



## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-283>

УДК 622.41:552.53

**Оценка изменения размера гигроскопического аэрозоля соляной пыли в зависимости от относительной влажности воздуха**

К. А. Черный , Г. З. Файнбург

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация* [chernyy\\_k@mail.ru](mailto:chernyy_k@mail.ru)**Аннотация**

Расширение масштабов добычи полезных ископаемых в калийных рудниках столкнулось с проблемой нехватки свежего воздуха, которую невозможно решить при текущей парадигме автономного проветривания. Перспективы связаны с последовательным и рециркуляционным проветриванием, а также концепцией «вентиляции по требованию», требующими детального описания процессов «самоочистки» рудничной атмосферы от пыли. Разрушение горных пород сопровождается выбросом солевых аэрозолей, которые во влажной атмосфере укрупняются и осаждаются на поверхность. Для прогнозирования распространения этих частиц и сопутствующих газов необходимы точные математические модели. В статье рассматриваются закономерности и механизмы влияния относительной влажности воздуха на динамику размера соляной пыли – гигроскопических аэрозольных соляных частиц галита (NaCl) и сильвина (KCl). Описаны взаимодействия при контакте «соляная поверхность – влажный воздух» и рассмотрено современное представление о процессах гистерезиса, а также об этапах растворения и обратной кристаллизации гигроскопических аэрозольных частиц. В связи с принципиальными сложностями использования современного экспериментального электронного оборудования в условиях подземных рудников в анализ вовлечены данные по океаническим аэрозолям того же химического состава. На основе анализа ряда моделей гигроскопического роста океанических аэрозолей проведена их адаптация к условиям атмосферы калийного рудника, что позволило получить усредненные значения фактора гигроскопического роста соляной аэрозоли. Для океанического аэрозоля и соляной пыли рудничной атмосферы наблюдается хорошее соответствие известных данных динамики фактора гигроскопического роста от влажности воздуха. Полученные теоретико-эмпирические данные, характеризующие изменения размера соляных частиц в зависимости от относительной влажности, апробированы в модельных исследованиях с соляным аэрозолем. Для интерпретации и прогнозирования изменений размерного распределения соляных аэрозольных частиц предложено использовать модель Юнга. На примере записи модели Юнга в двойных логарифмических координатах подтверждена эвристическая ценность предложенного подхода. Результаты исследования могут быть применены для расчета процессов формирования пылевой обстановки в каменно-соляных и калийных рудниках.

**Ключевые слова**

калийный рудник, проветривание, безопасность, атмосфера, аэрозоль, галит, сильвин, сильвинит, соляная пыль, растворение, кристаллизация, фактор гигроскопического роста, спелеотерапия, модель

**Для цитирования**

Chernyi K.A., Faynburg G.Z. Evaluation of variation of salt dust hygroscopic aerosol particle size as a function of relative air humidity. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):34–44. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-283>

## TECHNOLOGICAL SAFETY

Research paper

**Evaluation of variation of salt dust hygroscopic aerosol particle size as a function of relative air humidity**

К. А. Черный , G. Z. Faynburg

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation [chernyy\\_k@mail.ru](mailto:chernyy_k@mail.ru)**Abstract**

The expansion of mining in potash mines has faced the problem of fresh air shortage, which cannot be solved within the current paradigm of self-contained ventilation. Prospects are related to sequential and recirculation ventilation, as well as the concept of “ventilation on demand”, requiring a detailed description of



the processes of “self-cleaning” of a mine air from dust. Crushing a rock mass results in the formation of many aerosol hygroscopic salt particles, which in humid air conditions aggregate and settle on a drift floor. Accurate mathematical models are necessary for predicting the dispersion of these particles and associated gases. The paper considers the regularities and mechanisms of the effect of relative air humidity on the size of salt dust particles, aerosol hygroscopic salt particles of halite (NaCl) and sylvite (KCl). The interactions at the contact “salt surface – humid air” are described and the current understanding of the hysteresis processes and the stages of deliquescence and efflorescence (recrystallization) of hygroscopic aerosol particles are considered. Due to the fundamental difficulties of using modern experimental electronic equipment in the conditions of underground mines, data on oceanic aerosols of the same chemical composition were involved in the analysis. A number of models of hygroscopic growth of oceanic aerosol particles were reviewed and then adapted to the conditions of a potash mine atmosphere that made it possible to obtain average values of the factor of a salt aerosol particle hygroscopic growth. The good convergence of the known scientific data on the changes of the hygroscopic growth factor depending on relative air humidity for both oceanic aerosol and salt dust aerosol characteristic of a mine air was shown. The obtained theoretical-empirical data characterizing the changes in the size of salt particles depending on relative humidity were tested in model studies with salt aerosol. Young’s model was proposed to interpret and predict the changes in the size distribution of salt aerosol particles. The heuristic value of the proposed approach was confirmed by the example of the Young’s model record in log-log coordinates. The results of the study can be applied to calculate the processes of dust conditions formation in rock-salt and potash mines.

### Keywords

potash mine, ventilation, safety, atmosphere, aerosol, halite, sylvite, sylvite, salt dust, deliquescence, efflorescence, hygroscopic growth factor, speleotherapy, model

### For citation

Chernyi K.A., Faynburg G.Z. Evaluation of variation of salt dust hygroscopic aerosol particle size as a function of relative air humidity. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):34–44. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-07-283>

## Введение

Существенное расширение масштабов добычи полезного ископаемого в современных калийных рудниках столкнулось с проблемой острой нехватки свежего воздуха, подаваемого в рудник, которую в рамках господствующей парадигмы автономного независимого проветривания рабочих зон решить не удастся. В этих условиях практически все перспективы оказались связаны с последовательным и (или) рециркуляционным проветриванием, а также с концепцией «вентиляции по требованию», требующих адекватного описания процессов проветривания горных выработок, включая происходящие на уровне атомов, молекул и кластеров процессы «самоочистки» рудничной атмосферы от пыли [1].

