORCID 0000-0003-2208-0032

All authors have read and approved the final manuscript.