

ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 550.835.24+ 551.243.8

[DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.93.88.003)

Оригинальная статья

Оценка объемной активности радона тектонических разломов в границах городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан)

М.Ю. Маркин 

ТОО «ГеоСтройСистема», Республика Казахстан, 050000, г. Алматы, Алатауский район,
микрорайон Саялы, дом 41/1, e-mail: markin_maxim@inbox.ru

Статья поступила: 13.04.2023, доработана: 12.05.2023, одобрена к публикации: 23.05.2023

Резюме: Актуальность темы определяется необходимостью выявления геодинамически активных разломов, скрытых под мощными толщами осадочных пород, и оценки их текущей активности, что является важнейшей задачей при районировании территорий по сейсмической опасности и основой прогноза землетрясений. Проявившиеся в последнее время серии разрушительных землетрясений в Турции и Сирии демонстрируют все более возрастающую активность литосферы, связанную с активизацией тектонических разломов. Одним из таких потенциально опасных районов проявления землетрясений является город Усть-Каменогорск (Республика Казахстан), расположенный в пределах Иртышской зоны смятия (ИЗС). **Цель работы:** оценить объемную активность радона и установить местоположения сейсмически опасных тектонических разломов ИЗС в пределах современных границ города Усть-Каменогорск, на основе эманационной съемки. **Методы работы.** Измерение плотности потока радона с поверхности грунта и измерение объемной активности радона (Rn^{222}) в пробах почвенного воздуха по профилям с применением измерительного комплекса «Альфарад плюс», предназначенного для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов. Количественной характеристикой величины аномалии при обработке полученной информации служил абсолютный параметр максимального значения объемной активности почвенного радона (Q_{max}) и относительный показатель коэффициента радоновой активности $K=Q_{max}/Q_{min}$. **Результаты работы.** Рассчитано среднее фоновое содержание радона в пределах участка исследований, которое составляет 619,4 Бк/м³. В простых случаях участок аномальных значений параметра Q имеет в поперечном сечении один максимум с постепенным или ступенчатым снижением концентрации почвенного радона к периферии. В большинстве случаев аномалия радона является сложной, прерывистой, что связано с неоднородным строением разломной зоны. По результатам эманационной съемки установлено, что в большинстве случаев вдоль разрывных нарушений фиксируются аномальные значения объемной активности Rn^{222} , что позволяет уточнить положение разломов на местности. Существенные неоднородности в распределении объемной активности Rn^{222} отмечаются вкрест простирающихся разломных зон и связаны с изменчивостью их проницаемости. Максимальные значения аномалий объемной активности Rn^{222} приурочены к наиболее активным в геодинамическом отношении участкам разломных зон. Существование в разломной зоне участков с низкой проницаемостью обусловлено наличием тонкодисперсного заполнителя или небольших блоков, почти не нарушенных открытыми разрывами.

Ключевые слова: Иртышская зона смятия, город Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, разломы, эманационная съемка, объемная активность радона.

Благодарности: Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской программы: «Оценка сейсмической опасности территорий областей и городов Казахстана на современной научно-методической основе».

Для цитирования: Маркин М.Ю. Оценка объемной активности радона тектонических разломов в границах городской агломерации Усть-Каменогорск (Республика Казахстан). *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 29-39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003.

[DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.93.88.003)

Original papers

Assessment of radon volumetric activity of tectonic faults within the boundaries of the Ust-Kamenogorsk urban agglomeration (Republic of Kazakhstan)

M.Y. Markin 

Ltd «GeoStroySystem», 41/1 Sayaly microdistrict, Alatau district, Almaty 050000,
Republic of Kazakhstan, e-mail: markin_maxim@inbox.ru

Received: 13.04.2023, revised: 12.05.2023, accepted: 23.05.2023

Abstract: The relevance of the topic is determined by the need to identify geodynamically active faults hidden under thick layers of sedimentary rocks and assess their current activity, which is the most important task in seismic hazard zoning and the basis for earthquake prediction. The recent series of devastating earthquakes in Turkey and Syria demonstrate an ever-increasing activity of the lithosphere associated with the activation of tectonic faults. One of such potentially dangerous areas of earthquake manifestation is the city of Ust-Kamenogorsk (Republic of Kazakhstan), located within the Irtysh shear zone (IZS). **The aim of the work:** to estimate the volumetric activity of radon and to establish the location of seismically dangerous tectonic faults of the ISS within the modern boundaries of the city of Ust-Kamenogorsk, based on emanation survey. **Methods.** Measurement of radon flux density from the ground surface and measurement of radon volumetric activity (Rn222) in soil air samples along profiles using the Alfarad Plus measuring complex, designed to monitor radon, thoron and their daughter products. The absolute parameter of the maximum value of the volumetric activity of soil radon (Qmax) and the relative indicator of the coefficient of radon activity $K=Q_{max}/Q_{min}$ served as a quantitative characteristic of the anomaly in the processing of the information received. **Results.** The average background content of radon within the study area was calculated, which is 619.4 Bq/m³. In simple cases, the section of anomalous values of the Q parameter has one maximum in cross section with a gradual or stepwise decrease in the concentration of soil radon towards the periphery. In most cases, the radon anomaly is complex, discontinuous, which is associated with the inhomogeneous structure of the fault zone. Based on the results of the emanation survey, it was found that in most cases, anomalous values of the volumetric activity of Rn222 are recorded along the faults, which made it possible to specify the position of the faults on the ground. Significant inhomogeneities in the distribution of Rn222 volumetric activity are noted across the strike of fault zones and are associated with the variability of their permeability. The maximum values of Rn222 volumetric activity anomalies are associated with the geodynamically most active parts of the fault zones. The existence of areas with low permeability in the fault zone is due to the presence of finely dispersed aggregate or small blocks that are almost not disturbed by open fractures.

