

УДК 551.311.8 : (551.217 : 546.296.027)(477.75)

В.В.Гудзенко<sup>1</sup>

## РАДОН В ГАЗАХ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ

*Приведены результаты изучения спонтанного радона в газах пяти грязевых вулканов Булганакской группы на Керченском полуострове. Исследована также грязевулканическая сопка Трубецкого. Обсуждены четыре возможные модели формирования концентраций этого газа. Оценена связь между составом газов глубинного происхождения, их дебитом и концентрациями радона. Полученные данные могут быть использованы при интерпретации результатов исследования подводных проявлений грязевого вулканизма в прилежащих морях.*

Радиоактивность природных образований, обусловленная наличием в них урана, тория и актиноурана, предопределяет наличие в горных породах и их дочерних продуктах, в частности изотопов радона. На начальных этапах геологических исследований радон использовался в качестве поискового признака радиоактивных руд. Совершенствование методов его измерений в различных средах и накопление информации о концентрациях привело к существенному расширению круга исследовательских задач, решаемых с помощью радона. Помимо чисто геологических (гидрогеологических) проблем, связанных с трассированием тектонических нарушений, выделением зон современной активизации разломов, прогнозом сейсмических событий, радон нашел широкое применение в метеорологии (оценка пропорций смешения воздушных масс различного происхождения), океанологии (определение скорости перемешивания водных масс) и других областях человеческой деятельности. Осознание важнейшей роли радона в формировании доз внутреннего облучения человека (при вдыхании) обусловило развитие экологического (медицинского) направления радоновых исследований.

Изучение концентраций радона в продуктах грязевого вулканизма началось ещё в прошлом веке и продолжается в разных странах мира [6,8,11,12]. Вместе с тем, учитывая специфику изучаемых объектов, многие вопросы формирования и режима этого нуклида ещё ждут своего решения.

В основу настоящего исследования положены результаты мониторинга спонтанных газов, выполнявшегося летом 2007 года на шести грязевулканических объектах Керченского полуострова. Концентрации радона определялись *in situ* с помощью эманометра РГА-1 ("Глициния"). Остальные газовые компоненты определялись хроматографически на приборе "Цвет-3" в Институте геологических наук НАН Украины (аналитик Чурубров Н.С.). Здесь же выполнены эманационные исследования образ-

цов воды, выделенных из сопочных брекчий (аналитики Голикова Т.А. и Гудзенко Г.И.).

Ряд исследователей, изучавших изотопный состав грязевулканических газов, подчеркивают сходство отношений  $^2\text{H}/^1\text{H}$  и  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  с аналогичными параметрами морской (океанической) воды. В частности Мартинелли и др. [6] утверждают, что, независимо от расположения областей грязевого вулканизма и особенностей их геологического строения, выделяемые флюиды имеют общее происхождение и связаны с морской (океанической) водой. Косвенно этот тезис подтверждается наличием многочисленных грязевулканических аппаратов в Азовском и Черном морях в непосредственной близости от района исследований [4]. Подобные структуры известны у побережий Италии (Неаполитанский и Миланский заливы) и Испании (к востоку от Гибралтара) [9].

Основное отличие радона от остальных газов грязевого вулканизма состоит в его радиоактивности. Естественная смесь изотопов радона представлена тремя нуклидами, принадлежащими рядам распада  $^{238}\text{U}$  ( $^{222}\text{Rn}$ ),  $^{232}\text{Th}$  ( $^{220}\text{Rn}$ ) и  $^{235}\text{U}$  ( $^{219}\text{Rn}$ ). Все они — достаточно жесткие альфа-излучатели. Некоторые физические параметры естественных изотопов радона приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Естественные изотопы радона и их предшественники [1].

Нуклид	Наименование, химический символ	Период полураспада, $T_{1/2}$	Энергия $\alpha$ -частиц, кЭв (Выход, %)	Энергия $\gamma$ -квантов, кЭв (Выход, %)	Нуклид предшественник	Период полураспада предшественника
$^{219}\text{Rn}$	Актинон, An	3.96 сек	6425 (7.5) 6553.1(12.2)	271.13(9.9) 401.7(6.64)	$^{223}\text{Ra}$	11.43 суток
$^{220}\text{Rn}$	Торон, Tn	55.6 сек	6288.3(99.9)	549.7(0.07)	$^{224}\text{Ra}$	3.66 суток
$^{222}\text{Rn}$	Радон, Rn	3.825 суток	5489.7(99.9)	510.0(0.07)	$^{226}\text{Ra}$	1600 лет

