

ДИАГНОСТИКА ЗОН ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДИСЛОКАЦИЙ ПО ДАННЫМ ПОЛЕВОЙ ГАММА-СПЕКТРОСКОПИИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ НА ТЕРРИТОРИИ г. ГОМЕЛЯ

М.И. Автушко¹, А.В. Матвеев², А.И. Жуковский³, С.А. Исаченко¹

¹Институт радиобиологии НАН Беларуси
ул. Федюнинского, 16, 246045, Гомель, Беларусь
E-mail: avtyshko10021950@gmail.com

²Институт природопользования НАН Беларуси
ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Беларусь
E-mail: matveyev@nature-nas.by

³Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»
ул. Гикало, 5, 220005, Минск, Беларусь
E-mail: alexzukovski@gmail.com

*Разрывные тектонические нарушения (РТН) широко распространены на территории Беларуси. Эти линейные зоны обычно незначительны по площади, однако неизменно сопровождаются аномальными концентрациями радона в приповерхностных грунтах, и их выявление является важным элементом оценки радоноопасности селитебных территорий. Местоположение зон РТН обычно определяется по результатам комплексных геофизических исследований, сложных и дорогостоящих. В работе дается обоснование способа диагностики РТН по результатам анализа *in situ* измерений радона в грунтах и выявления аномальных величин отношения ^{214}Bi и ^{226}Ra .*

ВВЕДЕНИЕ

Уровень концентрации радона в приповерхностном слое грунтов формируется прежде всего за счет того количества, которое образуется непосредственно в этом слое при радиоактивном распаде содержащегося в нем радия (^{226}Ra). Эта часть радона – собственно грунтовый или интрагенный радон (Rn_{in}) – зависит только от вещественного состава грунтов и для каждой точки измерения, характеризующей определенный элементарный объем грунтового массива, является постоянной величиной ($Rn_{in} = \text{const}$), поскольку период полураспада радонотрудирующего радия велик (1600 лет [10]), и его концентрация в грунте в ходе выполнения измерений остается практически неизменной. Rn_{in} состоит из двух компонент: радона, физически связанного в кристаллическом веществе грунта (Rn_{fix}), и свободного радона (Rn_{free}), поступающего в поро-

вое пространство в соответствии с эманулирующей способностью грунтового вещества.

Другая часть грунтового радона представлена глубинной составляющей (Rn_{bat}), избыточной по отношению к количеству, равновесному с содержащимся в грунтах радием. Глубинный радон поступает к земной поверхности вследствие адвекции, обусловленной влиянием закономерно варьирующего лунно-солнечного гравитационного воздействия на земную кору (земные приливы-отливы). На фоновых платформенных территориях вне зон геодинамической активизации земной коры суточное поступление глубинного радона в приповерхностный грунт в зависимости от лунно-месячных фаз не превышает 0,5–1,5% от величины Rn_{in} [9]. В зонах тектонических дислокаций или проникающих в осадочный чехол интрузивных образований, которые сопровождаются признаками повышенной проницаемости вмещающих гор-

ных пород (трещиноватостью, дроблением и др.), концентрация радона в поровом пространстве грунта может превосходить фоновые уровни в несколько раз (аномальные уровни) или даже в десятки и сотни раз (ураганные уровни) [1; 2; 3; 4; 7]. На территории Беларуси геофизическими исследованиями установлено значительное количество разрывных тектонических нарушений (разломов) различного ранга, геологического возраста, простирания и глубины заложения [6; 8]. Это дает основание предполагать широкое распространение аномальных геохимических полей радона в приповерхностных грунтах, которые необходимо особенно тщательно исследовать и учитывать при оценке радоноопасности селитебных территорий. Зона разрывного тектонического нарушения (РТН) обычно представляет собой относительно узкий протяженный участок, не занимающий значительных площадей, и в помещениях здания, находящегося в пределах такого участка, концентрация радона может существенно превышать характерные для территории фоновые уровни.