Keywords: Irtysh shear zone, Ust-Kamenogorsk city, Republic of Kazakhstan, faults, emanation survey, radon volumetric activity.

Acknowledgments: *The article was prepared within the framework of the research program: "Assessment of the seismic hazard of the territories of regions and cities of Kazakhstan on a modern scientific and methodological basis".*

For citation: Markin M.Yu. Assessment of radon volumetric activity of tectonic faults within the boundaries of the Ust-Kamenogorsk urban agglomeration (Republic of Kazakhstan). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 29-39. DOI: 10.46698/VNC.2023.93.88.003.

Введение

Проявившиеся в последнее время серии разрушительных землетрясений в Турции и Сирии демонстрируют все более возрастающую активность литосферы, связанную с активизацией тектонических разломов. Выявление подобных разломов, скрытых под мощными толщами осадочных пород, и оценка их текущей активности является актуальной задачей при районировании территорий по сейсмической опасности и основой прогноза землетрясений [Conti et al., 2021; Chowdhury et al., 2022 и др.]. Одним из таких потенциально опасных районов проявления землетрясений является город Усть-Каменогорск (Республика Казахстан), расположенный в пределах Иртышской зоны смятия (ИЗС).

ИЗС – это крупнейшая структура в западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса, изучению которой посвящено множество работ [Sengör, Natal'in, 1996; Берзин, Кунгурцев 1996; Сенников и др., 2003; Добрецов, 2003; Vladimirov et al., 2008, Buslov, 2011; и др.]. По данным этих исследователей ИЗС представляет собой достаточно широкую (1,5–20,0 км) зону глубинного разлома, протягивающуюся по территории России, Восточного Казахстана (г. Рубцовск, г. Усть-Каменогорск) в Китай (г. Фуюн) и далее в Монголию более чем на 1000 км. Внутреннее строение ИЗС определяется системой разнородных блоков и пластин, отличающихся степенью вовлечения в деформационные процессы и уровнем метаморфизма, и разделенных отдельными сместителями разломов. Исходя из комплекса геологических данных ИЗС сложена тектонизированными породами Калба-Нарымской структурно-формационной зоны (D_2-C_1) (рис. 1). Геологические характеристики ее строения, проявлений магматизма и результаты геофизических исследований приведены в работах [Марьин, 1981; Кузубный, 1981; Лопатников, 1982; Ермолов, 2013 и др.].

Целью исследований является установление местоположения сейсмически опасных тектонических разломов ИЗС в пределах современных границ г. Усть-Каменогорск, на основе определения объемной активности радона в подпочвенном воздухе по результатам эманационной съемки.

Материал и методы исследования

Для изучения подходов к оценке сейсмической опасности территории городской агломерации Усть-Каменогорска проведен комплекс работ, включающий эманационную съемку территории, которая представляет собой одного из эффективных методов выявления активных тектонических разломов. Именно по тектоническим разломам осуществляется обмен атмосферными и эндогенными газами, в том числе за счет нисходящих потоков кислорода и восходящих потоков радона [Seminsky et al., 2014]. Аномалии повышенной объемной активности радона (ОАР) в разломных зонах напрямую связаны с их геодинамической активностью [Utkin et al., 2006; Ambrosino et al., 2020; Firdaus et al., 2020; Бирюлин и др., 2021]. Чем активнее разлом, тем интенсивнее эманации радиоактивного газа [Матишов и др., 2010; Маркин и др., 2016; Хулелидзе и др., 2016; Чотчаев и др., 2021; Заалишвили и др., 2022].

Исследования проводились с июня по сентябрь 2022 г. Было отработано 46 профилей, общей протяженностью 20,3 км. Профили эманационной съемки располагались вкрест простирания разломных зон в тех местах, где главные особенности их строения отчетливо определялись по данным полевых геологических наблюдений (рис. 1). Профили пересекали разно ориентированные части разломов с расстоя-

ниями между пунктами опробования от 15 до 100 м, соответствующими краям и центральной части разломов.