Разрушение горного массива при ведении горных работ в калийных рудниках неизбежно сопровождается образованием множества аэрозольных гигроскопических соляных частиц различного размера, попадающих в воздух и образующих аэродисперсную среду. Инструментальные замеры [2–4] показывают, что в процессе взаимного столкновения в условиях влажного воздуха соляные частицы агрегируют и интенсивно выпадают на почву горных выработок. Все это требует детального расчета газовой и пылевой обстановки в многосвязной сети горных выработок разных аэродинамических типов и технологического назначения на основе адекватных реально существующих математических моделей, одним из обязательных членов которых служит «сток» примеси из-за различного рода взаимодействий микроуровня. Одним из таких взаимодействий является влияние относительной влажности на рост,

укрупнение и слияние аэрозолей основных минералов горных пород калийных рудников – галита (NaCl) и сильвина (KCl). Общие закономерности такого влияния известны из феноменологических наблюдений, однако детали этих процессов и их математическое описание, необходимые для цифровизации процессов рудничного проветривания, отсутствуют [5, 6].

Более того, спектральный размерный состав и динамика процессов взаимодействия соляных аэрозолей с влажным воздухом приобрели самостоятельное значение в связи с использованием как подземных пространств каменно-соляных и калийных рудников для целей так называемой спелеотерапии, так и наземных сильвинитовых спелеоклиматических камер – для спелеоклиматотерапии [7].

Рассмотрению вопросов математического описания влияния относительной влажности на размер гигроскопического аэрозоля и посвящена настоящая статья.

Целью представленных ниже исследований является определение закономерностей изменения распределения (по размеру) частиц соляной пыли в зависимости от относительной влажности воздуха, необходимых при цифровизации рудничного проветривания для расчета и управления пылевой обстановкой в горных выработках.

Достижение этой цели потребовало решения следующих задач:

– провести анализ современных представлений о природе поведения кристаллической частицы соли при изменении относительной влажности воздуха, ее обводнении и обратной кристаллизации;



– проанализировать известные физические модели роста гигроскопических частиц, определить их применимость к условиям рудничной атмосферы;

– на основе известных экспериментальных и эмпирических данных о гигроскопичности частиц морского аэрозоля вскрыть и подтвердить возможность их использования при оценке изменения размера гигроскопического аэрозоля соляной пыли калийных рудников;

– экспериментально, на основе реальных измерений натурального эксперимента в воздушной среде с соляным аэрозолем подтвердить достоверность результатов, получаемых на основе предложенных моделей гигроскопического роста и моделей размерного распределения соляных аэрозольных частиц рудничной атмосферы.

### Методы

Минералогический и химический состав соляного аэрозоля зависит от соответствующих показателей окружающей воздушное пространство горной выработки соляных горных пород [5, 6]. Состав соляных горных пород калийных рудников разнообразен и детально изучен с геологической и горнотехнологической сторон [8, 9]. Основными практически важными горными породами являются образованные минералами хлорида натрия (галит), калия (сильвин) и калий-магния (карналлит): галит, сильвинит (красный, полосчатый и пестрый), карналлит. Для практики особенно важно взаимодействие относительно «стойких» к влажности галита и сильвина с воздухом [10], поскольку карналлит, являясь двойной водной солью хлоридов калия и магния  $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ , сам содержит молекулярную влагу и быстро «растекается» во влажном воздухе.

Следует отметить, что взаимодействие частиц аэрозоля NaCl (минерал галит), KCl (сильвин) и содержащей их горной породы (сильвинита) с влажным воздухом остается недостаточно изученным из-за относительной медленности природных процессов конденсации / испарения влаги и из-за чрезвычайной технической сложности обеспечения работы современной электронной измерительной техники [11] в условиях агрессивной и взрывоопасной среды. Все это существенно затрудняет количественное исследование физики соляных аэрозолей в условиях подземных рудников и постановку соответствующих натуральных экспериментов.

В то же время работы по исследованию влияния морского аэрозоля на формирование процессов динамики климата Земли, тенденции и следствия опасного изменения которого видны всем, в силу своей важности для судеб человечества получают необходимое относительно щедрое финансирование, несмотря на дороговизну экспериментов, которые с завидным упорством все шире ведутся во всем мире.

Поскольку морской аэрозоль образуется во многом из частиц NaCl и KCl, то результаты исследований морского аэрозоля (см., например [12–14]), безусловно, могут и должны быть учтены как хорошо достоверные инструментальные исследования для решения рассматриваемых в статье задач.

### Результаты

#### **Современное представление о механизмах растворения и рекристаллизации аэрозольных частиц галита и сильвина**

Важнейшую роль в межфазном взаимодействии водяного пара и соляных частиц играет то существенное обстоятельство, что минералы галит (NaCl) и сильвин (KCl) имеют кубическую сингонию. Поэтому положительно заряженные атомы металлов – натрия  $Na^+$  и калия  $K^+$  и отрицательно заряженные атомы хлора  $Cl^-$  структурно эквивалентны и образуют ионные структуры высокой стабильности: один ион натрия/калия ( $Na^+/K^+$ ) окружен шестью хлорид-ионами ( $Cl^-$ ) и, наоборот, один хлорид-ион окружен шестью ионами натрия/калия. Тем самым кристалл соли NaCl/KCl размером даже в несколько нанометров сохраняет свои свойства кристалла (в сухом воздухе).

Частички соляного аэрозоля имеют сильное сродство к воде и, являясь гигроскопичными, обволакиваются молекулами атмосферной влаги, обводняются, растворяются и растут за счет конденсации водяных паров на кристалле [15], причем скорость роста частиц с увеличением относительной влажности воздуха закономерно увеличивается [16].

В механизме растворения соляной частицы при изменении относительной влажности  $RH$  (от *Relative Humidity*), являющемся результатом гидросорбционных процессов на контакте «соляная поверхность – влажный воздух», можно выделить четыре характерные стадии перехода от сухих кристаллов соли к сферическим каплям раствора полностью растворенной соли.