Следующие после радона смежные цепи радионуклидов внутри радиоактивного ряда урана-радия отличаются очень короткими периодами полураспада и коротким временем жизни (минуты – десятки минут), в течение которого их миграция в грунтовой среде не может быть высокой. Поэтому количественные соотношения между содержащимся в грунтах радоном и его дочерними продуктами распада радона (ДПР) соответствуют закономерностям, вытекающим из закона векового равновесия. На этой основе представляется возможной разработка методологии оценки концентрации радона в грунтах по результатам регистрации гамма-излучения его ДПР непосредственно в полевых условиях, без отбора проб или иных действий, разрушающих естественную структуру грунтовой массы и, следовательно, без нарушения равновесия в радиогеохимической системе *радий → радон → ДПР радона*. Задача данной работы заключается в обосновании способа выявления зон разрывных тектонических нарушений на основе анализа и интерпретации результатов экспрессных *in situ* измерений.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уровни Rn_{bat} не имеют связи с концентрацией радия в грунтовом веществе, и грунты геодинамически подвижных зон РТН характеризуются существенным (нередко многократным) превы-

шением концентрации радона над его фоновыми концентрациями. Однако в зонах слабоактивных РТН эти избыточные уровни могут оказаться сопоставимыми с уровнями, свойственными грунтам, для которых характерна высокая концентрация радия и, соответственно, высокая радонопродуцирующая способность. Критерием уровня фоновости-аномальности концентрации радона в грунтах может служить величина коэффициента κ (каппа), полученная на основе применения процедуры радиового нормирования, которая определяется из отношения значений концентрации ДПР радона ^{214}Bi (RaC) к измеренным в тех же точках грунтового массива и тем же измерительным методом значениям концентрации радонопродуцирующего ^{226}Ra :

$$\kappa = ^{214}\text{Bi} (\text{Бк/кг}) / ^{226}\text{Ra} (\text{Бк/кг}).$$

Смысл и значение κ -коэффициента основаны на представлении о том, что фоновые величины содержания ^{214}Bi и ^{226}Ra в грунтах соответствуют естественному стремлению радиогеохимической системы *радий → радон → ДПР радона* к равновесию, при очевидной невозможности его достижения, обусловленной поступлением глубинного радона как самого подвижного компонента этой системы. Это состояние системы определено нами как «квазиравновесие». На фоновых территориях поступление Rn_{bat} незначительно и составляет, как правило, первые проценты относительно продуцируемой радием величины Rn_{in} . В таких условиях значения концентрации ДПР радона будут сохранять тенденцию к соблюдению прямой количественной зависимости от концентрации ^{226}Ra , и фоновое значение величины κ будет приближаться к единице, всегда превышая это значение в связи с поступлением глубинного радона.

Поступление глубинного радона на фоновых территориях не может быть одинаковым для разных местоположений вследствие влияния нескольких факторов: 1) разнообразия состава нижележащих пород, подстилающих приповерхностный слой грунтов; 2) различия физических свойств и состояния грунтов, предопределяющего интенсивность глубинной адвекции радона; 3) вариации (разброса) оценок концентрации радионуклидов, связанной с неизбежными аппаратными или иными ошибками измерения. Таким образом, величина κ -коэффициента, характеризующая уровень фонового радиоактивного «квазиравновесия» между радонопродуцирующим радионуклидом ^{226}Ra и ^{214}Bi , для сохранения достоверности должна учитывать возможную ошибку, обусловленную перечисленными факторами. Существу-

ет, следовательно, интервал значений x_i , включающий все его близкие значения, с учетом этой ошибки. Этот интервал рассчитывается исходя из оценки среднего арифметического величины x_i для совокупности значений x_i :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i,$$

где n – количество измерений, i – номер измерения.

Мера разброса значений случайной величины относительно ее математического ожидания соответствует средней величине отклонения величин x_i от $\bar{x}$ (то есть ошибки среднего):

$$\delta_{\bar{x}} = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x}).$$

Тогда искомым интервал значений величины x_i , характеризующей состояние радиоактивного «квазиравновесия» между ^{214}Bi и ^{226}Ra в грунтах, с учетом ее вариаций может быть представлен как $\bar{x} \pm \delta_{\bar{x}}$.

