

УДК 622:544.772:615.835

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2016

КОРРЕЛЯЦИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ И АЭРОИОНОВ, ФОРМИРУЕМЫХ СИЛЬВИНИТОВЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ И МАТЕРИАЛАМИ

К.А. Черный

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

CORRELATION OF HIGHLY DISPERSED AEROSOL PARTICLES AND AEROIONS, FORMED BY SYLVINITE SURFACES AND MATERIALS

K.A. Chernyi

Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskii av, Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 05.05.2016. Принята / Accepted: 29.10.2016. Опубликовано / Published: 02.12.2016

Ключевые слова:

сильвинит, спелеоклиматическая камера, распределение аэрозольных частиц по размерам, высокодисперсный аэрозоль, логнормальное распределение, экстраполяция, диффузионная зарядка аэрозоля, легкие аэроионы.

Применение материалов на основе природных калийных солей является известным способом создания качественной, вплоть до лечебной, воздушной среды помещений, которая модифицируется ввиду влияния аэрозольных частиц сильвинита, карналлита и галита. Облицовка или декорирование ограждающих поверхностей стен, пола или потолка специальных наземных комплексов – спелеоклиматических камер – позволяют обогатить воздух помещения высокодисперсным соляным аэрозолем и аэроионами легкой группы подвижности.

Взаимосвязь распределения аэрозольных частиц с концентрацией легких аэроионов в сильвинитовых спелеоклиматических камерах предлагается проследить, рассматривая ионизационно-рекомбинационное уравнение образования и исчезновения легких аэроионов. Путем экстраполяции определены основные параметры высокодисперсного соляного аэрозоля размером менее 0,3 мкм исходя из экспериментально определенных параметров распределения аэрозольных частиц по размерам (более 0,3 мкм), принимая во внимание возможные решения уравнения аэроионного баланса и применив модель суперпозиции нескольких логарифмически нормальных распределений.

На примере горных пород Верхнекамского калийного месторождения представлены основные параметры размерного распределения аэрозольных частиц в сильвинитовых спелеоклиматических камерах с поверхностями разных конструкций, выполненных из пиленых сильвинитовых блоков природного сильвинита и из панелей и прессованной соляной плитки с высоким содержанием хлористого калия, входящего в состав калийных солей.

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность применения сильвинитовых строительных материалов для создания высококачественной лечебной или оздоровительной воздушной среды, насыщенной высокодисперсным соляным аэрозолем, и позволяют оптимально выбирать специальные строительные отделочные и декоративные материалы на основе сильвинита в зависимости от требуемых параметров аэрозольного распределения с целью формирования качественного воздуха помещений.

Keywords:

sylvinite, speleoclimatic chamber, distribution of aerosol particles by size, highly dispersed aerosol, lognormal distribution, extrapolation, aerosol diffusion charging, light aeroions.

The use of materials based on natural potassium salts is a known way to create a high-quality, up to healing, indoor air which is modified due to the effect of sylvinitic, carnallite and halite aerosol particles. Facing or decorating protective surfaces of walls, floor or ceiling in special ground facilities – speleoclimatic chambers – can enrich the indoor air with a highly dispersed salt aerosol and aeroions of light mobility group.

It is proposed to look over the interrelation between distribution of aerosol particles and concentration of light aeroions in sylvinitic speleoclimatic chambers, considering the ionization and recombination equation of formation and disappearance of light aeroions. By extrapolation the main parameters of the highly dispersed salt aerosol were determined for size less than 0.3 microns based on the experimentally determined parameters of aerosol particles distribution by size (greater than 0.3 microns) taking into account possible solutions of the aeroionic balance equation and applying the superposition model of several logarithmically normal distributions.

On example of Verkhnekamskoe potash deposit the article shows the main parameters of aerosol particles' size distribution in sylvinitic speleoclimatic chambers with surfaces of different constructions made of sawn natural sylvinitic blocks, panels and molded salt tiles with a high content of potassium chloride, a component of potash salts.

Study results confirm high efficiency of sylvinitic building materials application to create a high-quality medical or wellness air environment saturated with highly dispersed salt aerosol, and allow to optimally select special constructive and decorative materials on the basis of sylvinitic, depending on required parameters of the aerosol distribution in order to create a high-quality indoor air.