На первой стадии, характерной для низких значений  $RH$ , силовые поля атомов, находящихся на поверхности сухого соляного кристалла, лишь частично компенсируются силовыми полями соседних атомов кристаллической решетки, а потому способны вступать во взаимодействие с силовыми полями атомов молекул водяного пара, всегда содержащегося в воздухе. Это взаимодействие приводит к притягиванию молекул воды из воздуха к твердой поверхности и образованию рассольного конденсата, однако ввиду достаточно малого количества молекул воды в воздухе разрушения поверхности не происходит. Кроме того, при низких значениях упругости водяных паров одновременно с притяжением идет и отдача в окружающий воздух молекул воды, ранее осевших на поверхности кристаллов соли. Таким образом, при  $RH$  порядка 10–20 % форма частиц соли остается неизменной и имеет кристаллические поверхности, соответствующие сухим несферическим кристаллическим частицам [17].

Вторая стадия характерна для значений  $RH$  вплоть до величин порядка 70–75 %. В этих условиях на поверхности частиц соли в сравнительно короткий срок возникает пленочная рыхлосвязанная вода, обладающая высокой агрессивностью по отношению к легкорастворимым солям, и соляной минерал начинает разрушаться. Количество воды растет за счет конденсации [15], кристалл все больше растворяется, и, наконец, молекулы воды обволакивают все поверх-

ности растворяющейся частицы. Кубическая форма частицы с ее резкими гранями и углами исчезает из-за того, что поверхностно-адсорбированная вода растворяет поверхность кристалла соли преимущественно по углам и краям кристаллов, где сильнее напряженности полей, притягивающих молекулы воды. Кубические частицы становятся сначала околосферическими, а затем и околосферическими [18], т.е. округлыми (рис. 1, а).

При дальнейшем взаимодействии с водяным паром и ростом  $RH$  частица становится достаточно большой по размеру и стремится стать неоднородной сферой с водяной оболочкой (рис. 1, б) [19], «крупная» частица – и с твердым, частично несферическим ядром кристалла соли.

Третья стадия взаимодействия кристаллов соли и воды в воздухе связана с полным растворением. Если величина  $RH$  превышает критическое значение, называемое точкой растворения соли за счет атмосферной влаги, или относительной влажностью растворения  $DRH$  (от *Deliquescence Relative Humidity*), твердое внутреннее ядро частицы – кристалл соли – полностью растворяется в капле жидкости и исчезает, образуя однородную сферическую каплю насыщенного раствора [13].

Четвертая стадия характерна тем, что при увеличении  $RH$  выше значения  $DRH$ , вплоть до значений порядка 85–90 %, частицы соли продолжают увеличиваться с замедленной скоростью растворения и становятся при высоких значениях  $RH$  (например, порядка 99 %) сферическими каплями раствора [17].

Таков вышеизложенный 4-стадийный процесс конденсации влаги на поверхности соляной аэрозольной частицы вплоть до ее полного растворения.

Обратный процесс – отдача влаги из капелек в окружающую атмосферу и кристаллизация соли, настолько отличается от процесса растворения, что можно говорить о гистерезисе.

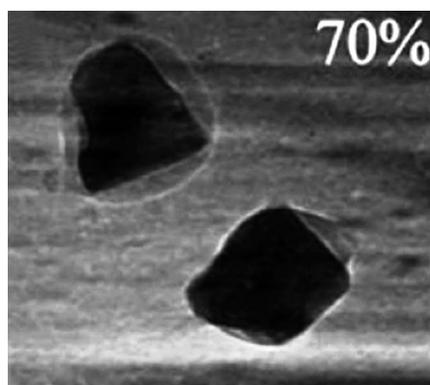
Сначала по мере снижения  $RH$  капля ненасыщенного водно-солевого аэрозоля с полностью растворенным кристаллом соли теряет воду по той же кривой равновесного давления пара, но при этом остается в жидком состоянии и выглядит как пересыщенная капля рассола, постепенно уменьшаясь в размере из-за испарения воды.

Однако вместо того, чтобы «высыхать» и кристаллизоваться при  $RH$ , равной  $DRH$ , как можно было бы этого ожидать, соляные аэрозоли остаются гидратированными, а раствор – перенасыщенным до гораздо более низких значений  $RH$ . Такое поведение обусловлено тем, что при определенной степени «усыхания» гидратированным ионам  $Na^+$  и калия  $K^+$  нужно соединиться с ионами  $Cl^-$ , причем таких атомов должно быть достаточно для образования кристалла.

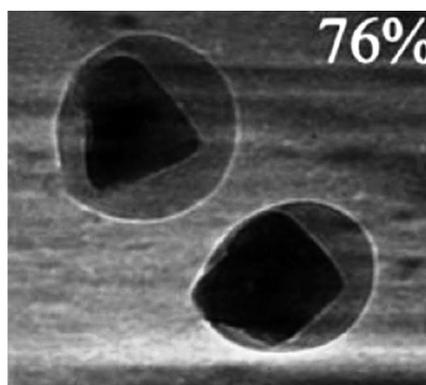
При дальнейшем уменьшении относительной влажности, после прохождения значения  $DRH$ , достигается вторая критическая относительная влажность, называемая точкой кристаллизации, или относительной влажностью кристаллизации  $ERH$  (от *Efflorescence Relative Humidity*), при которой частица соли начинает «затвердевать», постепенно высушиваясь и перекристаллизовываясь, теперь уже представляя собой систему «твердое тело – жидкость» [15, 20].

Поскольку пороговые значения  $DRH$  и  $ERH$  различны и относительно далеки друг от друга по значениям, наличие гистерезиса приводит к тому, что при циклическом изменении величины  $RH$  соляные аэрозольные частицы могут существовать в двух формах – кристаллической или водной – в зависимости от истории (предыдущей динамики) изменения  $RH$ . В итоге, частицы солевого аэрозоля (как в виде твердых, частично несферических кристаллов соли с водянистой оболочкой, так и в виде сферических капелек, содержащих полностью растворенную соль) могут существовать между значениями относительной влажности от порядка 45–50 % до порядка 70–75 %.