Величина x_i является геохимическим параметром, поскольку она характеризует особенности миграции химических элементов и, в частности, позволяет судить о том, насколько концентрация ^{214}Bi в грунтах близка к состоянию радиоактивного равновесия в радиогеохимической системе *радий* → *радон* → *ДПР радона* или отклоняется от него:

– значения $x_i \leq \bar{x} + \delta_{\bar{x}}$ (не превышающие верхний предел доверительного интервала), свидетельствуют, что на i -й точке измерения соотношение концентраций радионуклидов ^{214}Bi и ^{226}Ra в грунтах приближается к единице, с незначительным превышением этой величины, обусловленным фоновым уровнем поступления глубинного радона;

– значения x_i , выходящие за нижний предел доверительного интервала ($x_i < \bar{x} - \delta_{\bar{x}}$), маловероятны, поскольку, как уже отмечалось, концентрация радона в грунтах всегда выше равновесного с радонопродуцирующим радием;

– значения x_i , превышающие верхний предел доверительного интервала ($x_i > \bar{x} + \delta_{\bar{x}}$), показывают, что концентрация радона и его ДПР в грунтах на соответствующих точках измерения существенно и статистически значимо превышает радонопродуцирующие способности этих грунтов и, следовательно, является аномальной.

В естественных условиях не существует иных причин аномального содержания радона и его дочерних продуктов в грунтах, кроме его высокого поступления в приповерхностный измеряемый слой в связи с пространственной приуроченностью территории к геодинамически активной зоне РТН. Местоположение таких точек совпадает

с местоположением проекции искомой зоны тектонического нарушения, сформированного в нижележащих слоях горных пород, или с местоположением непосредственного выхода этой зоны на дневную поверхность.

Если направление простирания искомой зоны РТН предварительно определено или хотя бы обоснованно предполагается, то для ее диагностики достаточно построения графической модели, иллюстрирующей изменение величин x_i по профилю, пересекающему зону, с учетом расстояний между точками измерения. Если же простирание (или даже само наличие) РТН неизвестно, оно может быть выявлено путем построения и анализа крупномасштабной карты значений x_i . Для достаточно корректного и непротиворечивого заключения о соответствии полученных данных зоне РТН масштаб картирования должен соответствовать представлениям о возможной ширине этой зоны. Оптимальным для решения задачи локализации является расстояние l между точками измерения, соответствующее условию $l \leq L$, где L – предполагаемая ширина зоны. В этом случае зона РТН будет зафиксирована на пересекающем ее профиле хотя бы в одной точке измерения, что послужит основанием для более детального исследования окрестностей этой точки с целью уточнения параметров зоны и особенностей ее пространственной (площадной) локализации. При расстоянии между точками измерения большем ширины зоны резко возрастает риск того, что она окажется между этими точками и не будет локализована.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для оценки результативности использования описанной выше методики решалась задача выявления зоны одного из локальных нарушений, оперяющих Лоевский суперрегиональный разлом, на территории г. Гомеля. Простирание этого нарушения в общих чертах известно по данным геофизических исследований, однако достоверная координатная привязка проекций разлома к определенным точкам земной поверхности затруднена, поскольку массивы горных пород, к которым непосредственно относились подобные разломы в период их заложения и последующего развития, обычно перекрыты мощными толщами осадочных образований, накопившихся в последующие геологические периоды. В настоящее время они могут находиться на глубине в сотни метров, и зоны тектонических нарушений далеко не всегда пространственно соответствуют каким-либо определенным

ландшафтным маркерам, тем более что для геодинамически активных разломов свойственны разнообразие вариации направлений простирания.

Для измерения содержания ^{214}Bi и ^{226}Ra в грунтах использовали портативный гамма-спектрометрический комплекс на основе сцинтилляционного неорганического кристалла NaI(Tl) размерами $\varnothing 63 \times 63 \text{ мм}$ и портативного компьютера. *In situ* измерения выполняли в геометрии 2π [5], с установкой детектирующего устройства на поверхности грунтового массива, что позволяет регистрировать гамма-излучение ДПР, находящихся в грунте, без нарушения естественного сложения грунта и, следовательно, с сохранением установившегося в нем состояния равновесия между радонам и его дочерними продуктами. Продолжительность одного измерения составляла 1000 с. Измерения производили в точках на поверхности грунтового массива, отстоящих друг от друга на 100 м, исходя из предположения, что ширина исследуемой зоны РТН не меньше этого расстояния, и в таком случае при пересечении зоны профилем она будет зафиксирована хотя бы в одной точке измерения. Если значение κ_i на последующей точке превышало значения, полученные на предыдущей точке, более чем на 30%, то выполняли дополнительное измерение между этими точками.