Черный Константин Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности (тел.: +007 342 219 81 73, e-mail: cherny_k@mail.ru).

Konstantin A. Chernyi (Author ID in SCOPUS: 52663143700) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Life Safety (tel.: +007 342 219 81 73, e-mail: cherny_k@mail.ru)

Введение

Известно, что одним из основных биологически активных факторов горных пород и определенных, естественных или искусственно пройденных, подземных полостей (в частности горных соляных выработок [1–3]) является высокодисперсный аэрозоль [4–6]. Для создания уникального микроклимата замкнутых помещений все шире используются специальные комплексы [7, 8] – спелеоклиматические камеры, – в которых в облицовочных материалах [9] и/или материалах несущих конструкций применяется силвинитовая руда. В силу влияния природных солей воздушная среда в таких комплексах обладает уникальными свойствами [10] – в воздухе наблюдаются высокие объемные концентрации высокодисперсного соляного аэрозоля и легких аэроионов.

Вместе с тем до настоящего времени исследований, обобщающих с единых физических позиций теоретические и экспериментальные результаты влияния указанных специальных отделочных материалов на формируемый аэрозольный и аэроионный состав воздуха помещений, не проводилось. Как правило, исследования аэроионного и аэрозольного составов ограничиваются натурными измерениями без учета взаимосвязи между ними. Так, в частности, в воздушной среде спелеоклиматических камер наиболее изученными являются аэрозольные частицы с размером, превышающим 0,5–1,0 мкм, в силу возможности отбора их фильтрами для последующего микроскопического и химического анализа. Однако принятый в настоящее время гравиметрический подход к способу оценки вредного воздействия аэрозольного загрязнения не удовлетворяет современным тенденциям, поскольку без определения дисперсности аэрозольных частиц и их физико-химических свойств нельзя объективно подобрать конструктивное исполнение и режим эксплуатации спелеокамер. Действительно, важнейшим параметром, определяющим характер воздействия на организм человека вдыхаемых аэрозольных частиц, является их размер [11–14]. При высокой дисперсности аэрозоль отличается повышенной химической активностью из-за большой суммарной поверхности частиц. Высокодисперсные аэрозольные частицы обладают уникальными физическими и химическими свойствами, так как практически не оседают и длительное время находятся во взвешенном состоянии.

Следует отметить, что измерение концентраций высокодисперсных аэрозольных частиц диаметром менее 0,5 мкм технически очень сложно [15]. В связи с этим актуальной является задача получить информацию о высокодисперсных аэрозольных частицах путем экстраполяции инструментально определенного распределения частиц размером более или порядка 0,5 мкм в более мелкие фракции. Для этого предлагается осуществить моделирование взвешенных в воздухе частиц диаметрами от порядка нанометра до, по крайней мере, сотен нанометров, рассматривая систему «аэрозольные частицы – аэроионы».

Теоретико-эмпирические основы

Взаимосвязь распределения аэрозольных частиц и концентрации легких аэроионов можно проследить, рассматривая ионизационно-рекомбинационное уравнение образования и исчезновения легких аэроионов, устанавливающее взаимосвязь величины объемных счетных концентраций легких аэроионов с уровнем ионообразования и аэрозольным распределением с учетом рекомбинации аэроионов между собой и осаждения на аэрозольные частицы:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \nu - \alpha n_+ n_- - n_i \sum_{\chi=-\infty}^{+\infty} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} dD \beta_{\chi}^i(D) N(\chi, D, t), \quad (1)$$

где n_i – концентрация легких аэроионов с подвижностью $\mu_i = 0,5\text{--}2 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$; i – характеристика заряда иона, если заряд положительный, то i обозначается знаком «+», если заряд отрицательный – знаком «–»; ν – интенсивность ионообразования; α – коэффициент рекомбинации противоположно заряженных легких аэроионов друг с другом, согласно расчетам по теории прилипания в результате тройного столкновения для нормальных условий $\alpha = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$, что близко к экспериментально наблюдаемым значениям $\alpha \cong 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$ [16]; $\beta_{\chi}^i(D)$ – коэффициент слияния легких положительных (или отрицательных) аэроионов и аэрозольных частиц диаметром D и зарядом χe (или $-\chi e$); $N(\chi, D, t)$ – концентрация аэрозольных частиц диаметром D и зарядом χe в момент времени t ; e – элементарный заряд; t – время.