В силу чрезвычайно малой продолжительности существования, эманации, принадлежащие рядам актиноурана ( $^{219}\text{Rn}$ ) и тория ( $^{220}\text{Rn}$ ), не способны к миграции на сколько-нибудь заметные расстояния от ядер — предшественников, которые, кстати говоря, и сами не отличаются большими периодами полураспада ( $T_{1/2}$ ). Самый долгоживущий изотоп радона —  $^{222}\text{Rn}$  — спустя 20 суток (примерно 5  $T_{1/2}$ ) распадается на 97 %. Иными словами — фиксируемые в спонтанных газах грязевулканических структур концентрации радона, почти со 100 % вероятностью, формируются из источников, расположенных не далее чем в 20 сутках пути миграции флюида от места измерений, т.е. от выхода флюида на дневную поверхность или на дно моря.

Радон, выделившийся из матрицы вмещающей породы, взвесей, или образовавшийся из водорастворенного радия, распределяется между жидкой и газовой фазами в соответствии с законом Генри. При заданной температуре и установившемся равновесии в системе, отношение между полными содержаниями радона в жидкой и газовой фазах соответственно равно:

$$K = M_1^\infty / M_g^\infty = C_1^\infty V_1 / C_g^\infty V_g \quad (1)$$

где:  $K$  — коэффициент распределения (растворимости);  $M_1^\infty$  — содержание радона в жидкой (liquid) фазе;  $M_g^\infty$  — то же в газовой (gaseous) фазе;  $C_1^\infty$  и  $C_g^\infty$  — соответственно концентрации радона в жидкой и газовой фазах;  $V_1$  и  $V_g$  — объемы соответствующих фаз. Знак  $^\infty$  означает, что  $K$  измеряется в условиях межфазового равновесия.

Естественно, условия в восходящем потоке сопочной брекчии далеки от равновесных, тем не менее, общие закономерности межфазовых распределений радона в ней, по-видимому, соблюдаются. Коэффициент распределения в системе жидкость (вода) — газ понижается с повышением температуры и увеличением минерализации жидкой фазы. Зависимость  $K$  от температуры описывается выражением [2]:

$$K = 0,1057 + 0,405 \exp(-0.0502t^\circ) \quad (2)$$

где  $t^\circ$  — температура в  $^\circ\text{C}$ .

При кипячении радон полностью переходит в газовую фазу.

Ещё в 1913 году Г.Егер показал (цитируется по [1]), что для радона

$$K \approx \exp(-E_a/RT) \quad (3)$$

где:  $E_a$  — энергия активации;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура.

Из формулы (3) следует, что с повышением температуры не только уменьшается  $K$ , но резко возрастает скорость установления равновесия между фазами.

Зависимость  $K$  от минерализации (для раствора  $\text{NaCl}$  по данным [2]) аппроксимируется уравнением:

$$K = 0.24 \exp(-0.0088M) \quad (4)$$

где  $M$  — минерализация в  $г \cdot \text{дм}^{-3}$ . М.Кофлером (1912) отмечена зависимость растворимости радона в воде от молекулярного веса раствора. Чем выше молекулярный вес соли, обусловившей рост минерализации, тем менее растворим радон.

Помимо термодинамических условий, существенным фактором дегазации, т.е. перехода радона в газообразную фазу, могут служить также продувка растворов воздухом или каким-либо газом (не содержащим  $\text{Rn}$ ), встряхивание, распыление.

Дегазация растворов, содержащих радон, с целью измерения концентраций последнего, на заре радиохимических исследований проводилась почти исключительно с помощью продувки (барботирования) воздухом или каким-либо газом. При этом отмечалось, что для максимальной дегазации при заданной температуре пузырьки продуваемого воздуха (газа) должны быть небольшими. Интенсивность барботирования необходимо было поддерживать достаточно низкой, чтобы не происходило слияния пузырьков. Различия в степени дегазации, обусловленные режимом барботирования, могут достигать 10-20% и более.

Применительно к грязевому вулканизму, вышеизложенное означает, что на участках АВПВ ("корни" вулканов) радон преимущественно находится в газовой фазе. Исходя из нормального температурного градиента, на глубинах 5—10 км температуры среды должны достигать 150—

300 °С, при которых коэффициент распределения порядка 0.1. Кстати, в обзоре [4] приведены результаты термобарогеохимических исследований, согласно которым температура в очагах грязевых вулканов достигает 130—140 °С, а давление — 40 МПа.