Основные результаты измерения, а также рассчитанные оценки $\bar{\kappa}$ и доверительного интервала $\bar{\kappa} \pm \delta_{\bar{\kappa}}$ приведены в таблице. На рисунке показан ход значений концентрации ^{214}Bi и ^{226}Ra в грунтах (левая шкала) и значений κ -коэффициента (правая шкала) по профилю, пересекающему зону искомого тектонического нарушения. Прерывистые горизонтальные линии обозначают нижний и верхний пределы доверительного интервала $\bar{\kappa} \pm \delta_{\bar{\kappa}}$. Концентрации

Таблица – Концентрация радия, радона в грунтах и значения κ -коэффициента

№№ точек	Грунт	L, м	^{226}Ra , Бк/кг	^{214}Bi , Бк/кг	κ_i
1	Песок	50	5,5	6,29	1,144
2	-»-	100	4,8	5,01	1,044
3	Песок оторфованный	150	2,5	2,86	1,144
4	-»-	250	2,5	2,63	1,052
5	-»-	300	2,6	2,76	1,062
6	-»-	350	3,2	3,29	1,028
7	Песок	400	5,1	5,51	1,080
8	-»-	450	4,7	5,21	1,109
9	-»-	500	5,4	5,58	1,033
10	Супесь	550	6,6	6,81	1,032
11	Песок	600	4,9	5,06	1,033
12	-»-	625	4,9	6,56	1,339
13	-»-	650	4,2	8,37	1,933
14	-»-	675	4,9	6,96	1,420
15	-»-	700	4,2	4,51	1,074
16	Супесь	750	7,6	8,9	1,171
17	-»-	800	6,2	6,61	1,066
18	Песок	850	4,5	5,02	1,116
Среднее арифметическое значение			$\bar{\kappa}$		1,160
Ошибка среднего			$\delta_{\bar{\kappa}}$		0,136
Доверительный интервал			верхний предел	$\bar{\kappa} + \delta_{\bar{\kappa}}$	1,296
			нижний предел	$\bar{\kappa} - \delta_{\bar{\kappa}}$	1,024

^{226}Ra и ^{214}Bi в грунтах колеблются в широких пределах, достигая более чем трехкратных различий. Тем не менее в подавляющем большинстве опробованных точек грунтового массива (точки № 1–11, 15–17) значения κ -коэффициента близки к единице ($\kappa_i = 1,032 \div 1,171$), что соответствует «квазиравновесным» соотношениям ^{214}Bi и ^{226}Ra , с учетом вариаций концентрации ^{214}Bi , обусловленной различиями в поступлении Rn_{bat} .

Относительно высокое содержание ^{214}Bi в грунтах на точке измерения № 16 обусловлено высоким