Предположим, что система «аэрозольные частицы – аэроионы» находится в термодина-

мическом и электрическом равновесии (т.е. распределение аэрозольных частиц по размерам квазистационарно и по зарядам симметрично). Тогда уравнение (1) может быть записано в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_+}{\partial t} &= v - \alpha n_+ n_- - S_p^+ n_+, \\ \frac{\partial n_-}{\partial t} &= v - \alpha n_+ n_- - S_p^- n_-, \end{aligned} \quad (2)$$

где S_p^i – коэффициент, отражающий величину убыли аэроионов на аэрозольных частицах,

$$S_p^i = \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} dD \beta_{\chi}^i(D) N(\chi, D).$$

В равновесном состоянии производные уравнений (2) становятся равными нулю и $S_p^+ n_+ = S_p^- n_-$. Решение уравнений (2) относительно n_+ и n_- дает

$$\begin{aligned} n_+ &= \frac{\sqrt{(S_p^-)^2 + 4 \frac{S_p^-}{S_p^+} \alpha v} - S_p^-}{2\alpha}, \\ n_- &= \frac{\sqrt{(S_p^+)^2 + 4 \frac{S_p^+}{S_p^-} \alpha v} - S_p^+}{2\alpha}. \end{aligned} \quad (3)$$

В предположении, что концентрации легких аэроионов обоих знаков равны ($n_+ = n_- = n$), исходные уравнения аэроионного баланса (2), опуская индекс i , запишутся в виде

$$\frac{\partial n}{\partial t} = v - \alpha n^2 - S_p n. \quad (4)$$

В уравнении ионного баланса убыль аэроионов $S_p n$ за счет оседания на аэрозольные частицы в предположении, что полное число аэрозольных частиц в единице объема $N = N_0(D) + 2 \sum_{\chi=1}^{\infty} N_{\chi}(D)$ и $N_+ = N_-$, можно записать как

$$\begin{aligned} S_p n &= n \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} dD \beta_{\chi}(D) N(\chi, D) = \\ &= n \sum_{D=D_{\min}}^{D=D_{\max}} \left(\beta_0(D) N_0(D) + \sum_{\chi=-\infty}^{\chi=+\infty} N_{\chi}(D) \beta_{\chi}(D) \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\beta_0(D)$ – коэффициент рекомбинации между аэроионами и нейтральными аэрозольными частицами; $\beta_{\chi}(D)$ – коэффициент рекомбинации между аэроионами и заряженными частицами

с числом элементарных зарядов $\chi = 1, 2, 3, \dots$ (или $-\chi = 1, 2, 3, \dots$); $N_0(D)$ – концентрация незаряженных частиц; $N_{\chi}(D)$ – концентрация частиц, заряженных до величины χ (или $-\chi$).

В равновесном состоянии системы применительно к условию симметричной (т.е. при $n_+ = n_-$) диффузионной зарядки аэрозольных частиц легкими аэроионами слияние аэроионов и аэрозольных частиц (5) во всем интервале размеров частиц может быть описано эмпирической формулой [17]

$$S_p n \approx n \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) \left[25 \sqrt{\frac{D-0,001}{D+0,005}} D \cdot 10^{-6} \right] dD, \quad (6)$$

где D – диаметр аэрозольных частиц, мкм; $N(D)$ – распределение аэрозольных частиц по размерам.

С учетом принятых обозначений для стационарных условий уравнение (4) принимает вид

$$v = \alpha n^2 + S_p n. \quad (7)$$

Решая полученное квадратное уравнение и исключая отрицательное решение, имеем

$$n = \frac{\sqrt{S_p^2 + 4\alpha v} - S_p}{2\alpha}. \quad (8)$$

Отметим, что для решения уравнения (8), связывающего интенсивность ионообразования, счетные концентрации легких аэроионов и распределение аэрозольных частиц по размерам, необходимы сведения о дисперсном составе аэрозоля в широком интервале размеров частиц от D_{\min} (по крайней мере порядка 0,05 мкм) до D_{\max} .