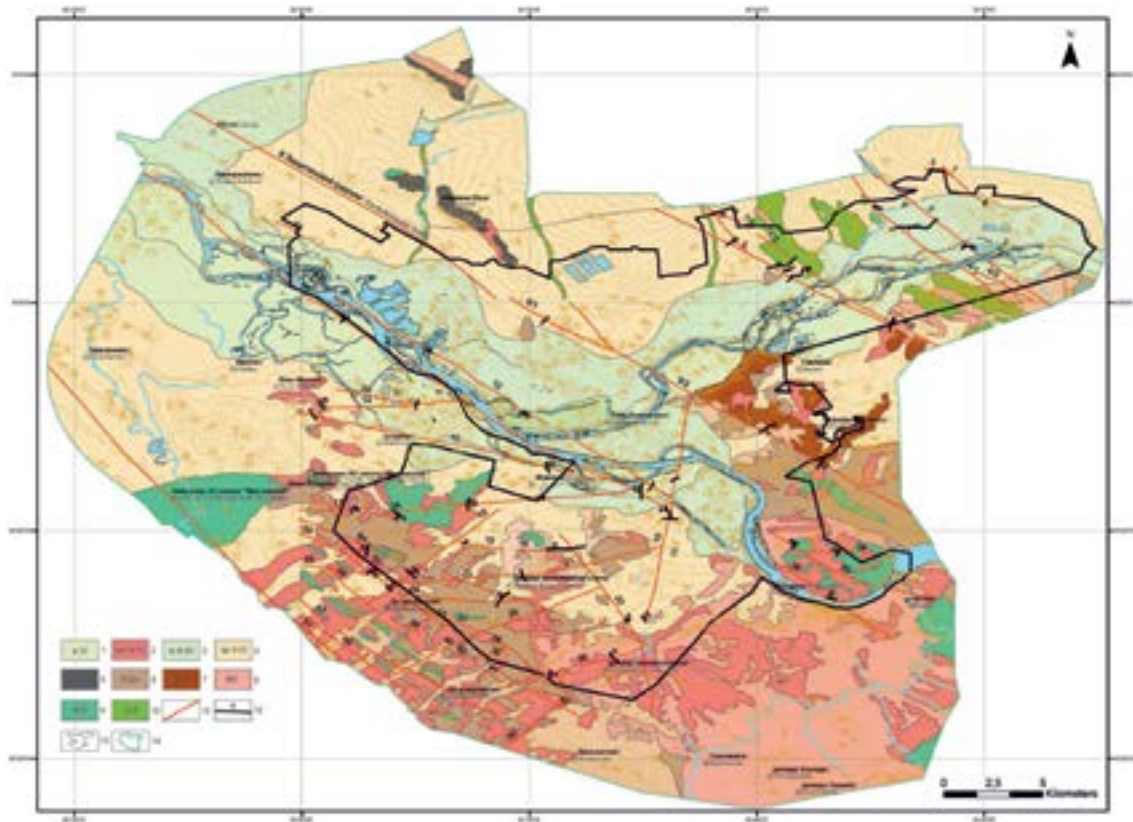


Рис 1. Геологическая карта участка исследований с отображением профилей эманационной съемки:

- 1 – аллювиальные отложения пойм и русел рек; 2 – элювиально-делювиальные отложения; 3 – аллювиальные отложения первой надпойменной террасы; 4 – рорская серия (делювиально-пролювиальные отложения); 5 – такырская свита (алевролиты, песчаники, пелиты); 6 – кыставкурчумская и лосишенская свиты (алевролиты, песчаники, линзы известняков, сланцы); 7 – орловская и березовская свиты (песчаники, алевролиты, гравелиты, туффиты, туффопесчаники); 8 – нерасчлененные интрузии кислого состава (биотитовые гнейсогранодиориты, биотитовые граниты, кварцевые порфириты); 9 – нерасчлененные интрузии основного состава (диабазы, габбро-диабазы, дацитовые порфириты, габбро-диориты); 10 – джайды-карагайская свита (сланцы, амфиболиты); 11 – разрывное нарушение; 12 – профили эманационной съемки и их номера; 13 – кадастровая граница г. Усть-Каменогорск; 14 – перспективная граница г. Усть-Каменогорск /

Fig 1. Geological map of the study area showing emanation survey profiles:

- 1 – alluvial deposits of floodplains and riverbeds; 2 – eluvial-deluvial deposits; 3 – alluvial deposits of the first floodplain terrace; 4 – Ror series (deluvial-proluvial deposits); 5 – Takyr Formation (siltstones, sandstones, pelites); 6 – Kystavkurchumskaya and Losishenskaya suites (siltstones, sandstones, limestone lenses, shales); 7 – Orlovskaya and Berezovskaya suites (sandstones, siltstones, gravelstones, tuffites, tuff sandstones); 8 – undivided intrusions of acidic composition (biotite gneiss-granodiorites, biotite granites, quartz porphyrites); 9 – undivided mafic intrusions (diabases, gabbro-diorites, dacitic porphyrites, gabbro-diorites); 10 – Dzhaid-Karagai Formation (shales, amphibolites); 11 – fault; 12 – emanation survey profiles and their numbers; 13 – cadastral boundary of Ust-Kamenogorsk; 14 – prospective border of Ust-Kamenogorsk

Для измерения плотности потока радона с поверхности грунта и измерения объемной активности радона (Rn^{222}) в пробах почвенного воздуха был выбран из-

мерительный комплекс для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс».