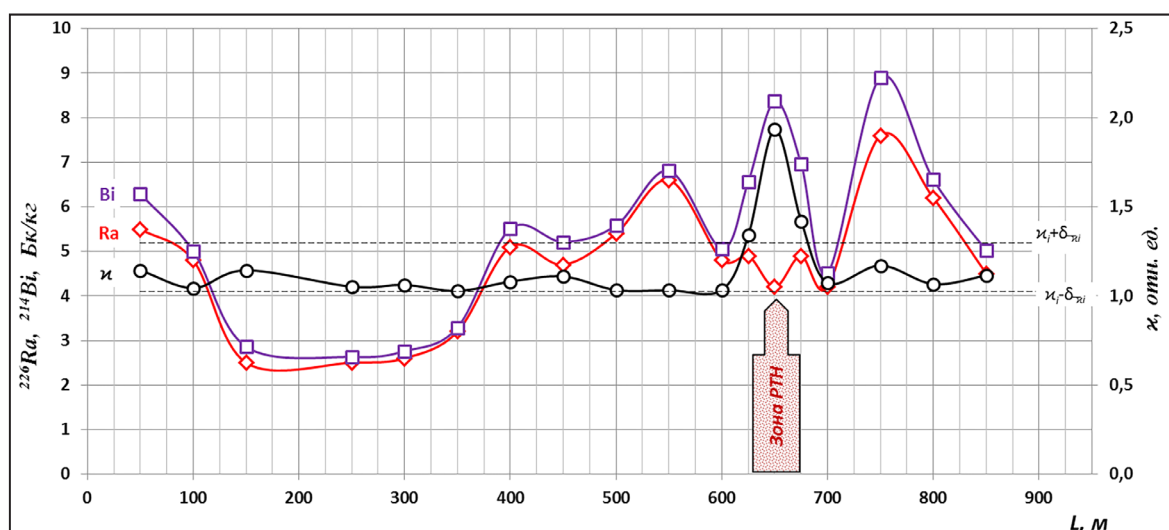


Рисунок – Графическая модель хода концентраций ^{226}Ra , ^{214}Bi и величины κ -критерия по профилю

содержанием ^{226}Ra и, следовательно, не может быть связано с влиянием зоны тектонического нарушения. Значение χ для этой точки не выходит за пределы доверительного интервала, то есть соотношения между радионуклидами близко соответствуют состоянию «квазиравновесия» между ними. Таким образом, для диагностики положения зоны РТН выявление в грунтах только высоких концентраций ^{214}Bi , отражающих высокую суммарную концентрацию радона, оказывается недостаточным и недостоверным, поскольку эти концентрации чаще всего обусловлены высокой радонопродуцирующей способностью грунтов.

В грунтах на точках № 12–14 величина $\bar{\chi}_i$ и выходит далеко за пределы доверительного интервала $\chi_i + \delta_{\bar{\chi}_i}$, что свидетельствует о концентрации ^{214}Bi в этих грунтах, значимо превышающей его равновесное количество, и указывает на аномальную концентрацию радона. Местоположение грунтов с такими значениями χ соответствует местоположению проекции искомой зоны разрывного тектонического нарушения, сформированного в нижележащих слоях горных пород, или непосредственному выходу этой зоны на дневную поверхность. Как показано на рисунке, ширина локализованной таким образом зоны РТН, в пределах которой грунты характеризуются аномальными содержаниями радона, составляет около 50 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Протяженные линейные зоны тектонических нарушений обычно незначительны по площади, однако неизменно сопровождаются аномальными концентрациями радона в приповерхностных грунтах, и поэтому их выявление является важным элементом прогнозной оценки радоноопасности. Обычно эти зоны диагностируются по результатам комплексных геофизических исследований, сложных и дорогостоящих, сопровождающихся анализом условий залегания слоев осадочных образований посредством изучения керна глубоких скважин.

2. В работе дается обоснование способа диагностики разрывного тектонического нарушения по результатам анализа рядовых радонометрических измерений, выполняемых с помощью полевых гамма-спектрометрических методов, простых, относительно дешевых и экспрессных.

3. Предлагаемый способ применим для локализации зон разрывных тектонических нарушений на сейсмостойких платформенных территориях, и его использование позволяет существенно повысить достоверность оценок уровня радоноопасности селитебных территорий.

4. Суть описанного способа заключается в выявлении аномальных величин отношения содержаний ^{214}Bi к ^{226}Ra , свидетельствующих о повышенном поступлении в покровные грунты глубинного радона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Влияние** зон разрывных нарушений на концентрацию радона в почвенном воздухе на территории Беларуси / А. В. Матвеев [и др.] // Геохімія та рудоутворення. – 2014. – Вип. 34. – С. 69–77.
2. **Геохимическое** поле радона в поровом воздухе почв над погребенной трубкой взрыва / М. И. Автушко [и др.] // Літасфера. – 1995. – № 3. – С. 158–160.
3. **Далатказин, Т. Ш.** Экспериментальные исследования возможности использования радонометрии для геодинамического районирования / Т. Ш. Далатказин, Ю. П. Коновалова, В. И. Ручкин // Літасфера. – 2013. – № 3. – С. 146–150.
4. **Дверницкий, Б. Г.** Радоновый мониторинг эндогенных геологических процессов / Б. Г. Дверницкий // АНРИ. – 2008. – № 2 (53). – С. 72–73.
5. **Жуковский, А. И.** Измерение радиоактивности почв методом «in situ» / А. И. Жуковский, К. Моги, С. А. Кутень // Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2016. – № 3. – С. 105–110.
6. **Матвеев, А. В.** Геоактивные зоны на территории Беларуси / А. В. Матвеев // Літасфера. – 2015. – № 1 (42). – С. 64–79.
7. **Радон** в природных и техногенных комплексах Беларуси / А. В. Матвеев [и др.] // Літасфера. – 1996. – № 3. – С. 151–161.
8. **Разломы** земной коры Беларуси / Р. Е. Айзберг [и др.] ; под ред. Р. Е. Айзберга. – Минск : Красико-Принт, 2007. – 372 с.
9. **Рынский, М. А.** О влиянии динамики земной коры на поступление радона к земной поверхности / М. А. Рынский, М. И. Автушко // Літасфера. – 2008. – № 1 (28). – С. 148–151.

