

УДК 622:539.16.04:615.835

ПОЛЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Черный К.А.

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: chernyy_k@mail.ru

Применение материалов на основе природных калийных солей является известным способом создания качественной, вплоть до лечебной, воздушной среды помещений, которая модифицируется ввиду влияния естественной радиоактивности сильвинита и карналлита. Облицовка или декорирование ограждающих поверхностей стен, пола или потолка специальных наземных комплексов – спелеоклиматических камер – насыщают воздух помещения легкими аэроионами. На примере горных пород Верхнекамского калийного месторождения рассмотрены основные закономерности проявления β - и γ -излучения радиоактивного изотопа ^{40}K как основного химического элемента, входящего в состав калийных солей. Исследованы мощность экспозиционной дозы γ -излучения и плотность потока с поверхности β -излучения естественных (природных) блоков калийных солей Верхнекамского месторождения. Полученные зависимости и характерные оценки позволяют обосновать рациональное и безопасное с точки зрения радиационного фактора применение строительных и отделочных материалов на основе калийных солей, обоснованно определить требования и оптимальные параметры пространственного проектирования спелеоклиматических камер.

Ключевые слова: калийная соль, сильвин, сильвинит, спелеоклиматическая камера, калий-40, бета-излучение, гамма-излучение, ионизация воздуха

FIELDS OF IONIZING RADIATION EMANATED FROM MATERIALS BASING ON POTASH SALT

Chernyy K.A.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: chernyy_k@mail.ru

Use of materials based on natural potassium salts is a known way to create high-quality, in some cases curative, indoor air, which is modified due to the impact of natural radioactivity of sylvinite and carnallite. Lining or decorating surfaces of walls, floor or ceiling of special purpose rooms – speleoclimatic cameras – leads to small air ion saturation of indoor air. Main regularities of beta- and gamma- radiation of ^{40}K radioactive isotope which is a basic chemical element of the potassium salt are studied using rocks of Verkhnekamskoye potash deposit. We investigated the exposure dose of gamma-radiation and surface flux density of beta-emission both from natural rock blocks of Verkhnekamskoye potash deposits. The results and typical estimations allows to justify the rational and safe usage of potash salt building materials in terms of radiation and to reasonably determine the requirements of optimal spatial design of speleoclimatic cameras.

Keywords: potassium salt, sylvite, sylvinit, speleoclimatic camera, potassium-40, beta radiation, gamma radiation, air ionisation

Известно, что одним из основных биологически активных факторов горных пород и определенных, естественных или искусственно пройденных, подземных полостей (в частности горных соляных выработок [6]) являются низкие дозы радиоактивных излучений [7]. Для создания уникального микроклимата замкнутых помещений все шире используются специальные комплексы – спелеоклиматические камеры [1], в которых в облицовочных материалах и/или материалах несущих конструкций применяется сильвинитовая или галитовая руда. В силу влияния природных солей воздушная среда в таких комплексах обладает уникальными свойствами [4].

В настоящее время накоплен определенный экспериментальный материал о том, что в качестве одного из параметров качества воздушной среды выступает высокая объемная концентрация легких аэро-

ионов [10]. Вместе с тем пока отсутствуют работы, обобщающие с единых физических позиций разрозненные теоретические и экспериментальные результаты, позволяющие выявить закономерности повышенного ионно-содержания воздушной среды в горных соляных выработках. Исследования ограничиваются, как правило, либо выполненными измерениями излучений [9], либо измерениями параметров ионно-содержания [8] без рассмотрения пространственных характеристик факторов, обуславливающих формирование аэроионного состава.

Целью настоящей работы является проведение исследований полей радиоактивных излучений, характерных для калийных солей и материалов на их основе, их сопоставление с известными теоретико-эмпирическими закономерностями распространения излучений и на основе проведенного анализа выявление закономерностей

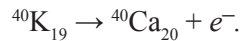
реализации механизмов ионообразования, обусловленных естественной природной ионизацией.