Следует отметить, что для сильвинита как минерала, состоящего из разных компонентов с разными пороговыми значениями  $DRH$  и  $ERH$ , процессы растворения и кристаллизации могут быть еще сложнее, чем это описано выше. Между тем, поскольку  $ERH$  большинства солей и смесей солей составляет порядка 40 %, то в большинстве случаев, наблюдаемых в условиях обычного водного состояния атмосферы с характерными значениями  $RH$ , как правило, более 40 %, гистерезисом на кривой изменения размера частиц из-за различия относительных влажностей растворения  $DRH$  и кристаллизации  $ERH$  можно пренебречь.



а



б

Рис. 1. Электронная микрофотография кристалла морской соли в процессе растворения [15]: а –  $RH = 70\%$ ; б –  $RH = 76\%$



**Моделирование роста  
гигроскопичных соляных частиц**

В настоящее время известно множество различных физических моделей, неплохо описывающих рост гигроскопичных частиц в зависимости от  $RH$ .

Для описания динамики зависимости размера (эквивалентного диаметра) увлажненной аэрозольной частицы  $D(RH)$  от  $RH$  принято использовать безразмерную величину  $GF(RH)$  – фактор роста частиц:

$$GF(RH) = \frac{D(RH)}{D_0(RH)}, \quad (1)$$

где  $D_0(RH)$  – диаметр ее сухой основы – кристалла соли при  $RH = 0 \%$ .

Заметим, что фактор роста при одних и тех же значениях  $RH$  зависит от абсолютного диаметра сухой частицы, что особенно характерно для частиц размером порядка нескольких десятков нанометров [11, 21, 22].

Согласно  $k$ -теории Келера [23] гигроскопические свойства аэрозольных частиц можно определить как функцию параметра гигроскопичности  $k$  и активности воды  $a_w$  в капле раствора, определенной как отношение давления паров воды над плоскими поверхностями водного раствора соли к давлению паров над чистой водой при одной и той же температуре. При условии равновесия соляной аэрозольной капли с водяным паром и малостью эффекта Кельвина, описывающего кривизну поверхности, что справедливо для частиц размером порядка 100 нм и более,  $a_w \approx RH/100$ , а уравнение Келера может быть записано как

$$GF(RH) = \left(1 + k \frac{a_w}{1 - a_w}\right)^{1/3} \approx \left(1 + k \frac{RH/100}{1 - RH/100}\right)^{1/3}, \quad (2)$$

откуда хорошо видно, что чем больше  $k$ , тем больше угол наклона графика зависимости  $GF \approx GF(a_w) \approx GF(RH/100)$ . Оценка для частиц размером более 0,05 мкм дает погрешность замены  $a_w$  на  $RH$  не более 5 %, а для частиц размером более 0,1 мкм – не более 2 %, что вполне допустимо для практики.

Отдельные известные литературные данные о параметрах гигроскопичности  $k$  для соляных аэрозолей представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметр гигроскопичности  $k$  соляных аэрозолей**

Природа соляных аэрозольных частиц	$k$
Морской аэрозоль, $R^2 = 0,9980$ [24]	1,074
Частицы KCl диаметром 100 нм, в диапазоне $0,85 < a_w < 0,95$ [25]	$0,99 \pm 0,07$
Частицы NaCl диаметром 100 нм, в диапазоне $0,85 < a_w < 0,95$ [25]	1,12
NaCl [26]	1,34
NaCl [23]	0,91–1,33; среднее 1,12

Для смесей растворимых компонентов параметр гигроскопичности может быть аппроксимирован как сумма его объемно-взвешенных членов [23]:

$$k = \sum_i k_i \varepsilon_i, \quad (3)$$

где  $k_i$  – параметр гигроскопичности отдельных компонентов смеси;  $\varepsilon_i$  – относительный объем компонента в смеси.

Наша оценка диапазона изменения параметра гигроскопичности  $k$  для сильвинита дает следующее: содержание NaCl в красном сильвините пласта Кр-II Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей колеблется в пределах 71,51–73,20 %, а KCl – в пределах 20,70–21,70 %, причем наличием остальных компонентов можно пренебречь. Тогда с учетом данных табл. 1 для соляного аэрозоля (смеси KCl и NaCl), характерного для воздушной среды, формируемой калийно-магниевыми солями, параметр гигроскопичности изменяется в диапазоне от 1,163 до 1,196 со средним значением 1,180.

Несколько иная (чем (2)) модель для описания фактора роста  $GF(RH)$  представлена в работе [16], согласно которой модельная параметризация  $GF(RH)$  описывается выражением

$$GF(RH) = A \cdot \left(\frac{2 - RH/100}{1 - RH/100}\right)^{1/3}, \quad (4)$$

где  $A$  – коэффициент параметризации, для морского аэрозоля согласно [16] равный

$$A = \frac{4,0}{3,7} \approx 1,081.$$

Уточнение зависимости фактора роста от активности воды, сделанное в [27] для улучшения описания экспериментальных данных, предполагает, что непрерывный гигроскопический рост аэрозольных частиц может быть хорошо описан выражением:

$$GF(RH) = \frac{D(RH)}{D_0(RH)} = \left(1 + \left(a + b \frac{RH}{100} + c \left(\frac{RH}{100}\right)^2\right) \frac{RH/100}{1 - RH/100}\right)^{1/3}, \quad (5)$$

где  $a, b, c$  – параметры аппроксимации, зависящие от вида частиц, и для частиц NaCl согласно [27] представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения параметров  $a, b, c$  модели (5)  
(согласно [27])**

Характеристика параметризации	$a$	$b$	$c$
Некорректированный	3,89243	-4,49667	1,62110
Поправка Кельвина	4,83257	-6,92329	3,27805
Поправка Кельвина и поправка на сферичность	5,78874	-8,38172	3,92650

Широкое распространение [28–30] получили модели, описывающие зависимость  $GF(RH)$  в виде

$$GF(RH) = \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^g + C, \quad (6)$$

где  $g$  – так называемый коэффициент увлажнения;  $C$  – коэффициент параметризации, значения которых для ряда солевых аэрозолей представлены в табл. 3.