В практических исследованиях чаще всего распределение определено только для аэрозольных частиц диаметром более 0,1 мкм (чаще в диапазоне диаметров более 0,3–0,5 мкм). Тогда в случае отсутствия данных распределения аэрозольных частиц в широком интервале от D_{\min} до D_{\max} применение уравнения (8) становится некорректным.

Информацию о высокодисперсных аэрозольных частицах, имея данные о распределении частиц размером более или порядка 0,1 мкм, предлагается получить, рассматривая эмпирические модели, описывающие характер распределения частиц аэрозоля по размерам.

Логарифмически нормальное распределение считается наиболее обоснованным для анали-

тического описания дисперсного состава аэрозольного загрязнения, особенно в области высокодисперсной фракции. Известно [18, 19], что в большинстве случаев распределение аэрозольных частиц может быть сведено к суперпозиции нескольких логарифмически нормальных распределений

$$\frac{\partial N(D)}{\partial(D)} = \sum_{j=1}^p \frac{N_{0j}}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_j} D} \exp\left(-\frac{(\ln D - \ln D_{0j})^2}{2(\ln \sigma_j)^2}\right), \quad (9)$$

где N_{0j} – общее число частиц j -й моды; σ_j – стандартное геометрическое отклонение j -й моды; D_{0j} – среднее геометрическое значение диаметра моды.

В общем случае число мод p в распределении (9) принимается равным четырем [20]. Причем одна из мод ($j = IV$) лежит в области частиц со средним геометрическим значением диаметра D_{04} более 1 мкм, а в области размеров частиц менее 1 мкм рассматриваются возможные оставшиеся три моды I, II, III (рис. 1).

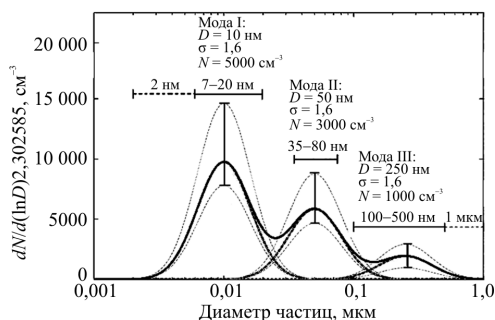


Рис. 1. Первоначальные условия итераций при моделировании распределения аэрозольных частиц (по данным [20])

В первоначальном приближении в интервале размеров частиц менее 1,0 мкм рассматриваются три моды. Средние геометрические диаметры частиц, стандартные геометрические отклонения и концентрации частиц принимаются равными значениям, представленным на рис. 1. В дальнейшем значения D_{0j} , σ_j , N_{0j} подбираются методом наименьших квадратов таким образом, чтобы обеспечить соответствие известным экспериментальным данным распределения аэрозольных частиц, а также сходимость уравнения (5), связывающего распределение аэрозольных частиц и концентрации аэроионов. Для этого в модах после-

довательно подгоняются значения: а) средних геометрических диаметров D_{0j} ; б) стандартных геометрических отклонений σ_j в диапазоне 1,2–2,1; в) общего числа частиц N_{0j} .

Поскольку в отдельных случаях распределение в области размеров частиц менее 1 мкм может быть сведено к бимодальному или даже к одномодальному, то дальнейшим этапом аппроксимации рассматривается возможность уменьшения количества мод в диапазоне размеров частиц менее 1 мкм с трех до двух (при условии достижения заданной точности). Возможны два варианта: а) в диапазоне размеров частиц менее 0,1 мкм наблюдаются две моды, а в диапазоне размеров частиц 0,1–1,0 мкм мода отсутствует; б) в диапазоне частиц менее 0,1 мкм наблюдается только одна мода (диапазон частиц 0,003–0,100 мкм), а вторая мода попадет в диапазон размеров 0,1–1,0 мкм. Далее, при условии достижения заданной точности, рассматривается возможность уменьшения количества мод с двух до одной. В случае одномодового распределения проводятся аналогичные описанным выше итерации для всего диапазона размеров частиц 0,003–1,000 мкм.