Теоретико-эмпирические закономерности распространения излучений калийных солей

Основной вклад в аэроионообразование в горных выработках калийной соли, равно как и в спелеоклиматических камерах, следует ожидать от ионизирующего излучения калия, который входит в химический состав калийно-магниевых солей.

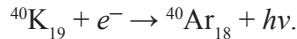
В природе калий состоит из двух стабильных изотопов ^{39}K (93,08%), ^{41}K (6,91%) и одного радиоактивного – ^{40}K (0,0117%), причем изотоп ^{40}K распадается двумя разными путями.

В результате β -распада (89,28%) ^{40}K превращается в стабильный изотоп ^{40}Ca :



Эманированные β -частицы (средняя энергия излучения 0,541 МэВ, граничная (максимальная) энергия – 1,322 МэВ) присоединяются к внешним оболочкам атомов и молекул воздуха и образуют отрицательно заряженные аэроионы.

Второй тип распада атомы изотопа ^{40}K претерпевают путем К-захвата (10,72%) и трансформируются в ^{40}Ar , ядро которого, переходя в стабильное состояние, образует γ -квант с энергией 1,505 МэВ:



Как известно β -частицы, проходящие через вещество, испытывают упругие и неупругие взаимодействия с ядрами и электронами окружающей среды. Взаимодействие β -частицы с атомными электронами приводит к передаче им некоторой энергии, следствием чего является либо ионизация, либо возбуждение атома. Оба вида передачи энергии, имеющие общее название «ионизационные потери», реализуются примерно равновероятно.

Связь между плотностью потока Φ (частиц $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) β -частиц, прошедших через слой поглотителя, и плотностью потока β -частиц Φ_0 , эманлируемых из калийной руды, удовлетворительно описывается формулой

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\mu_\beta h), \quad (1)$$

где μ_β – коэффициент поглощения β -частиц; h – толщина слоя поглотителя, в качестве которого в рассматриваемом случае может выступать либо сама калийная порода, либо

воздух. Отметим, что в качестве μ_β можно использовать массовый коэффициент ослабления, выраженный в $\text{см}^2/\text{г}$, при этом толщину слоя воздуха h следует выражать в $\text{г}/\text{см}^2$.

Для граничной (максимальной) энергии E_β β -частицы в диапазоне $0,5 \leq E_\beta \leq 6,0$ МэВ справедливы приближенные выражения для массового коэффициента ослабления:

$$\mu_\beta \approx \frac{15,5}{E_\beta^{1,41}} \approx \frac{17}{E_\beta^{1,43}} \approx \frac{22}{E_\beta^{1,33}}, \text{ см}^2/\text{г}. \quad (2)$$

Линейные коэффициенты поглощения β -частиц с характерной для изотопа ^{40}K граничной энергией $E_\beta = 1,322$ МэВ для воздуха $\mu_{\beta\text{возд}}$, вычисленные по различным эмпирическим формулам (2), соответственно будут равны

$$\begin{aligned} \mu_{\beta\text{возд}} &= \mu_\beta \cdot \rho_{\text{возд}} = (12,2 \pm 2,3) \cdot 1,204 \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,015 \pm 0,003 \text{ см}^{-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\rho_{\text{возд}} = 1,204 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$ – плотность воздуха при температуре $+20^\circ\text{C}$.

Максимальный пробег h_{max} , см, β -частицы с граничной энергией E_β , МэВ, при которой все β -частицы поглощаются в среде плотностью ρ , $\text{г}/\text{см}^3$, для диапазона граничных энергий $E_\beta = 0,8-3,0$ МэВ вычисляется как

$$\rho \cdot h_{\text{max}} = 0,542 E_\beta - 0,133 \text{ г}/\text{см}^2. \quad (4)$$

Согласно [2] с погрешностью не более $\pm 5\%$ максимальный пробег β -частицы с граничной энергией $E_\beta = 0,5-3$ МэВ рассчитывается по формуле

$$\rho \cdot h_{\text{max}} = 0,52 E_\beta - 0,09, \text{ г}/\text{см}^2. \quad (5)$$