“Продувка” грязевой массы осуществляется при всплывании пузырей газа, генерируемого в канале грязевого вулкана и/или во вмещающих породах на пути восходящей миграции. Скорость всплывания газовых пузырей сквозь густую грязь в подводящих каналах грязевулканических объектов, по-видимому, зависит от вязкости, в свою очередь являющейся функцией влажности и температуры текущей субстанции.

Поступление радона в газовую фазу продуктов грязевого вулканизма в спокойном состоянии также в значительной мере определяется интенсивностью “продувки” сопочной брекчии восходящим потоком газов. При этом их состав не играет при этом никакой роли.

К сожалению, до сих пор измерение расхода спонтанных газов той или иной грязевулканической структуры представляет собой достаточно сложную задачу. На данном этапе известны качественные оценки по всем структурам Керченско-Таманской зоны — 350-500 м<sup>3</sup>/сутки [5].

В ходе мониторинга состава спонтанных газов отмечены существенные различия их расхода и режима. Расход газа существенно меняется от структуры к структуре и зависит от размеров того или иного грифона. Оценки этих параметров приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Сведения о характере газовыделения на объектах мониторинга 14 июля — 13 августа 2007 г.

Объект наблюдений	Характер газовыделения	Расход газа, дм <sup>3</sup> /мин
Центральное озеро (Ц)	Обычно равномерное, однако, в период от 14.07 до 30.07, несколько раз наблюдалось пульсирующее с периодом между выбросами до 8-10 минут	Во время равномерного газовыделения ~ 50-60
Сопка Ольденбургского(О) <sup>1</sup>	Равномерное	~ 5
Сопка Павлова (П)	Пульсирующее с периодом 8 минут, продолжительность импульса ~ 1 минута	Во время импульса ~ 30
Сопка Андрусова (А)	Равномерное	~ 5
Сопка Тищенко (Т)	Более - менее равномерное	~ 2 (4) <sup>2</sup>
Сопка Трубецкого (Тр)	Пульсирующее с периодом 11-13 минут, продолжительность импульса ~ 1 минута	Во время импульса ~ 25

<sup>1</sup> — в пределах сопки Ольденбургского опробовался 1 из 19 грифонов. Практически одновременное опробование 8 различных по интенсивности дегазации грифонов этой структуры, проведенное нами 27 июля 2007 года, обнаружило существенные вариации концентрации радона — от 2.5 до 7.4 Бк/дм<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> — средний дебит газа для сопки Тищенко, оцененный по скорости вытеснения воды из перевернутой бутылки, по сообщению М.А.Деяка, составил 4 литра в минуту (0.067 дм<sup>3</sup>/с). У большинства обследованных сопок он заметно выше.

Большая часть исследованных сопок выводит жидкую сопочную грязь. В этом отношении выделяется сопка Тищенко, густота сопочной брекчии которой гораздо выше остальных. Есть основания полагать, что дегазация “жидкой” грязи выше, чем “густой”.

Состав газовой фракции исследованных объектов достаточно изменчив. По данным хроматографических исследований в них присутствуют: He, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>. Концентрации водорода и гелия в некоторых пробах — ниже предела обнаружения. Как отмечено в [10], в газах “классических” грязевых вулканов преобладает метан, а в структурах, близких к областям лавового вулканизма — углекислый газ.

Сведения о составе газов за период наблюдений представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Вариации состава газов объектов мониторинга за период наблюдений (объемн. %)

Объект	He	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
Ц	<u>0.0001-0.0076</u> 0.0032	<u>0.0021-0.0083</u> 0.0043	<u>0.97-19.53</u> 13.00	<u>3.36-80.68</u> 53.85	<u>0.38-60.64</u> 23.35	<u>0.63-38.51</u> 9.31
О	<u>0.0065-1.0104</u> 0.0437	<u>0.0007-0.0320</u> 0.0081	<u>0.08-7.73</u> 1.98	<u>1.26-40.25</u> 11.19	<u>50.08-94.42</u> 81.38	<u>0.89-9.38</u> 4.02
П	<u>0.0002-0.0043</u> 0.0017	<u>0.0004-0.0224</u> 0.0053	<u>298-20.09</u> 14.08	<u>13.89-78.08</u> 58.23	<u>0.01-46.88</u> 17.39	<u>0.04-35.57</u> 8.52
А	<u>0.0073-0.0172</u> 0.014	<u>0.0003-0.0805</u> 0.0117	<u>0.0244-9.197</u> 0.7617	<u>0.81-41.61</u> 4.26	<u>41.53-95.48</u> 86.67	<u>2.18-13.05</u> 6.90
Т	<u>0.0047-0.0105</u> 0.0083	<u>0.0004-0.0391</u> 0.0091	<u>0.062-8.632</u> 1.71	<u>0.78-34.82</u> 8.51	<u>50.39-95.24</u> 82.03	<u>1.15-11.17</u> 6.30
Тр	<u>0.0002-0.0018</u> 0.0006	<u>0.0008-0.0369</u> 0.0125	<u>0.27-10.05</u> 3.19	<u>1.14-45.18</u> 14.78	<u>16.86-44.21</u> 32.26	<u>23.36-65.34</u> 48.73

Приведенные в таблице цифры в целом совпадают с результатами предшествующих исследований состава сопочных газов [5].