Измерение ОАР в почвенном воздухе основано на отборе пробы почвенного воздуха из шпура в пробоотборник, определении ОАР в пробоотборнике путем перемешивания пробы между объемами пробоотборника и измерительной камеры и последующем измерении ОАР в измерительной камере блока измерения ОАР.

При отборе средняя температура окружающей среды составляла 29°, средняя относительная влажность воздуха 21%, атмосферное давление 735 мм рт. ст., что удовлетворяло условиям работы с измерительным комплексом. Отбор проб производился в ранее подготовленном шпуре, глубиной от 50 до 70 см и диаметром до 5 см, куда помещалась приемная камера, соединенная при помощи штуцеров с автономной воздуходувкой и присыпалась землей. Шпур герметично закрывался на 30 мин., поскольку именно за это время в любом грунте района исследований концентрации радона в данном объеме и в подпочвенном воздухе выравниваются. По истечении срока выдержки накопительной камеры в почве, ее извлекают. Далее проводились измерения ОАР в измерительной камере. Измерения осуществлялись с 8:30 до 17:00 часов в сухую погоду. Замер дублировался, если происходило резкое изменение давления, температуры или влажности воздуха, значения которых фиксировались одновременно с величиной объемной активности радона (Q). После каждого определения прибор очищался посредством прокачки рабочей камеры атмосферным воздухом.

Количественной характеристикой величины аномалии при обработке полученной информации служил абсолютный параметр максимального значения объемной активности почвенного радона (Q_{\max}) и относительный показатель коэффициента радоновой активности (K). Q_{\max} отражает интенсивность аномалии, которая наиболее важна для оценки радоновой опасности населенных территорий.

Для количественного сопоставления разломов по радоновой активности использовался относительный показатель: $K = Q_{\max}/Q_{\min}$, где Q_{\max} – максимальное значение параметра Q в пределах профиля (интенсивность аномалии), а Q_{\min} – минимальное значение параметра Q в породах за границей зоны разлома. Расчет фоновых значений производился по формуле: $A_{\phi} = \sum A/N$, где A_{ϕ} – фоновое значение, A – измеренное значение, N – количество измерений.

Результаты работы и их обсуждение

По результатам геологических наблюдений установлено, что среди разрывных нарушений преобладают разломы согласные с простиранием ИЗС и, в меньшей степени, расположенные вкрест простирания ИЗС. Углы падения обеих систем крутые (рис. 2).

Сместители большинства разломов выполнены милонитами, достигающими нескольких метров по мощности, а также брекчиями трения и рассланцевания. В зоне поверхностного выветривания (от 6 до 15 м), зоны сместителей расширены и заполнены рыхлым материалом, преимущественно глинистым, с примесью щебня и дресвы.

Преобладающими являются продольные относительно ИЗС и региональной рассланцовки пород разломы. Они нередко меняют направление, разветвляются на более мелкие трещины, часть из которых выклинивается по простиранию. Физическое состояние пород в зонах разломов зависит не только от степени дробления и рассланцевания, но и от вторичной цементации кварцем, кальцитом и турмалином.

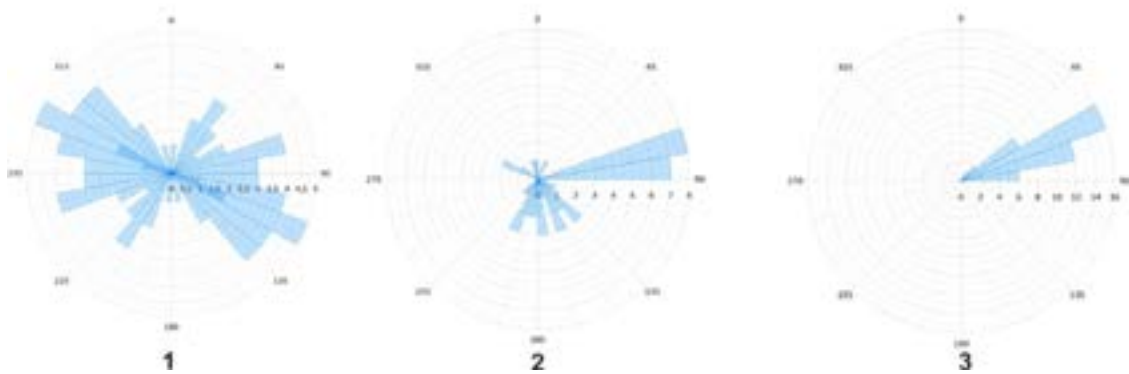


Рис. 2. Розы-диаграммы основных пространственных характеристик сместителей разрывных нарушений: 1 – азимутов простирания; 2 – азимутов падения; 3 – углов падения /
Fig. 2. Rose-diagrams of the main spatial characteristics of fault displacement faults: 1 – strike azimuths; 2 – dip azimuths; 3 – angles of incidence

Результаты, полученные при обработке полевой информации, по каждому из профилей представлены в таблице 1.