Наибольшее применение для оценки h_{max} при $0,3 \text{ МэВ} < E_\beta < 3 \text{ МэВ}$ нашло эмпирическое соотношение Фламерсфельда:

$$\rho \cdot h_{\text{max}} \approx 0,11 \left[\sqrt{1 + 22,4 E_\beta^2} - 1 \right], \text{ г}/\text{см}^2. \quad (6)$$

Максимальные пробеги β -частиц с характерной для изотопа ^{40}K граничной энергией $E_\beta = 1,322$ МэВ в воздухе $h_{\text{max}\text{возд}}$, вычисленные по эмпирическим формулам (4)–(6), дают $h_{\text{max}\text{возд}} \approx 490 \pm 6$ см. Отметим, что полученные значения характеризуют именно максимальные значения и представляются завышенными при оценке линейных размеров присутствия продуктов действия радиоактивных излучений. Действительно, полученные выше различными теоретико-эмпирическими подходами значения длины свободного пробега β -частиц в воздухе

$h_{\text{max}}^{\text{возд}}$ превышают известные данные [5], согласно которым при $\bar{E}_\beta \approx 0,5$ МэВ длина пробега β -излучения в воздухе порядка 120 см.

Наиболее полезным на практике представляется использование выражения (1) с учетом (3), которые показывают, что с вероятностью 0,99 поглощение β -излучения в воздухе происходит на расстояниях 300–440 см.

Во всех трех процессах взаимодействия (фотоэффект, Комптон-эффект, эффект образования электрон-позитронных пар) первичного гамма-кванта с воздухом часть энергии преобразуется в кинетические энергии электронов и позитронов, а часть – в энергию вторичного фотонного излучения.

Формирование дозы γ -излучения происходит в два этапа. На первом этапе γ -кванты, взаимодействуя со средой, создают заряженные частицы и вторичное косвенно ионизирующее излучение [3]. На втором этапе заряженные частицы передают энергию веществу. Существенное различие между этими двумя этапами заключается в том, что передача энергии γ -квантами заряженным частицам и передача энергии от заряженных частиц веществу происходит в разных точках среды. Действительно, доза на поверхности раздела «сильвинитовый блок – воздух» определяется заряженными частицами, приходящими только из заднего полупространства. С увеличением глубины к ним добавляются частицы, приходящие из слоя воздуха между поверхностью сильвинитового блока и рассматриваемой точкой; это приводит к возрастанию дозы. Одновременно в этом же слое воздуха идут процессы поглощения и рассеяния γ -квантов, что уменьшает дозу. Таким образом, формирование дозы γ -излучения обусловлено двумя противоположно действующими факторами. До некоторой глубины R_0 преобладает

первый фактор (приход электронов), после глубины R_0 преобладает второй фактор (ослабление первичного излучения). На глубине поглотителя (воздушной среды помещения) R_0 доза принимает максимальное значение.

Экспериментальное исследование полей радиоактивных излучений

Поскольку ^{40}K является источником и β -излучения, и γ -излучения, были исследованы пространственные изменения мощности экспозиционной дозы γ -излучения, мкР/ч и плотности потока β -излучения, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, в помещении размерами 10,0×6,0×3,0 м, стены которого облицованы естественными (природными) блоками калийных солей Верхнекамского месторождения, на полу рассыпаны куски калийной соли.

Измерения уровней ионизирующих излучений проводились комбинированным прибором РКСБ-104, позволяющим регистрировать β - и γ -излучение.

Исследования проведены в пространственной сетке с шагом 0,5 м. Статистически обработанные результаты исследований полей ионизирующих излучений, состоящие из серий 10 измерений в каждой точке, представлены в табл. 1 и на рисунке.