Концентрации радона в спонтанных газах измерялись в этих же источниках с 14 по 30 июля ежедневно приблизительно (в пределах получаса) в одно и то же время суток. Результаты измерений представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Вариации концентраций радона объектов мониторинга (Бк/дм<sup>3</sup>)

Объект	Ц	О	П	А	Т	Тр
Параметр						
Минимум	0.60	0.81	0.49	0.86	0.31	0.73
Максимум	8.70	5.20	4.60	5.10	4.90	4.90
Среднее	3.24	3.03	2.44	2.95	3.02	2.91

Как видно из таблицы 4, и экстремальные и, особенно, средние значения концентраций радона в спонтанных газах исследованных объектов чрезвычайно монотонны, что свидетельствует о сходстве механизмов их формирования. Самые высокие значения максимумов отмечаются в газах Центрального озера, расход которых, по нашим грубым оценкам, заметно выше расходов остальных источников. Естественно, говорить о сколько-нибудь заметной корреляции между отдельными компонентами газового состава достаточно сложно. Оценки корреляции между содержаниями радона и метана, радона и углекислого газа во всех исследованных объек-

тах за период с 14 по 30 июля 2007 года выявили только один значащий случай — для пары радон-метан в газах сопки Ольденбургского ( $K_K = 0.641$  при  $n = 15$ ). В какой-то степени приближается к значащим величинам  $K_K$  для этой же пары в газах Центрального озера.

Значения коэффициентов корреляции представлены в виде графика на рисунке 1.

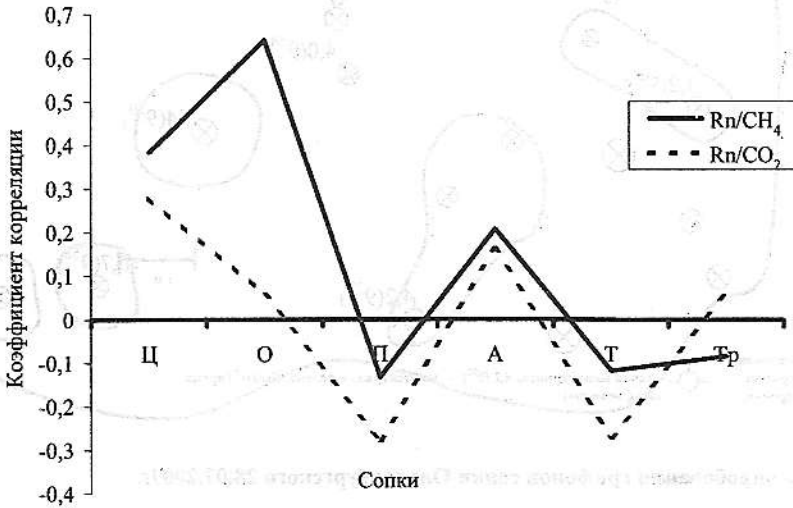


Рис. 1. Корреляция между объемной активностью радона и объемными концентрациями метана и углекислого газа.

Поведение углекислого газа по отношению к радону в целом такое же, как и метана. Это, по-видимому, объясняется сходством происхождения этих газов — формирование на больших глубинах, возможно, присутствие мантийной составляющей.

Упомянутые выше особенности распределения радона в системе жидкость — газовая фаза, по-видимому, присущи и другим газам. Поэтому, по мере подъема сопочной брекчии (грязи) к дневной поверхности, концентрации спонтанных газов должны расти, а всплывающие газовые пузыри — ускорять переход водорастворенного радона в газовую фазу.

Как уже упоминалось, 28 июля выполнена серия измерений концентраций радона на 7 грифонах сопки Ольденбургского, не считая грифона, включенного в сеть мониторинга. Результаты измерений представлены на схеме (рис. 2). Как видно из рисунка, практически одновременное опробование нескольких грифонов в пределах небольшой структуры показало существенный разброс концентраций радона в спонтанном газе, безусловно, выходящий за пределы погрешности измерений. Трудно представить себе, что каждый из грифонов имеет собственный подводный канал. Вероятнее всего, все они питаются из единого источника сопочной брекчии (грязи), разделяясь на отдельные струи вблизи земной поверхности. Грифон, используемый в качестве режимной точки, оказался далеко не самым активным по радону. Просматривается тенденция к увеличению концентраций радона при увеличении размеров и росте дебита газа того или иного источника.