В целом, обобщение различных экспериментальных данных, полученных разными исследователями и авторами, представлено на рис. 2. Сплошной линией обозначена зависимость усредненного значения фактора роста частиц соляного аэрозоля, характерного для атмосферы калийных рудников в зависимости от величины  $RH$ .

Полученные результаты использованы при исследовании изменений размеров аэрозольных частиц в модельной воздушной среде в зависимости от значений  $RH$ , что одновременно позволило проверить адекватность изложенных выше теоретических воззрений применительно к конкретным условиям наличия в воздушной среде соляного аэрозоля.

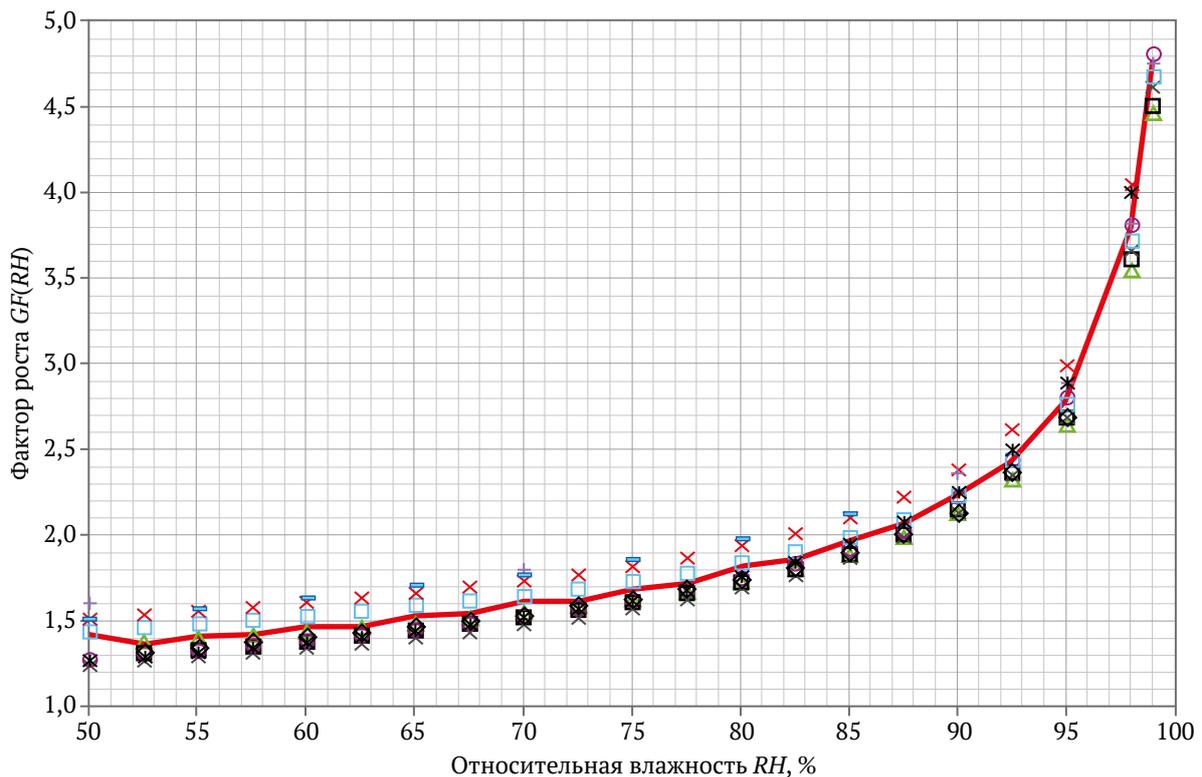
Таблица 3

Значения параметров  $g$  и  $C$  в параметризации (6)

Характеристика аэрозоля	Коэффициент увлажнения $g$	Коэффициент параметризации $C$	Источник
Аккумуляционная мода морского аэрозоля диаметром 0,05 мкм	-0,210	0,00	[28]
Морской аэрозоль, $R^2 = 0,9886$	-0,355	0,00	[24]
KCl, по экспериментальным данным [31]	-0,325	0,05	Авторы

### Экспериментальные исследования

Авторами в качестве полигона для экспериментальных исследований зависимости влияния относительной влажности воздуха на счетное распределение по размерам соляных аэрозольных частиц был выбран специальный модельный объект – сальвинитовая камера, представляющая собой изолированное помещение размером 2,0×3,5 м с контролируемой



- △ Собственные исследования авторов по (4),  $A = 0,99$
- Собственные исследования авторов по (6),  $g = -0,325$ ;  $C = 0,05$
- Собственные исследования авторов, среднее значение
- × KCl, собственные исследования авторов по (2) с  $k = 0,99$  согласно [25]
- NaCl, собственные исследования авторов по (2) с  $k = 1,12$  согласно [25]
- NaCl, по (5) без учета поправок [27]
- × NaCl, по (5) с поправками Кельвина и на сферичность [27]
- ◇ KCl, частицы диаметром порядка 0,1 мкм [25]
- + Морской аэрозоль, мода 0,418 мкм [32]
- NaCl, частицы диаметром порядка 0,05 мкм [11]
- × Морской аэрозоль, по (6),  $g = -0,355$ ;  $C = 0$  [24]

Рис. 2. Экспериментальные и эмпирические данные фактора роста различных соляных аэрозолей в зависимости от относительной влажности

вентиляцией, все стены которого облицованы пресованной соляной сильвинитовой плиткой толщиной 5–7 мм, изготовленной специалистами Горного института Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН. Потолок камеры высотой 2,5 м выполнен из молотого галита, пол комбинированный (проходы из соляных выпиленных из цельной горной породы плиток, а вся остальная площадь представляет собой крупнодробленый галит вперемешку с сильвинитом).