Параметры логнормального распределения высокодисперсных частиц определяются методом наименьших квадратов таким образом, чтобы значения концентраций тяжелых аэроионов, вычисленные исходя из Больцмановского распределения заряда на аэрозольных частицах

$$\frac{N_\chi(D)}{N} = \left[\sqrt{\frac{4\pi^2 \epsilon_0 D k T}{e^2} \left(1 + \frac{e^2}{48\pi \epsilon_0 D k T} \right)} \right]^{-1} \times \exp\left(-\frac{\chi^2 e^2}{4\pi \epsilon_0 D k T}\right), \quad (10)$$

а также эмпирического соотношения, связывающего значение диаметра аэрозольных частиц и подвижности [21]

$$\mu = \left(\frac{9,44\chi}{D} \right) \times \left[1 + \frac{165}{D} \left(1 + 0,336 \exp\left(-\frac{D}{153}\right) \right) \right] 10^{-3}, \quad (11)$$

совпадали с экспериментально наблюдаемыми.

В уравнении (10) приняты обозначения: ε_0 – электрическая постоянная; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Таким образом, использование суперпозиции нескольких логарифмически нормальных распределений для описания дисперсного состава аэрозольных частиц позволяет проводить аппроксимации экспериментальных данных распределения вплоть до диапазона диаметров $D \sim 0,003$ мкм и тем самым оценивать количественные характеристики высокодисперсной фракции аэрозоля.

Методы и аппаратура исследований, результаты моделирования

Представленный выше теоретико-эмпирический аппарат был экспериментально апробирован на примере реальных специальных помещений, облицованных пилеными блоками природного сильвинита или сильвинитовыми панелями из прессованной соляной плитки с высоким содержанием хлористого калия, входящего в состав калийных солей.

Распределение аэрозольных частиц по размерам в воздушной среде исследовалось при помощи аэрозольного счетчика марки ПКЗВ-1 (диапазон размеров исследуемых аэрозольных частиц – 0,3–100 мкм) и аэрозольного счетчика марки АЗ-6 (диапазон размеров частиц – 0,3–1,0 мкм).

Исследование значений концентрации аэроионов проводилось с помощью интегрального спектрометра аэроионов УТ-8401, позволяющего регистрировать аэроионы положительной и отрицательной полярности в диапазоне подвижности от 0,00032 вплоть до $2,0 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ и более.

Все исследования выполнены в отсутствие людей в помещениях (кроме исследователя).

Для достижения поставленной точности моделирования (коэффициент корреляции между экспериментальными данными и данными аппроксимации в области размеров частиц более 0,3 мкм равен не менее 0,99),

распределение аэрозольных частиц в воздушной среде помещений, облицованных специальными материалами на основе калийных солей, следует описывать в виде суперпозиции двух логарифмически нормальных распределений (рис. 2).

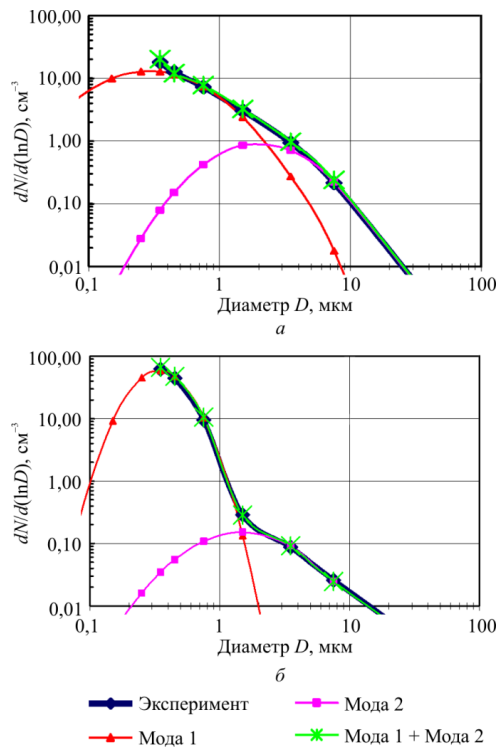


Рис. 2. Моделирование распределения аэрозольных частиц в помещениях, облицованных: а – блоками натуральной калийной соли; б – сильвинитовыми панелями и прессованной плиткой

Представленная на рис. 2 мода 2 соответствует моде с индексом $j = IV$, которая лежит в области частиц со средним геометрическим значением диаметра более 1 мкм [20]. Распределение высокодисперсных частиц, характеризуемое модами с индексами $j = I, II, III$ (см. рис. 1), удалось свести к одномодовому – соответственно мода 1 (рис. 2).