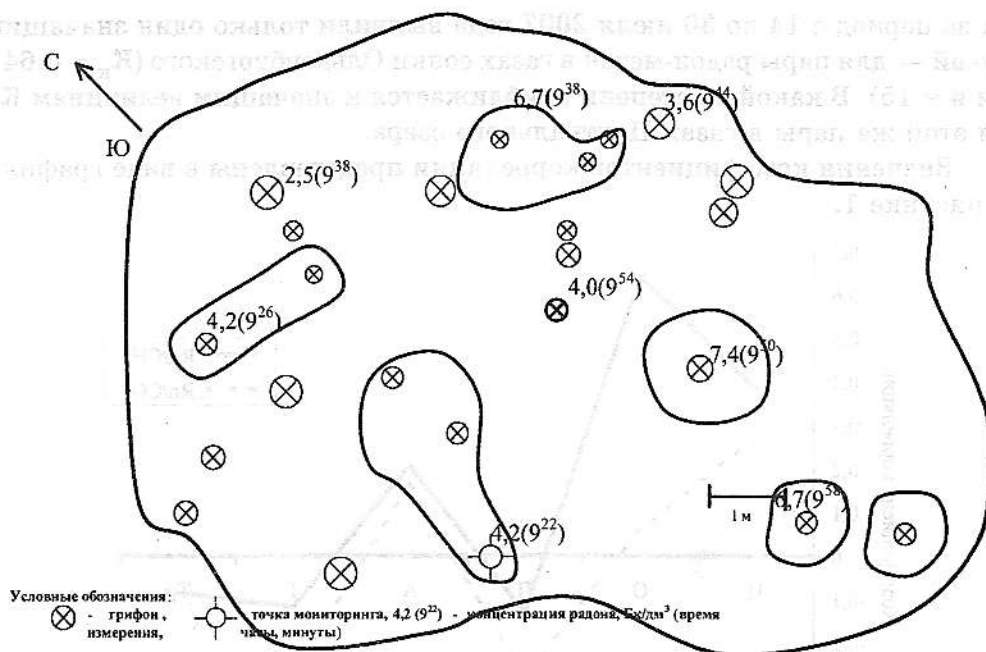


Рис.2. Схема опробования грифонов сопки Ольденбургского 28.07.2007г.

Иными словами, этот феномен подтверждает существенное влияние характера дегазации (в данном случае — интенсивности барботирования грязи восходящим потоком газа) на концентрации спонтанного радона.

Отсутствие соответствующего оборудования, в данном случае барботеров и/или промывалок, не позволило измерить концентрации водоразворенного радона в ходе мониторинга спонтанных газов. Попытки такого рода были предприняты в лаборатории радиогидрогеологических методов исследования ИГН НАНУ в Киеве на образцах сопочных брекчий, хотя с момента отбора проб прошло от 2 недель и больше, т.е. большая часть радона к моменту измерений уже распалась. Результаты эманиционных измерений, в предположении, что основная доля газа поступила в воду из пород на периферии жерла сопки, представлены в таблице.

Таблица 5.  
 Концентрации радона в жидкой фазе сопочной брекчии некоторых грязевых вулканов Бк/дм<sup>3</sup>.

Место отбора	<sup>222</sup> Rn	Примечание
Сопка Андрусова	27 ± 2	Отбор проб из осветленной части столба сопочной брекчии,
То же	17 ± 2	
Сопка Тищенко	40 ± 3	отстоявшейся в ПЭТ бутылках.
Сопка Ольденбургского	16 ± 2	
Сопка Павлова*	56 ± 4	
Сопка Трубцского	6 ± 1	

\*- при отборе в промывалку попало некоторое количество взвеси.

Как следует из таблицы 5, практически все цифры, полученные с учетом поправки на распад избыточного радона, за исключением, пожа-

луй, сопки Трубецкого, значительно превосходят измерявшиеся в спонтанном газе концентрации.

Даже если учесть, что температура сопочной брекчии на выходе обычно близка к 19 °С, при которой коэффициент распределения равен примерно 0.25, приведенные в таблице 5 результаты представляются сильно завышенными. Одной из причин этого явления может быть существенное влияние радия, содержащегося во взвесах. Результаты  $\gamma$ -спектрометрических измерений отобранных образцов сопочных брекчий представлены в таблице 6.