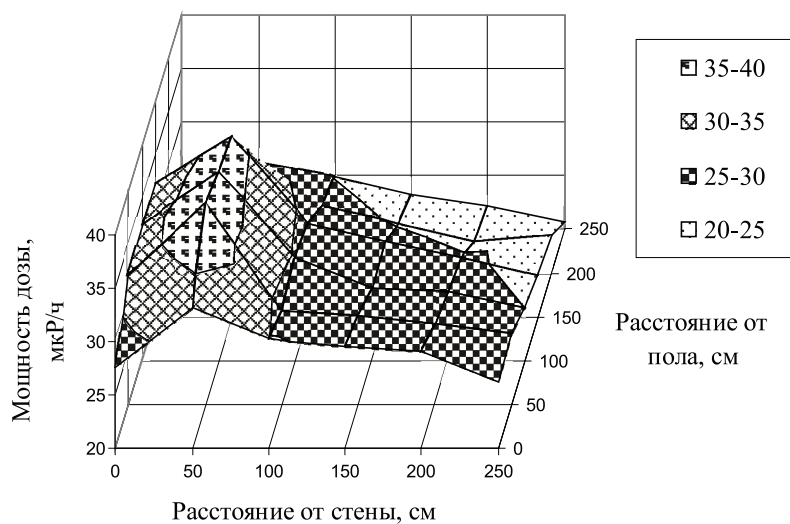
Результаты исследования и их обсуждение

Полученные результаты пространственного распределения плотности потока β -частиц (табл. 1) с доверительной вероятностью порядка 0,99 согласуются с теоретическим выражением (1), а результаты аппроксимации представленных экспериментальных данных (табл. 2) показывают, что величина линейного коэффициента поглощения β -частиц $\mu_{\text{возд}} = 0,013 \pm 0,002 \text{ см}^{-1}$, что согласуется с эмпирическими оценками (3).

Таблица 1

Поле бета-излучения

Расстояние от пола, см	Плотность потока β -излучения, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$					
	Расстояние от стены, см					
	0	50	100	150	200	250
250	$0,37 \pm 0,04$	$0,18 \pm 0,07$	$0,09 \pm 0,006$	$0,04 \pm 0,003$	$0,02 \pm 0,001$	$0,008 \pm 0,001$
200	$0,37 \pm 0,03$	$0,19 \pm 0,08$	$0,10 \pm 0,007$	$0,05 \pm 0,002$	$0,03 \pm 0,002$	$0,010 \pm 0,001$
150	$0,38 \pm 0,02$	$0,21 \pm 0,06$	$0,12 \pm 0,005$	$0,06 \pm 0,003$	$0,03 \pm 0,001$	$0,010 \pm 0,001$
100	$0,39 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,07$	$0,14 \pm 0,006$	$0,09 \pm 0,004$	$0,04 \pm 0,002$	$0,025 \pm 0,001$
50	$0,44 \pm 0,04$	$0,23 \pm 0,08$	$0,15 \pm 0,007$	$0,08 \pm 0,005$	$0,05 \pm 0,003$	$0,030 \pm 0,002$
0	$0,48 \pm 0,05$	$0,26 \pm 0,09$	$0,16 \pm 0,009$	$0,09 \pm 0,003$	$0,05 \pm 0,003$	$0,035 \pm 0,002$



Поле гамма-излучения

Таблица 2

Результаты аппроксимации плотности потока бета-излучений

Расстояние от пола, см	Аппроксимация по уравнению (1)
250	$\varphi = 0,3875\exp(-0,0152h)$
200	$\varphi = 0,3929\exp(-0,0142h)$
150	$\varphi = 0,4322\exp(-0,0141h)$
100	$\varphi = 0,3986\exp(-0,0107h)$
50	$\varphi = 0,4197\exp(-0,0109h)$
0	$\varphi = 0,4725\exp(-0,0111h)$

Как известно, при прохождении β -частиц через вещество происходит их упругое (на ядрах атомах и свободных электронах) и неупругое рассеяние (на связанных электронах атомов), при этом кинетическая энергия β -частиц уменьшается. По мере уменьшения энергии β -частиц и уширения углового распределения относительно первоначального направления вероятность упругих столкновений и, как следствие, ионизации атомов плавно возрастает (пик Брэгга), а вероятность возбуждения атомов плавно убывает. Исходя из вышеизложенного, максимальную линейную плотность ионизации следует ожидать на расстояниях от источника порядка средней длины свободного пробега излучения. Таким образом, оцененные ранее величины длины свободного пробега β -частиц излучения ^{40}K в воздухе $h_{\text{max возд}}$ характеризуют оптимальные линейные размеры спелеоклиматических камер с точки зрения обеспечения в воздушной среде мак-

симально возможной концентрации легких аэроионов.