Степень радоновой активности разлома отражает показатель K , который представляет собой отношение интенсивности приразломной эманационной аномалии (Q_{\max}) к минимальной величине объемной активности радона за ее пределами.

Таблица 1 / Table 1

Количественные параметры, полученные по данным эманационных исследований в пределах современных границ г. Усть-Каменогорск /
Quantitative parameters obtained from the data of emanation studies within the modern boundaries of the city of Ust-Kamenogorsk

Номер профиля / Profile number	Протяженность профиля, м / Profile length, m	Номер разрывного нарушения / Fault number	Q_{\max}	Q_{\min}	$Q_{\text{ср}}$	K
1	258,1	1	520	89	291,30	5,84
2	303,3	2	507	102	259,14	4,97
3	1480,6	3,4	1940	120	605,63	16,17
4	221,7	3	1025	309	696,00	3,32
5	192	3	1290	229	638,75	5,63
6	635,3	7/3, 5	1309	120	616,58	10,91
7	439	6, 5	1025	160	546,77	6,41
8	1045,9	7/3, 5	1799	200	713,57	9,00
9	1031	7/2, 5	1366	188	656,82	7,27
10	353,1	9	1705	202	731,75	8,44
11	614	9	2053	110	657,94	18,66
12	619	9	2677	190	1231,95	14,09
13	441	26	845	179	448,33	4,72
14	400	26	804	90	323,58	8,93

15	310	10	498	149	247,14	3,34
16	166,5	20	597	152	286,40	3,93
17	1051	20	704	94	265,82	7,49
18	729	24, 23/1	930	213	495,56	4,37
19	542	21	656	40	223,72	16,40
20	370	13	1478	238	810,73	6,21
21	252	12	2482	239	866,44	10,38
22	378	14	1158	347	629,40	3,34
23	132	бн	250	100	162,80	2,50
24	419	14	1639	140	634,61	11,71
25	485	15	629	150	346,44	4,19
26	118	12	902	344	554,86	2,62
27	538	бн	1903	95	632,33	20,03
28	251	17	390	90	203,50	4,33
29	443	33	1150	110	665,64	10,45
30	305	18, 22	2689	439	1233,75	6,13
31	461	15	950	413	693,18	2,30
32	558	16	1790	382	888,54	4,69
33	212	16	736	144	419,00	5,11
34	562	16	1002	249	551,33	4,02
35	248	16	1236	105	570,13	11,77
36	272	18	2077	401	872,82	5,18
37	466	18	903	311	520,07	2,90
38	307	34	819	105	427,14	7,80
39	384	36	311	80	177,44	3,89
40	332	35	1048	104	459,80	10,08
41	442	11	2890	430	1164,11	6,72
42	670	13	850	191	522,79	4,45
43	316	13	1732	455	978,50	3,81
44	452	10	2904	401	1009,78	7,24
45	298	10	1738	438	939,71	3,97
46	369	5, 7/3	923	489	715,88	1,89

Этот параметр меньше, чем Q_{\max} зависит от метеоусловий, мощности перекрывающих осадков и радиоактивности пород, он отражает контрастность радоновой аномалии у разлома.

Рассчитанное среднее фоновое содержание радона в пределах участка исследований составляет $619,4 \text{ Бк/м}^3$. В наиболее простых случаях участок аномальных значений параметра Q имеет в поперечном сечении один максимум с постепенным или ступенчатым снижением концентрации почвенного радона к периферии (рис. 3).