Таблица 6.

Концентрации естественных гамма-излучателей в сухом веществе (Бк/кг).

Место отбора	Уран		Радий по $^{214}\text{Pb}$	Торий по $^{212}\text{Pb}$	$^{235}\text{U}$
	по $^{234}\text{Th}$	по $^{235}\text{U}$			
Центральное озеро*	29 ± 7	64 ± 6	27 ± 3	33 ± 4	3.0 ± 0.3
с. Андрусова	184 ± 41	67 ± 17	38 ± 6	34 ± 6	3.1 ± 0.8
с. Тищенко	45 ± 29	45 ± 13	33 ± 4	33 ± 4	2.2 ± 0.6
с. Ольденбургского	<143	41 ± 22	31 ± 6	34 ± 6	1.9 ± 1.2
с. Павлова	87 ± 51	71 ± 25	24 ± 4	33 ± 5	3.3 ± 1.1
с. Трубецкого	41 ± 8	77 ± 15	30 ± 3	33 ± 4	3.6 ± 0.7

\* — из почвенной колонки в интервале 0-5 см.

Как видно из таблицы 6, исследованные образцы предварительно высушенной сопочной брекчии весьма монотонны по содержанию радия и, особенно, тория. Большой разброс для изотопов урана обусловлен большими погрешностями радиометрических определений.

Сопочные брекчии имеют чрезвычайно высокую влажность, в частности проба 1755 — 446% (определение Г.И.Гудзенко термостатно-весовым методом). Иными словами, масса твердой фазы (взвешенных в сопочной грязи частиц) относится к массе жидкости в ней как 1: 4.5. Возможны вариации в пределах 1: 2 — 1: 5. Основным источником радона в их жидкой фазе вероятнее всего является  $^{226}\text{Ra}$ , присутствующий во взвесах, и водорастворенный. В отличие от опробования подземных вод, основным источником радона в которых является радий водовмещающих пород, при отборе проб сопочной брекчии разделения радона между фазами не происходит или оно пренебрежимо мало. С учетом этого обстоятельства, в измеренные концентрации водорастворенного радона нет нужды вводить поправки за распад. В таком случае концентрации радона оказываются значительно меньше приведенных в таблице 5.

Сравнение концентраций водорастворенного и спонтанного радона приведено в таблице 7.

Если принять среднюю влажность сопочной брекчии исследуемой группы грязевых вулканов равной 300%, в 1  $\text{дм}^3$  грязи будет содержаться на взвесах около 10 Бк  $^{226}\text{Ra}$ . Даже при относительно невысоких значениях коэффициентов эманирования, этого количества более чем достаточно, чтобы обеспечить наблюдаемые концентрации как спонтанного, так и водорастворенного радона.



Таблица 7.  
Концентрации радона в жидкой и газовой фазах сопочной брекчии некоторых грязевых вулканов, Бк/дм<sup>3</sup>

Место отбора	Концентрация радона	
	Водорастворенный	Спонтанный
Сопка Андрусова	1.65 ± 0.14	2.14 ± 0.64
То же	0.94 ± 0.11	1.93 ± 0.58
Сопка Тищенко	1.83 ± 0.15	3.80 ± 1.14
Сопка Ольденбургского	1.05 ± 0.13	2.80 ± 0.84
Сопка Павлова	2.6 ± 0.2	0.92 ± 0.28
Сопка Трубецкого	0.93 ± 0.11	1.00 ± 0.30

Для некоторых проб удалось измерить концентрации изотопов радия (226 и 228) в жидкой фазе сопочной брекчии. Вода собиралась после отстаивания в течение нескольких дней, а влажная грязь из остатков фильтровалась под вакуумом на воронках Бюхнера. Вода Центрального озера отбиралась из закопушки на периферии объекта. Объем собранной жидкой фазы колебался от 0.2 до 0.8 дм<sup>3</sup>, что в известной мере ограничивало чувствительность определений. Результаты эмансионных измерений, выполненных в ИГи НАНУ на установке "Альфа-1м" (РГА-3), представлены в таблице 8.

Таблица 8.  
Изотопы радия в жидкой фазе сопочной брекчии, мБк/дм<sup>3</sup>.