Исследование распределения аэрозольных частиц по размерам выполнено при помощи счетчика аэрозольных частиц АЗ-6 (ПК.ГТА-0,3-002), позволяющего регистрировать аэрозольные частицы шести размерных фракций: от 0,3 мкм и выше, от 0,4 мкм и выше, от 0,5 мкм и выше, от 0,6 мкм и выше, от 0,8 мкм и выше, от 1 мкм и выше. Диапазон измерения счетной концентрации частиц – от  $10^2$  до  $3 \cdot 10^5$   $\text{дм}^{-3}$ . Принцип действия счетчика аэрозольных частиц АЗ-6 оптический и основан на регистрации рассеянного излучения. Предел допускаемой основной относительной погрешности измерений счетной концентрации аэрозоля в диапазоне от  $3 \cdot 10^4$  до  $2,5 \cdot 10^5$   $\text{дм}^{-3}$  составляет  $\pm 40\%$ .

Относительная влажность воздуха фиксировалась при помощи термогигрометра ИВА-6А, позволяющего проводить измерения температуры и относительной влажности воздуха в диапазонах от минус 20 °С до плюс 60 °С и 0–98 % соответственно. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения относительной влажности при 23 °С в диапазоне относительной влажности 0–90 % – не более 2 %, в диапазоне 90–98 % – не более 3 %. Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры не более 0,1 °С.

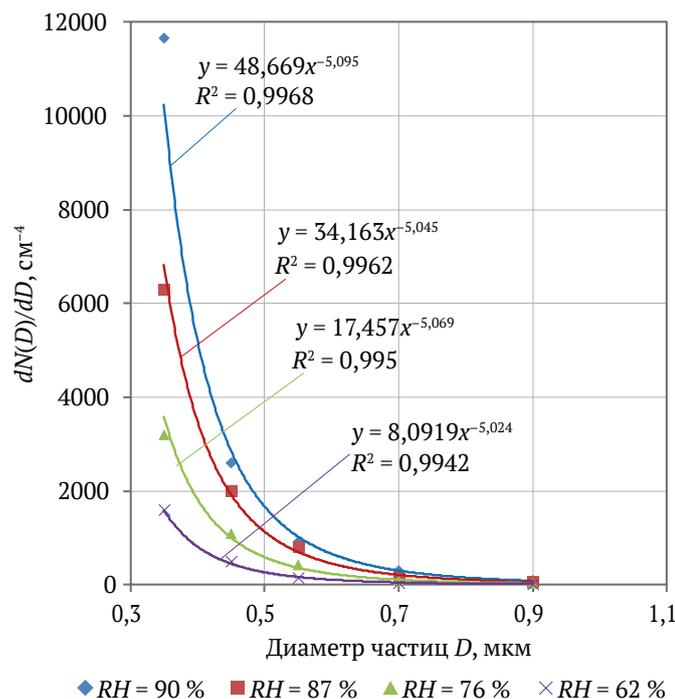


Рис. 3. Распределения соляного аэрозоля по размерам при различных значениях относительной влажности

Длительные исследования медленно меняющегося микроклимата проводились по мере снижения величины  $RH$  от значения в 90 % (такая максимальная влажность была зафиксирована в камере после многодневной дождливой погоды) до 62 % (после нескольких солнечных дней подряд).

Результаты исследований размерных распределений аэрозольных частиц (плотности распределения  $dN(D)/dD$ , где дифференциал  $dN(D)$  определяет число частиц в единице объема, обычно в одном литре,  $\text{дм}^{-3}$ , приходящихся на единичный интервал диаметров  $dD$ , обычно в мкм; приводя к одной размерности, плотность распределения аэрозольных частиц  $dN(D)/dD$  будем выражать в  $\text{см}^{-4}$ ) в модельной воздушной среде, представленные на рис. 3, наглядно показывают снижение концентраций аэрозольных частиц по мере уменьшения  $RH$ , особенно для частиц диаметром порядка 0,3–0,5 мкм, что согласуется с рассмотренными выше механизмами обводнения и осушения соляных частиц. При уменьшении  $RH$  частицы постепенно теряют водяную оболочку, уменьшаясь в размерах, мода распределения соляной аэрозоли смещается в сторону все более мелких частиц, что приводит к снижению числа частиц в фиксированных интервалах размеров частиц 0,3–1 мкм.

### Обсуждение результатов

Аппроксимация спектральных распределений соляных аэрозольных частиц по размерам, представленных на рис. 3, проведена по известной модели Юнга [33–35]:

$$\frac{dN(D)}{d \lg D} = n^*(D_0) \left( \frac{D}{D_0} \right)^{-Y^*},$$

или

$$\frac{dN(D)}{dD} = B^* \cdot n^*(D_0) \left( \frac{D}{D_0} \right)^{-(Y^*+1)}, \text{ см}^{-4}, \quad (7)$$

где  $dN(D)/d \lg D$  – плотность распределения счетной концентрации частиц,  $\text{см}^{-3}$ ;  $N(D)$  – концентрация частиц диаметром больше  $D$ ,  $\text{см}^{-3}$ ;  $D_0$  – произвольно выбранный диаметр частицы в диапазоне от порядка 0,1 мкм до 10,0 мкм, для которого справедливость модели Юнга достоверно доказана;  $n^*(D_0)$  – значение плотности распределения при  $D = D_0$ ,  $\text{см}^{-3}$ ;  $Y^*$  – показатель степени;  $B^* = 1/(\ln 10) \approx 0,434$  – размерный коэффициент пересчета,  $\text{см}^{-1}$ .

Такая запись модели Юнга для описания непрерывного распределения счетной концентрации по размерам была выбрана из соображений того, что уравнение (7), оперирующее с отношениями диаметров  $D/D_0$ , позволяет обеспечить сопоставимость с зависимостями для фактора роста  $GF(RH)$ , также оперирующего согласно (1) с  $D/D_0$ . Кроме того, уравнение (7) в двойных логарифмических координатах изображает функцию распределения в виде прямой линии.