Усредненные значения объемных концентраций аэроионов и результаты аппроксимации распределения аэрозольных частиц по размерам

Объект исследования	Концентрация аэроионов, см^{-3}		Мода 1			Мода 2		
	легкие	тяжелые	N_{01}	σ_1	D_{01}	N_{02}	σ_2	D_{02}
Помещения, облицованные блоками из натуральной калийной соли	2230 ± 390	2170 ± 520	29 ± 16	$2,45 \pm 0,68$	$0,29 \pm 0,11$	$1,8 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,1$	$2,0 \pm 0,3$
Помещения, облицованные сильвинитовыми панелями и прессованной плиткой	1340 ± 410	2810 ± 600	63 ± 29	$1,53 \pm 0,07$	$0,34 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,19$	$2,33 \pm 0,11$	$1,5 \pm 0,2$

Полученные в результате измерений в помещениях с соляными отделочными материалами усредненные значения параметров логарифмически нормальных распределений по модам представлены в таблице.

Выводы

Полученные результаты моделирования наглядно демонстрируют различие в дисперсном составе соляной аэрозоли в зависимости от конструктивных особенностей спелеокамер. Действительно, в помещениях, облицованных сильвинитовыми панелями и прессованной плиткой, по сравнению с помещениями, облицованными блоками из натуральной калийной соли, наблюдается более ярко выраженная доминирующая роль моды 1 по сравнению с модой 2. Таким образом, применение панелей и прессованной плитки значительно увеличивает содержание высокодисперсной фракции соляной аэрозоли в воздухе. Однако следует отметить, что такое увеличение неминуемо приводит к относительному снижению объемных концентраций легких аэроионов.

Представленный подход к определению уникальных свойств рассматриваемых специальных отделочных и декоративных материалов на основе калийных солей позволяет научно обосновать их применение, определить варианты использования в зависимости от требуемых параметров аэрозольсодержания в воздушной среде с целью формирования качественного воздуха помещений. Представленные результаты показывают, что перспективными материалами являются панели и плитки, изготовленные на основе калийных солей путем прессования, поскольку позволяют генерировать более высокодисперсную фракцию соляных аэрозольных частиц.