Место отбора	Дата отбора	<sup>226</sup> Ra	<sup>228</sup> Ra
Сопка Андрусова	14.07.2007	151 ± 27	36 ± 36
То же	21.07.2007	148 ± 38	165 ± 64
Сопка Тищенко	22.07.2007	241 ± 50	нд
Сопка Ольденбургского	То же	123 ± 17	54 ± 31
Центральное озеро *	26.07.2007	186 ± 13	67 ± 22
Сопка Трубецкого	27.07.2007	111 ± 16	80 ± 29

\* — вода без взвесей

Как видно из таблицы 8, концентрации изотопов радия в жидкой фазе сопочных брекчий достаточно высоки. Они не столь монотонны, как в твердой фазе, что в какой-то степени объясняется высокими погрешностями измерений (как следствие малых объемов проб).

Следует отметить, что концентрации изотопов радия в жидкой фазе сопочных брекчий в несколько раз превосходят значения, характерные для подземных вод региона.

Рассмотрим несколько гипотез (моделей) формирования концентраций радона в спонтанных газах грязевых вулканов. Поступление газа в жидкую фазу возможно за счет:

1. Радия, находящегося в породах на пути восходящего движения выдавливаемой грязи;
2. Радия, находящегося в твердой фазе грязи (во взвесах);
3. Водорастворенного радия в жидкой фазе грязи;

4. Гипотетического глубинного источника (по аналогии с гелием, метаном, азотом и другими нерадиоактивными газами).

Аргументы за и против той или иной гипотезы представлены в таблице 9.

Таблица 9.

Гипотезы о происхождении радона в спонтанном газе грязевых вулканов Керчи

Гипотеза	За	Против
1	Контакт восходящего потока жидкости с породами на периферии ствола осуществляется на протяжении километров. В осадочном разрезе, перекрывающем зоны АВПД, являющиеся "корнями" структур, не исключено присутствие участков с повышенным содержанием радия.	Переход радона из порового пространства вмещающих пород в газ или жидкость определяется, в значительной мере, коэффициентами эманирования ( $K_e$ ). В свою очередь $K_e$ зависит, среди других параметров, от открытости пор, и обычно составляет единицы-десятки процентов. В условиях избыточного давления столба сопочной грязи рассчитывать на открытые поры, и, соответственно, на высокие значения $K_e$ , не приходится.
2	Концентрации радия в твердой фазе сопочной брекчии, представляющей из себя типичную взвесь, достаточно высоки. В отличие от твердых веществ, $K_e$ расплавов и растворов теоретически может достигать 100%. Т.е. весь образовавшийся из радия радон способен перейти в жидкую фазу. Взвеси, особенно тонкие, по-видимому, занимают промежуточное положение по $K_e$ между растворами и твердой фазой.	
3	Концентрации $^{226}\text{Ra}$ в жидкой фазе — воде сопочных брекчий — определенные эманационным методом, колеблются от 111 до 241 мБк/дм <sup>3</sup> . Хотя эти величины заметно уступают измеренным концентрациям радона в жидкой и газообразной фазах, они достаточно весомы, чтобы эффект накопления радона из водорастворенного радия по крайней мере учитывался.	
4	Теоретически можно себе представить наличие на некоторой глубине мощного скопления радия (эманлирующий коллектор) во вмещающих породах.	Малая продолжительность жизни изотопа $^{222}\text{Rn}$ ( $T_{1/2} = 3.825$ суток) ограничивает глубину, на которой может располагаться подобное скопление, произведением скорости подъема сопочной грязи на пятикратный период полураспада радона. Для того, чтобы на выходе структуры, имеющей глубину 5 км, был зафиксирован "глубинный" радон, скорость подъема грязи должна составлять не менее 261 метра в сутки (0.3 см/сек).

Наименее противоречивыми представляются гипотезы 2 и 3, хотя вклад некоторой доли радона, поступающего в сопочную брекчию из вмещающих пород на пути восходящей миграции, представить можно. Ни одна из исследованных структур не обладала скоростью подъема столба

грязи, соответствующей предпосылкам гипотезы 4. Помимо этого, нет серьёзных оснований предполагать наличие эманулирующих коллекторов в данных геологических условиях.

Перспективы спонтанного радона как предвестника сейсмических событий следует оценить как невысокие, учитывая специфику его формирования в пределах жидкой фазы продуктов извержений. В этом плане, несомненно, предпочтительнее подземные воды, формирующиеся за счет эманулирования радия твердой матрицы — водовмещающих пород на пути фильтрации. Напряженное состояние пород в период подготовки землетрясений находит отражение в изменениях  $K_3$ , о чем свидетельствует обширная литература.

Что касается попыток такого рода, осуществленных, в частности, итальянскими исследователями [6,8]: в более ранних работах сейсмопрогностические перспективы радона грязевых вулканов Северных Апеннин оцениваются достаточно высоко, однако в более поздних — возрастает доля скепсиса.