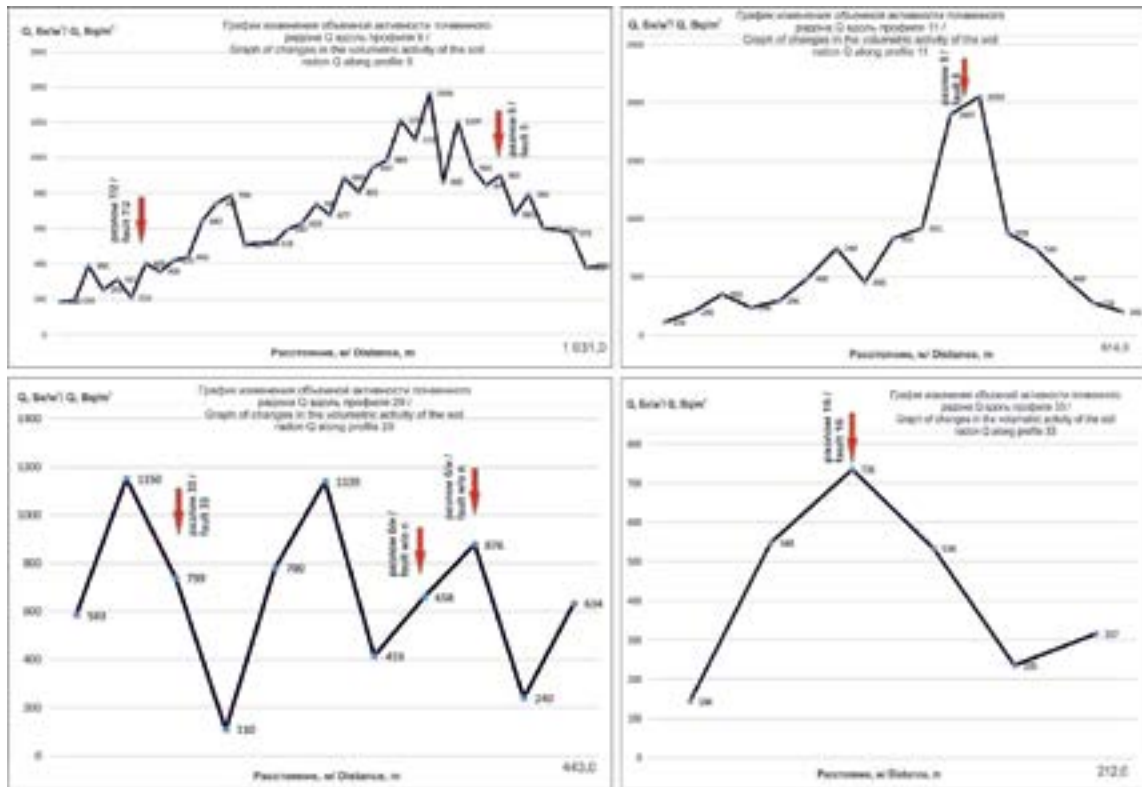


Рис. 3. Типичные графики распределения ОАР /

Fig. 3. Typical graphs of the distribution of RVA

Однако в большинстве изученных ситуаций распределений аномалий радона является более сложным, как правило, прерывистой, что связано с неоднородным строением разломной зоны. Существование в разломной зоне участков с низкой проницаемостью обусловлено наличием тонкодисперсного заполнителя или небольших блоков, почти не нарушенных открытыми разрывами.

Наиболее крупные из разрывов на территории г. Усть-Каменогорска проявляются в виде локальных экстремальных значений Q , – максимумов при заполнении зоны сместителя проницаемой разломной брекчией и минимумов, если тектониты подвергались интенсивному выветриванию или представлены глиной трения.

Выводы

1. Впервые в пределах региональной Иртышской зоны смятия проведены работы с целью уточнения положения разрывных нарушений с помощью геологических маршрутов и профильной эманационной съемки с измерением объемной активности Rn^{222} .

2. По результатам эманационной съемки установлено, что в большинстве случаев вдоль разрывных нарушений фиксируются аномальные значения объемной активности Rn^{222} , что позволяет уточнить положение разломов на местности.

3. Существенные неоднородности в распределении объемной активности Rn^{222} отмечаются вкрест простирания разломных зон и связаны с изменчивостью их проницаемости.

4. Максимальные значения аномалий объемной активности Rn^{222} приурочены к наиболее активным в геодинамическом отношении участкам разломных зон.