При исследовании пространственного распределения дозы γ -излучения (рисунок) на расстояниях $R_0 \sim 0,5-1,0$ м наблюдается выраженный максимум дозы, обусловленный ее накоплением по мере продвижения γ -излучения в воздушной среде, вызванным действием вторичных излучений.

Заключение

Результаты исследований наглядно демонстрируют возможность применения силвинитовых блоков и панелей для формирования в современных помещениях не только качественной, но и даже оздоровительной ионизированной воздушной среды.

Безусловно важным является не только количество ионов, образованных в воздушной среде в силу влияния излучений, но и то, как распределены эти ионы по длине

пути излучений, т.е. как осуществлена линейная плотность ионизации.

Полученные зависимости и характерные оценки позволяют обоснованно определить требования и оптимальные параметры пространственного проектирования сильвинитовых спелеоклиматических камер. Для получения максимального (с точки зрения аэроионизации) эффекта следует линейные размеры спелеокамер выбирать исходя из длины свободного пробега β -частиц (порядка трех-четырех метров), а места размещения посетителей или пациентов во время сеансов спелеотерапии располагать на расстояниях порядка метра от стен, облицованных блоками калийных солей.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность профессору Г.З. Файнбургу (Пермский национальный исследовательский политехнический университет) за ценные замечания и советы, несшие отражение в настоящей работе.

Список литературы

1. Барях А.А., Асанов В.А., Файнбург Г.З., Красноштейн А.Е., Папулов Л.М., Поликша А.М., Ковалев О.А., Селин Ю.В. Способ изготовления строительных изделий специального назначения из соляных материалов // Патент Рос. Федерации 2097359. – № 95101758/03; заявл. 06.02.95; опубл. 27.11.97.
2. Вопросы дозиметрии и радиационная безопасность на атомных электрических станциях: учебное пособие / под ред. А.В. Носовского. – Славутич: Укратомиздат, 1998. – 372 с.
3. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1978. – С. 53–54.
4. Косяченко Г.Е. Гигиенические основы комплексной оценки добычи калийных руд Беларуси и рационального использования спелеосреды месторождения: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. – Минск, 2004. – 40 с.
5. Прикладная дозиметрия / К.К. Аглинцев, В.М. Кодоков, А.Ф. Лызов, Ю.В. Сивинцев. – М.: Госатомиздат, 1962. – 248 с.
6. Enache L., Bunescu Iu. Microclimate and physical environment elements in some salt mines in Romania for speleotherapeutic use // The XIVth International Symposium of Speleotherapy: Abstracts: Turda, Romania, 2012, October 4–6. – Cluj-Napoca: Casa Cărții de Știință, 2012. – P. 17–18.
7. Horowitz S. Salt cave therapy: rediscovering the benefits of an old preservative // Alternative and Complementary Therapies. – 2010. – Vol. 16. – P. 158–162.
8. Ionic composition of air in the underground department of Ukrainian allergic hospital / Y. Chonka, M. Sichka, B. Buleza, Y. Sharkan, I. Sakalosh, I. Popovich, I. Lemko // The XIVth International Symposium of Speleotherapy: Abstracts: Turda, Romania, 2012, October 4–6. – Cluj-Napoca: Casa Cărții de Știință, 2012. – P. 14–15.
9. Tahir S.N.A., Alaamer A.S. Determination of natural radioactivity in rock salt and radiation doses due to its ingestion // Journal of Radiological Protection. – 2008. – Vol. 28. Issue 2. – P. 233–236.
10. Tan R. The Truth About Air Electricity & Health: A guide on the use of air ionization and other natural approaches for 21st century health issues. – Trafford Publishing, Singapore, 2014. – 168 p.