Благодарность

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

Список литературы

1. Environment study in order to use potential therapeutic factors existing in the cavity of one salt mine for the achievement of some perspectives of speleotherapy development in Romania / Iu. Simionca [et al.] // Proceedings of the 14th International Congress of Speleology, 21–28 August, 2005, Kalamos, Hellas, 2005. – P. 421–425.
2. Enache L., Bunescu Iu. Microclimate and physical environment elements in some salt mines in Romania for speleotherapeutical use // The XIV International Symposium of Speleotherapy: Abstracts: Turda, Romania, 2012, October 4–6. – Cluj-Napoca: Casa Cărții de Știință, 2012. – P. 17–18.
3. Horowitz S. Salt cave therapy: rediscovering the benefits of an old preservative // *Alternative and Complementary Therapies*. – 2010. – Vol. 16. – P. 158–162. DOI: 10.1089/act.2010.16302.
4. Rashleigh R., Smith S. MS., Roberts N. A review of halotherapy for chronic obstructive pulmonary disease // *International Journal of COPD*. – 2014. – Vol. 9. – P. 239–246. DOI: 10.2147/COPD.S57511.
5. Aerosol therapeutic environment of Ukrainian allergic speleo hospital and salt aerosol therapy rooms / Y. Chonka [et al.] // Abstracts of the XIV International Symposium of Speleotherapy. – Turda, 2012. – P. 16–17.
6. Экотоксикология нано- и микрочастиц минералов / К.С. Голохваст [и др.] // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2011. – Т. 3, № 1 (5). – С. 1256–1259.
7. Климатическая камера: пат. 2012306 Рос. Федерация № 4913631/14 / Красноштейн А.Е. [и др.]; заявл. 21.02.1991; опублик. 15.05.1994.
8. The effect of salt chamber treatment on bronchial hyperresponsiveness in asthmatics / J. Hedman [et al.] // *Allergy*. – 2006. – Vol. 61. – P. 605–610. DOI: 10.1111/j.1398-9995.2006.01073.x.
9. Способ изготовления строительных изделий специального назначения из соляных материалов: пат. 2097359 Рос. Федерация № 95101758/03 / Барях А.А. [и др.]; заявл. 06.02.1995; опублик. 27.11.1997.
10. 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.
11. Osunsanya T., Prescott G., Seaton A. Acute respiratory effects of particles: mass or number? // *Occupational and Environmental Medicine*. – 2001. – Vol. 58, is. 3. – P. 154–159. DOI: 10.1136/oem.58.3.154.
12. Червинская А.В. Галотерапия в профилактике и восстановительном лечении болезней органов дыхания // *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*. – 2003. – № 6. – С. 8–15.
13. Глушкова А.В., Радилев А.С., Рембовский В.Р. Нанотехнологии и нанотоксикология – взгляд на проблему // *Токсикологический вестник*. – 2007. – № 6. – С. 4–8.
14. Buseck P.-R., Adachi K. Nanoparticles in the atmosphere // *ELEMENTS: Nanogeoscience*. – 2008. – Vol. 4, № 6. – P. 389–394. DOI: 10.2113/gselements.4.6.389.
15. Крутиков В.Н., Брегадзе Ю.И., Круглов А.Б. Контроль физических факторов окружающей среды, опасных для человека. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – С. 398–435.
16. Tammet H., Kulmala M. Simulation tool for atmospheric nucleation bursts // *Journal of Aerosol Science*. – 2005. – Vol. 36, is. 2. – P. 173–196. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2004.08.004.
17. Variation and balance of positive air ion concentrations in a boreal forest / U. Hörrak [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2008. – Vol. 8, № 3. – P. 655–675. DOI: 10.5194/acp-8-655-2008.

18. Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house / T. Hussein [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2006. – Vol. 40, is. 23. – P. 4285–4307. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.03.053.

19. Production, growth and properties of ultrafine atmospheric aerosol particles in an urban environment / I. Salma [et al.] // *Atmospheric Chemistry and*

Physics. – 2011. – Vol. 11, № 3. – P. 1339–1353. DOI: 10.5194/acp-11-1339-2011.

20. Evaluation of an automatic algorithm for fitting the particle number size distributions / T. Hussein [et al.] // *Boreal Environment Research*. – 2005. – Vol. 10, № 5. – P. 337–355.

21. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 312 с.

References

1. Simionca Iu. et al. Environment study in order to use potential therapeutic factors existing in the cavity of one salt mine for the achievement of some perspectives of speleotherapy development in Romania. *Proceedings of the 14th International Congress of Speleology, 21-28 August, 2005*. Kalamos, Hellas, 2005, pp. 421-425.

2. Enache L., Bunescu Iu. Microclimate and physical environment elements in some salt mines in Romania for speleotherapeutical use. *The XIV International Symposium of Speleotherapy: Abstracts: Turda, Romania, 2012, October 4–6*. Cluj-Napoca: Casa Cărții de Știință, 2012, pp.17-18.

3. Horowitz S. Salt cave therapy: rediscovering the benefits of an old preservative. *Alternative and Complementary Therapies*, 2010, vol. 16, pp.158-162. DOI: 10.1089/act.2010.16302.

4. Rashleigh R., Smith S. MS., Roberts N. A review of halotherapy for chronic obstructive pulmonary disease. *International Journal of COPD*, 2014, vol. 9, pp.239-246. DOI: 10.2147/COPD.S57511.

5. Chonka Y. et al. Aerosol therapeutic environment of Ukrainian allergic speleo hospital and salt aerosol therapy rooms. *Abstracts of the XIV International Symposium of Speleotherapy*. Turda, 2012, pp.16-17.