Литература

1. Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В. Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области. // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37. №1. – С. 63–81.
2. Бирюлин С.В., Козлова И.А., Юрков А.К. Связь между аномалиями объемной активности радона и процессом подготовки землетрясений (на примере Южных Курил). // Известия Уральского государственного горного университета. – 2021. – №4(64). – С. 62-70. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-4-62-70
3. Добрецов Н.Л. Эволюция структур Урала, Казахстана, Тянь-Шаня и Алтае-Саянской области в Урало-Монгольском складчатом поясе (Палеоазиатский океан). // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44(1-2). – С. 5–27.
4. Ермолов П.В. Актуальные проблемы изотопной геологии и металлогении Казахстана. – Караганда: Издательско-полиграфический центр Казахстанско-Российского университета, 2013. – 206 с.
5. Заалишвили В.Б., Бирюлин С.В., Козлова И.А., Мельков Д.А., Юрков А.К. Закономерности проявления аномалий объемной активности радона перед землетрясениями в различных сейсмоактивных регионах. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №1. – С. 35–50. DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003
6. Кузубный В.С., Ермолаев П.В., Полянский Н.В., Лопатников В.В., Марьин А.М. Магматические формации и комплексы Зайсанской складчатой области и проблема их корреляции. // Проблемы магматической геологии Зайсанской складчатой области. – Алма-Ата: Наука Казахской ССР, 1981. – Т. 40. – С. 4–39.
7. Лопатников В.В., Пономарева А.П., Степанов А.С. Магматизм и рудоносность Калба-Нарымской зоны Восточного Казахстана. – М.: Наука, 1982. – 250 с.
8. Маркин М.Ю., Парада С.Г., Шишкалов И.Ю. Состав и строение Малкинского ультрабазитового массива по результатам переинтерпретации аэромагнитных данных (Кабардино-Балкарская Республика). // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – №3. – С. 98–110.
9. Марьин А.М. Доорогенные магматические и ультраметагенные комплексы Иртышской сдвиговой зоны смятия. // Проблемы магматической геологии Зайсанской складчатой области. – 1981. – Т. 40. – С. 52–72.
10. Матишов Г.Г., Парада С.Г., Давыденко Д.Б. Выбор рудоперспективных площадей по результатам дистанционной флюидоиндексации как фактор рационального недропользования в условиях горных территорий. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2010. – №3(5). – С. 5–62.
11. Сенников Н.В., Ивата К., Ермиков В.Д., Обут О.Т., Хлебникова Т.В. Океанические обстановки седиментации и фаунистические сообщества в палеозое южного обрамления Западно-Сибирской плиты. // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. №1-2. – С. 156–171.
12. Хулелидзе К.К., Кондратьев Ю.И., Заалишвили В.Б., Бетров З.С. Оценка коренных и техногенных месторождений РСО-Алания как возможных объектов применения технологии подземного и кучного выщелачивания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. №1. – С. 46–51. – DOI 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51
13. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №4. – С. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005
14. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007
15. Ambrosino F., Sabbarese C., Roca V., Giudicepietro F., Chiodini G. Analysis of 7-years Radon time series at Campi Flegrei area (Naples, Italy) using artificial neural network method. // Applied Radiation and Isotopes. – 2020. – Vol. 163. – Article 109239. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109239

16. Buslov M.M. Tectonics and geodynamics of the central Asian Foldbelt: the role of late paleozoic large-amplitude strike-slip faults. // *Russian Geology and Geophysics*. – 2011. – Vol. 52. No.1. – pp. 52–71. DOI: 10.1016/j.rgg.2010.12.005

17. Chowdhury S., Deb A., Barman C., Nurujjaman M., & Bora D. K. Simultaneous monitoring of soil Rn-222 in the Eastern Himalayas and the geothermal region of eastern India: an earthquake precursor. // *Natural Hazards*. – 2022. DOI: 10.1007/s11069-022-05235-9

18. Conti L., Picozza P., Sotgiu A. A Critical Review of Ground Based Observations of Earthquake Precursors. // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – No.9. – Article 676766. DOI: 10.3389/feart.2021.676766

19. Firdaus H.L., Luckyarno Y.F., Waruwu M.M., Wijaya R. Detection system for deterministic earthquake prediction based on radon concentration changes in Indonesia. // *Journal of Engineering Science and Technology*. – 2020. – Vol. 15(3). – pp. 1787-1798

20. Sengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. Evolution of the Altiid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. // *Nature*. – 1993. – Vol. 364. – pp. 299-307.

21. Seminsky K.Z., Bobrov A.A., Demberel S. Variations in radon activity in the crustal fault zones: spatial characteristics. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014. – Vol. 50. No.6. – pp. 795–813. DOI: 10.1134/S1069351314060081

22. Utkin V.I., Yurkov A.K., Kosyakin I.I., Shishkanov A.N., Mamyrov E., Kan M.V., Krivashchev S.V. Radon monitoring in the northern Tien Shan with application to the process of tectonic earthquake nucleation. // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2006. – Vol. 42. No.9. – pp. 775–784. DOI: 10.1134/S1069351306090072

23. Vladimirov A.G., Kruk N.N., Khromykh S.V., Polyansky O.P., Vladimirov V.G., Travin A.V., Babin G.A., Kuibida M.L., Vladimirov V.D., Chervov V.V. Permian magmatism and lithospheric deformation in the Altai caused by crustal and mantle thermal processes. // *Russian Geology and Geophysics*. – 2008. – Vol. 49. No.7. – pp. 468–479. DOI: 10.1016/j.rgg.2008.06.006

References

1. Berzin N.A., Kungurtsev L.V. Geodynamic interpretation of the geological complexes of the Altai-Sayan region. *Geology and geophysics*. 1996. Vol. 37. No. 1. pp. 63–81. (In Russ.)

2. Biryulin S.V., Kozlova I.A., Yurkov A.K. Relationship between anomalies of radon volumetric activity and the process of earthquake preparation (on the example of the South Kuriles). *Proceedings of the Ural State Mining University*. 2021. No. 4. Issue 64. pp. 62–70. (In Russ.) DOI:10.21440/23072091202146270.

3. Dobretsov N.L. Evolution of structures of the Urals, Kazakhstan, Tien Shan, and Altai-Sayan region within the Ural-Mongolian fold belt (Paleo-Asian Ocean). *Geology and geophysics*. 2003. Vol. 44. pp. 5–27. (In Russ.)

4. Ermolov P.V. Actual problems of isotope geology and metallogeny in Kazakhstan. Karaganda. Kazakh-Russian University, 2013. 206 p. (In Russ.)