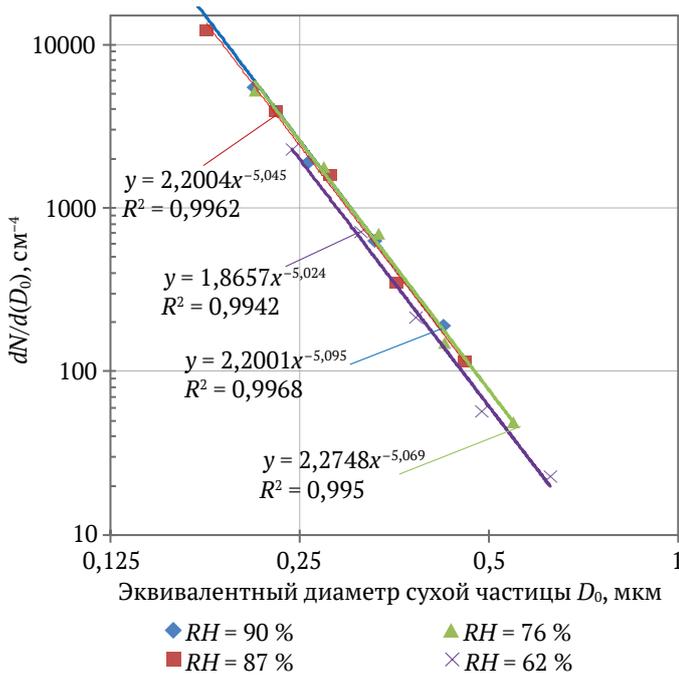


Рис. 4. Эффективное распределение «сухих» аэрозольных частиц

Показатели степени в функциях, аппроксимирующих степенные распределения аэрозольных частиц при различных значениях  $RH$ , мало разнятся (см. рис. 3) и составляют величину  $Y^* = 4,06 \pm 0,03$ . Такое полученное значение хорошо согласуется с результатами, полученными ранее различными исследователями, согласно которым значения показателя степени в модели Юнга для аэрозолей различной физической и химической природы варьируется в диапазоне  $Y^* = 2-5$  [36].

Значения плотности распределения  $n^*(D_0)$  в аппроксимирующих выражениях, представленных на рис. 3, по мере снижения величины  $RH$  уменьшаются, что также согласуется с представленными ранее рассуждениями о процессах кристаллизации соляных аэрозольных частиц и с закономерностями рассмотренной модели Юнга.

Закономерности изменения величины плотности распределения  $n^*(D_0)$  в зависимости от  $RH$  могут быть получены, если принять диаметр частицы за диаметр «сухой» частицы при  $RH = 0\%$  и исходя из полученных ранее и представленных на рис. 2 усредненных величин фактора гигроскопического роста. На рис. 4 представлены распределения «сухих» аэрозольных частиц с диаметром  $D_0$ , рассчитанные по (7) с учетом (1), исходя из значений  $GF(90\%) = 2,13$ ;  $GF(87\%) = 1,97$ ;  $GF(76\%) = 1,65$ ;  $GF(62\%) = 1,44$ . Согласно рис. 4 все эмпирически пересчитанные на «сухой» остаток распре-

деления для всех рассмотренных случаев относительной влажности свелись в двойных логарифмических координатах к единой прямой линии и описываются эмпирическим выражением

$$\frac{dN}{dD_0} = (2,14 \pm 0,18) \cdot (D_0)^{-(5,06 \pm 0,03)}. \quad (8)$$

Полученные результаты позволили не только подтвердить достоверность известных в физике атмосферы и океана закономерностей гигроскопического роста частиц морской соли, но и обобщить размерное распределение Юнга (8) для условий рудничной атмосферы, что позволяет использовать его при моделировании пылевой обстановки в горных выработках калийных рудников.

### Заключение

В работе показаны единые закономерности гигроскопического роста размеров соляных аэрозольных частиц в зависимости от относительной влажности воздуха, характерные как для морского воздуха, так и для рудничной атмосферы калийных рудников.

Показанная высокая сходимость значений фактора гигроскопического роста (среднее значение стандартного отклонения 0,11 в диапазоне изменений значения фактора 1,26–4,77), заимствованных из известных моделей и известных научных данных об обводнении и обратной кристаллизации соляных частиц морского аэрозоля, с результатами, полученными авторами в модельной воздушной среде, характерной для атмосферы соляного рудника, подтверждает возможность их использования при моделировании процессов проветривания рудников. Адаптированные для условий рудника выражения, описывающие динамику размера гигроскопических аэрозольных частиц, состоящих из кристаллов галита ( $\text{NaCl}$ ) и сильвина ( $\text{KCl}$ ), под влиянием относительной влажности, позволяют строить адекватные к реальным условиям модели проветривания, требуемые в том числе при цифровизации проветривания калийных рудников.

Полученные усредненные значения фактора роста для различных условий обводнения частиц и подтвержденная достоверность применения модели Юнга со степенным коэффициентом в выражении  $dN(D)/dD$ , равным  $-(5,06 \pm 0,03)$ , могут быть использованы при построении математических моделей поведения соляной пыли в горных выработках и динамики размеров аэрозольных частиц при увеличении и (или) уменьшении относительной влажности воздуха, что подтверждает их теоретическое и практическое значение для управления рудничным проветриванием.

Таким образом, цели представленных в статье исследований достигнуты, а поставленные задачи решены в полном объеме.

### Список литературы / References

1. Файнбург Г.З. Проблемы становления новой парадигмы проветривания системы горных выработок рудных шахт. Известия ТулГУ. Наука о Земле. 2024;(1): 450–465. Faynburg G. Z. Problems in developing a new ventilation paradigm of mining system ore mines. Proceedings of the Tula States University – Sciences of Earth. 2024;1: 450–465. (In Russ.)