10. **The Nubase 2016** evaluation of nuclear properties / G. Audi [et al.] // Chinese Physics. – 2017. – Vol. 41, № 3. – P. 1–138.

Статья поступила в редакцию 04.05.2022

Рецензент В.И. Пашкевич

ДЫЯГНОСТЫКА ЗОН ТЭКТАНІЧНЫХ ДЫСЛАКАЦЫЙ ПА ДАНЫХ ПАЛЯВОЙ ГАМА-СПЕКТРАСКАПІ ПРЫПАВЕРХНЕВЫХ ДЫСПЕРСНЫХ ГРУНТОЎ НА ТЭРЫТОРЫІ г. ГОМЕЛЯ

М.І. Аўтушка¹, А.В. Матвееў², А.І. Жукоўскі³, С.А. Ісачэнка¹

¹Інстытут радыябіялогіі НАН Беларусі
вул. Федзюнінскага, 16, 246045, Гомель, Беларусь
E-mail: avtyshko10021950@gmail.com

²Інстытут прыродакарыстання НАН Беларусі
вул. Ф. Скарыны, 10, 220076, Мінск, Беларусь
E-mail: matveyev@nature-nas.by

³Навукова-вытворчае ўнітарнае прадпрыемства «АТАМТЭХ»
вул. Гікала, 5, 220005, Мінск, Беларусь
E-mail: alexzukovski@gmail.com

Разрыўныя тэктанічныя парушэнні (РТП) шырока распаўсюджаны на тэрыторыі Беларусі. Гэтыя лінейныя зоны звычайна нязначныя на плошчы, але заўсёды суправаджаюцца анамальнымі канцэнтрацыямі радону ў прыпаверхневых грунтах і іх выяўленне з'яўляецца важным элементам ацэнкі радонабеспечнасці селітэбных тэрыторый. Палажэнне зон РТП звычайна вызначаецца па даных комплексных геафізічных даследаванняў, якія з'яўляюцца складанымі і дорага каштуюць. У рабоце абгрунтаваны спосаб дыягностыкі разломаў па выніках аналізу *in situ* вымярэнняў радону ў грунтах і выяўлення анамальных велічынь адносінаў ^{214}Bi да ^{226}Ra .

TECTONIC DISLOCATION DETECTION BASED ON FIELD GAMMA-SPECTROSCOPY MEASUREMENTS OF NEAR-SURFACE DISPERSIVE SOILS ON THE TERRITORY OF GOMEL

M. Autushka¹, A. Matveyev², A. Zhukovsky³, S. Isachenko¹

¹Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus
16 Fedyuninsky St, 246007, Gomel, Belarus
E-mail: avtyshko10021950@gmail.com

²Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus
10 F. Skoryna St, 220076, Minsk, Belarus
E-mail: matveyev@nature-nas.by

³Research and Production Enterprise ATOMTEX
5 Gikalo St, 220005, Minsk, Belarus
E-mail: alexzukovski@gmail.com

Tectonic disjunctive dislocations (TDD) are of a widely common occurrence on the territory of Belarus. These linear zones of tectonic deformation, although not very significant in terms of their stretch area, have a close association with consistent anomalies of radon concentrations in the near-surface soils. Therefore the detection of such zones is an important element of inclusive radon-associated hazard assessments of residential areas. As a general practice, TDD zones are normally detected using the results of complex and expensive geophysical surveys. However, it has been substantiated that a TDD detection approach is based on routine field measurements of radon with simple, relatively inexpensive and express *in situ* analytical techniques. The essence of this method is the detection of anomalous ratio values of ^{214}Bi and ^{226}Rn that are used to diagnose TDD zone position.