5. Zaalishvili V.B., Biryulin S.V., Kozlova I.A., Melkov D.A., Yurkov A.K. Anomalies of radon volumetric activity before earthquakes in various seismically active regions. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. Pp. 35–50. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.53.28.003.

6. Kuzebny V.S., Ermolaev P.V., Polyansky N.V., Lopatnikov V.V., Maryin A.M. Igneous formations and complexes of the Zaisan folded area and the problem of their correlation. *Problems of igneous geology of the Zaisan folded area*. Alma-Ata, Science of the Kazakh SSR, 1981. Vol. 40. pp. 4–39. (In Russ.)

7. Lopatnikov V.V., Ponomareva A.P., Stepanov A.S. Magmatism and ore content of the Kalba-Narym zone of East Kazakhstan. Moscow. Nauka, 1982. 250 p. (In Russ.)

8. Markin M.Yu., Parada S.G., Shishkalov I.Yu. The composition and structure of Malki-ultrabasite array according to the results of re-interpretation of aeromagnetic data (Kabardino-

Balkar Republic). *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2016. No. 3. pp. 98–110. (In Russ.)

9. Maryin A.M. Preorogenic igneous and ultrametagenic complexes of the Irtysh strike-slip shear zone. *Problems of igneous geology of the Zaisan folded area*. 1981. Vol. 40. pp. 52–72. (In Russ.)

10. Matishov G.G., Parada S.G., Davydenko D.B. Selection of ore-prospective areas based on the results of remote fluid indexation as a factor of rational subsoil use in mountainous areas. *Sustainable development of mountain territories*. 2010. No. 3. Vol. 5. pp. 5–62. (In Russ.)

11. Sennikov N.V., Ivata K., Ermikov V.D., Obut O.T., Khlebnikova T.V. Oceanic sedimentation settings and fauna associations in the Paleozoic on the southern framing of the West Siberian Plate. *Geology and geophysics*. 2003. Vol. 44. No. 1-2. pp. 156–171. (In Russ.)

12. Hulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betrozov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016. Vol. 8(1). pp. 46–51. (In Russ.)

13. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Influence of geodynamic processes on the geocological state of high mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 70–100. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

14. Chotchaev Kh.O., Burdzieva, O.G., Zaalishvili, V.B. Zoning of high mountainous areas by geocological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81–94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007

15. Ambrosino F., Sabbarese C., Roca V., Giudicepietro F., Chiodini G. Analysis of 7-years Radon time series at CampiFlegrei area (Naples, Italy) using artificial neural network method. *Applied Radiation and Isotopes*. 2020. Vol. 163. Article 109239. DOI: 10.1016/j.apradi-so.2020.109239

16. Buslov M.M. Tectonics and geodynamics of the central Asian Foldbelt: the role of late paleozoic large-amplitude strike-slip faults. *Russian Geology and Geophysics*. 2011. Vol. 52. No. 1. pp. 52–71. DOI: 10.1016/j.rgg.2010.12.005

17. Chowdhury S., Deb A., Barman C., Nurujjaman M., Bora D.K. Simultaneous monitoring of soil Rn-222 in the Eastern Himalayas and the geothermal region of eastern India: an earthquake precursor. *Natural Hazards*. 2022. DOI: 10.1007/s11069-022-05235-9

18. Conti L., Picozza P., Sotgiu A. A Critical Review of Ground Based Observations of Earthquake Precursors. *Frontiers in Earth Science*. 2021. No. 9. Article 676766. DOI: 10.3389/feart.2021.676766

19. Firdaus H.L., Luckyarno Y.F., Waruwu M.M., Wijaya R. Detection system for deterministic earthquake prediction based on radon concentration changes in Indonesia. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2020. Vol. 15. No. 3. pp. 1787-1798

20. Sengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. Evolution of the Alaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*. 1993. Vol. 364. pp. 299–307.

21. Seminsky K.Z., Bobrov A.A., Demberel S. Variations in radon activity in the crustal fault zones: spatial characteristics. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2014. Vol. 50. No. 6. pp. 795–813. DOI: 10.1134/S1069351314060081

22. Utkin V.I., Yurkov A.K., Kosyakin I.I., Shishkanov A.N., Mamyrov E., Kan M.V., Krivashchev S.V. Radon monitoring in the northern Tien Shan with application to the process of tectonic earthquake nucleation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2006. Vol. 42. No. 9. pp. 775–784. DOI: 10.1134/S1069351306090072

23. Vladimirov A.G., Kruk N.N., Khromykh S.V., Polyansky O.P., Vladimirov V.G., Travin A.V., Babin G.A., Kuibida M.L., Vladimirov V.D., Chervov V.V. Permian magmatism and lithospheric deformation in the Altai caused by crustal and mantle thermal processes. *Russian Geology and Geophysics*. 2008. Vol. 49. No. 7. pp. 468–479. DOI: 10.1016/j.rgg.2008.06.006