6. Golokhvast K.S. et al. Ekotoksikologiya nano- i mikrochastits mineralov [Ecotoxicology of nano- and microparticles]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2011, vol.13, no.1-5, pp.1256-1259.

7. Krasnoshtein A.E. et al. Klimaticheskaiia kamera [Climatic chamber]: pat. 2012306 Ros. Federatsiia no.4913631/14; zaiavl. 21.02.91; opubl. 15.05.94.

8. Hedman J. et al. The effect of salt chamber treatment on bronchial hyperresponsiveness in asthmatics. *Allergy*, 2006, vol. 61, pp.605-610. DOI: 10.1111/j.1398-9995.2006.01073.x.

9. Bariakh A.A. et al. Sposob izgotovleniia stroitel'nykh izdelii spetsial'nogo naznacheniiia iz solianyx materialov [Method of manufacturing building products for special purposes from salt materials]: pat. 2097359 Ros. Federatsiia no.95101758/03.; zaiavl. 06.02.95; opubl. 27.11.97.

10. Kosiachenko G.E. Gigienicheskie osnovy kompleksnoi otsenki dobychi kaliinykh rud Belarusi i ratsional'nogo ispol'zovaniia speleosredy mestorozhdeniia [Hygienic bases of complex estimation ore potash mining in

Belarus and rational use of field speleo medium]: avtoref. dis. ... d-ra med. nauk. Minsk, 2004, 40 p.

11. Osunsanya T., Prescott G., Seaton A. Acute respiratory effects of particles: mass or number? *Occupational and Environmental Medicine*, 2001, vol.58, is.3, pp.154-159. DOI: 10.1136/oem.58.3.154.

12. Chervinskaia A.V. Galoterapiia boleznei organov dykhaniiia [Halotherapy of respiratory diseases]. *Fizioterapiia, bal'neologiya i reabilitatsiia*, 2003, no.6, pp.8-15.

13. Glushkova A.V., Radilov A.S., Rembovskii V.R. Nanotekhnologii i nanotoksikologiya – vzgliad na problemu [Nanotechnologies and nanotoxicology view of the problem]. *Toksikologicheskii vestnik*, 2007, no.6, pp.4-8.

14. Buseck P.-R., Adachi K. Nanoparticles in the atmosphere. *ELEMENTS: Nanogeoscience*, 2008, vol. 4, no.6, pp.389-394. DOI: 10.2113/gselements.4.6.389.

15. Krutikov V.N., Bregadze Iu.I., Kruglov A.B. Kontrol' fizicheskikh faktorov okruzhaiushchei sredy, opasnykh dlia cheloveka [Control of physical environmental factors hazardous to human]. Moscow: Izd-vo standartov, 2003, pp.398-435.

16. Tammet H., Kulmala M. Simulation tool for atmospheric nucleation bursts. *Journal of Aerosol Science*, 2005, vol.36, is.2, pp.173-196. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2004.08.004.

17. Hörrak U. et al. Variation and balance of positive air ion concentrations in a boreal forest. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, vol.8, no.3, pp.655-675. DOI: 10.5194/acp-8-655-2008.

18. Hussein T. et al. Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house. *Atmospheric Environment*, 2006, vol.40, is.23, pp.4285-4307. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.03.053.

19. Salma I. et al. Production, growth and properties of ultrafine atmospheric aerosol particles in an urban environment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, vol. 11, no.3, pp.1339-1353. DOI: 10.5194/acp-11-1339-2011.

20. Hussein T. et al. Evaluation of an automatic algorithm for fitting the particle number size distributions. *Boreal Environment Research*, 2005, vol.10, no.5, pp.337-355.

21. Smirnov V.V. Ionizatsiia v troposfere [Ionization in the troposphere]. Sankt-Petersburg: Gidrometeozdat, 1992, 312 p.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Черный К.А. Корреляция высокодисперсных аэрозольных частиц и аэроионов, формируемых сильвинитовыми поверхностями и материалами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т.15, №21. – С.378–384. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.10

Please cite this article in English as:

Chernyi K.A. Correlation of highly dispersed aerosol particles and aeroions, formed by sylvinitic surfaces and materials. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol.15, no.21, pp.378–384. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.10