Изменения термодинамических условий в очагах формирования газов грязевого вулканизма в первую очередь должны сказываться на концентрациях газов глубинного происхождения, возможно, на вариациях изотопного состава гелия, концентрациях ртути и т.п.

### Выводы

1. Концентрации радона в спонтанных газах исследованных структур Керченского полуострова за период наблюдений не превышали  $9 \text{ Бк/дм}^3$ .

2. Спонтанный радон в газах Булганакской грязевулканической структуры формируется преимущественно за счет радия, содержащегося во взвешях сопочных брекчий.

3. Наблюдаемые вариации спонтанного радона определяются в первую очередь процессами дегазации жидкой грязи.

4. Степень дегазации сопочной брекчии, помимо термодинамических условий, определяется режимом и расходом остальных газов независимо от их состава, т.е. интенсивностью барботирования.

5. Вклад глубинной составляющей радона едва ли заметен, в отличие от метана, углекислого газа, гелия.

6. Возможность использования данных мониторинга радона в спонтанных газах грязевых вулканов Керченского полуострова для прогноза сейсмических событий, по нашему мнению, уступает потенциалу газов глубинного происхождения.

7. Полученные в результате выполненных работ данные могут быть полезны при интерпретации результатов измерений на факелах над подводными грязевулканическими структурами Азовского и Черного морей.

1. Гудзенко В.В., Дубинчук В.Т. Изотопы радия и радон в природных водах М.: Наука, 1987, 159 с.

2. Пермяков В.М. Радиоактивные эманации, М.-Л., Изд-во АН СССР, 1963, 175 с.

3. Сердюкова А.С., Капитанов Ю.Т. Изотопы радона и продукты их распада в природе. Атомиздат. М., 1975, 296 с.

4. Шнюков Е.Ф., Гнатенко Г.И., Нестеровский В.А. и др. Грязевой вулканизм Керченско-Таманского региона К., Наукова думка, 1992. \_ 200 с.
5. Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков Н.А. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона, ОМГОР НАН Украины, ГУПКС "Кубаньгеология", Краснодар 2005. 176 с.
6. Albarello D., Lappena V., Martinelli, G., Telesca L. Extracting quantitative dynamics from  $^{222}\text{Rn}$  gaseous emission of mud volcanoes // *Environmetrics*, Vol. 14, issue 1, pp 63-71, 2003.
7. *Edgardo Browne, Richard B. Firestone Table of Radioactive Isotopes. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons 1986,*
8. *Martinelly G., Albarello D., Mucciarelli M. Radon emission from mud volcanoes in Northern Italy: Possible connection with local Seismicity // Geophysical Research Letters, Vol. 22, No 15, 1995, pp 1982-1992.*
9. *Martinelly G., Dadomo A. Geochemical Model of Mud Volcanoes from Reviewed Worldwide Data. Short review. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Mud Volcanism, Geodynamics and Seismicity Baku, Azerbaijan 20—22 May 2003.*
10. *Martinelly G., Judd A. Mud volcanoes of Italy. John Wiley & Sons, Ltd. 2004.*
11. *Nevinski J, Nevinski V, Ferronski V, Tsvetkova T. and Paniushkin V. An attempt to determine the Tritium,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  and Radon in territory of mud volcano in Taman. // *Radiation Measurements*, Vol. 34, No 1, June 2001, pp 349-353 .*
12. *Yang T.F., Chou C.U., Chen C.-H., Jiang J.H. Exhalation of radon and its carrier gases in SW Taiwan // *Radiation Measurements*, Vol. 36, No 1, June 2003, pp 425-429.*
13. *Jurado M.-J. Leg-160 (Mediterranean 1) mjurado@gpiwb3.physik.uni-karlsruhe.de*

Наведено результати вивчення вмісту спонтанного радону у газах п'яти грязевих вулканів Булганацької групи на Керченському півострові. Досліджено також грязьовулканічну сопку Трубецького. Обговорено чотири можливі моделі формування концентрацій цього газу. Оцінено зв'язок між складом газів глибинного походження, їхнім дебітом та концентраціями радону. Дані, що отримані, можуть бути використані під час інтерпретації результатів дослідження підводних проявів грязьового вулканізму в прилеглих морях.

Results of the spontaneous Radon investigations in the gases of five mud volcanoes of Bulganak group at the Kerch peninsula described. The mud volcano Trubetskoj had been studied too. The relation between deep origin gaseous components, their discharge and Radon's concentrations estimated. Four possible models of Radon concentration formation discussed. Data obtained may be used during the interpretation of the results of submarine mud volcanism manifestations' investigations in the adjoining seas.