2. Исаевич А.Г., Файнбург Г.З., Мальцев С.В. Экспериментальное исследование динамики изменения фракционного состава соляного аэрозоля в комбайновом забое калийного рудника. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;1:60–71. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_1\\_0\\_60](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_60)  
Isaevich A.G., Fainburg G.Z., Maltsev S.V. Experimental study of the changes dynamics in the fractional composition of salt aerosol in the cutting loading machine face of a potash mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(1):60–71. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_1\\_0\\_60](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_60)
3. Семин М.А., Исаевич А.Г., Жихарев С.Я. Исследование оседания пыли калийной соли в горной выработке. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021;(2):178–191. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210218>  
Semin M.A., Isaevich A.G., Zhikharev S.Y. The analysis of potash salt dust deposition in roadways. *Journal of Mining Science*. 2021;57(2):341–353. <https://doi.org/10.1134/S1062739121020186>
4. Isaevich A., Semin M., Levin L. et al. A Study on the dust content in dead-end drifts in the potash mines for various ventilation modes. *Sustainability*. 2022;14(5):3030. <https://doi.org/10.3390/su14053030>
5. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. *Борьба с пылью на калийных рудниках*. М.: Недра; 1977. 192 с.  
Medvedev I.I., Krasnoshteyn A.E. *Dust control in potash mines*. Moscow: Nedra Publ. House; 1977. 192 p. (In Russ.)
6. Сметанин М.М. Система обеспечения безопасности по пылевому фактору в калийных рудниках. *Записки Горного института*. 2006;168:37–40.  
Smetanin M.M. Safety system for dust factor in potash mines. *Journal of Mining Institute*. 2006;168:37–40. (In Russ.)
7. Файнбург Г.З., Черный К.А. *Естественнонаучные основы нетрадиционного использования соляных горных пород Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей*. Монография. Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2018. 212 с.  
Faynburg G.Z., Chernyi K.A. *Natural scientific basis for the unconventional use of salt rocks from the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts*. Monograph. Perm: Publ. House of Perm National Research Polytechnic University; 2018. 212 p. (In Russ.)
8. Кудряшев А.И. *Верхнекамское месторождение солей*. М.: Геокнига; 2013. 185 с.  
Kudryashev A.I. *Verkhnekamskoye salt deposit*. Moscow: Geokniga; 2013. 185 p. (In Russ.)
9. Ибламинов Р.Г. Коллизия и литогенные полезные ископаемые Пермского Урала. В: *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: научные чтения памяти П.Н. Чирвинского*. 2024;27:50–58. <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2024.50>  
Iblaminov R.G. Collision and lithogenic minerals of Permian Urals. In: *Problems of Mineralogy, Petrography and Metallogeny: Memory Scientific Readings of P.N. Chirvinsky*. 2024;27:50–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2024.50>
10. Файнбург Г.З., Черный К.А. Физические свойства соляных горных пород, формирующие специфические параметры воздушной среды. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2023;(1): 67–80.  
Fainburg G.Z., Chernyi K.A. Physical properties of salt rocks, which are forming specific parameters of air environment. *Proceedings of the Tula States University – Sciences of Earth*. 2023;(1): 67–80. (In Russ.)
11. Pinterich T., Spielman S.R., Wang Y. et al. A humidity-controlled fast integrated mobility spectrometer (HFIMS) for rapid measurements of particle hygroscopic growth. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017;10(12):4915–4925. <https://doi.org/10.5194/amt-10-4915-2017>
12. Kaloshin G.A. Modeling the Aerosol Extinction in Marine and Coastal Areas. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2021;18(3):376–380. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2980866>
13. Kanngießner F., Kahnert M. Modeling optical properties of non-cubical sea-salt particles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021;126(4):e2020JD033674. <https://doi.org/10.1029/2020JD033674>
14. Rosati B., Christiansen S., Dinesen A. et al. The impact of atmospheric oxidation on hygroscopicity and cloud droplet activation of inorganic sea spray aerosol. *Scientific Reports*. 2021;11:10008. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89346-6>
15. Zeng J., Zhang G., Long S. et al. Sea salt deliquescence and crystallization in atmosphere: An in situ investigation using X-ray phase contrast imaging. *Surface and Interface Analysis*. 2013;45(5):930–936. <https://doi.org/10.1002/sia.5184>
16. Lewis E.R., Schwartz S.E. Comment on “size distribution of sea-salt emissions as a function of relative humidity”. *Atmospheric Environment*. 2006;40(3):588–590. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.08.043>
17. Wise M.E., Biskos G., Martin S.T. et al. Phase transitions of single salt particles studied using a transmission electron microscope with an environmental cell. *Aerosol Science and Technology*. 2005;39(9):849–856. <https://doi.org/10.1080/02786820500295263>
18. Mikhailov E., Vlasenko S., Niessner R., Poschl U. Interaction of aerosol particles composed of protein and salts with water vapor: hygroscopic growth and microstructural rearrangement. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2004;4(2):323–350. <https://doi.org/10.5194/acp-4-323-2004>



19. Kanngießner F., Kahnert M. Optical properties of water-coated sea salt model particles. *Optics Express*. 2021;29(22):34926–34950. <https://doi.org/10.1364/OE.437680>
20. Zieger P., Vaisanen O., Corbin J. C. et al. Revising the hygroscopicity of inorganic sea salt particles. *Nature Communications*. 2017;8:15883. <https://doi.org/10.1038/ncomms15883>
21. Михайлов Е.Ф., Власенко С.С., Рышкевич Т.И. Влияние химического состава и микроструктуры на гигроскопический рост пирогенного аэрозоля. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2008;44(4):450–466.  
Mikhaylov E.F., Vlasenko S.S., Ryshkevich T.I. Influence of chemical composition and microstructure on the hygroscopic growth of pyrogenic aerosol. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2008;44(4):416–431. <https://doi.org/10.1134/S0001433808040038>
22. Wang X., Lei H., Berger R. et al. Hygroscopic properties of NaCl nanoparticles on the surface: a scanning force microscopy study. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2020;22(18):9967–9973. <https://doi.org/10.1039/d0cp00155d>
23. Petters M.D., Kreidenweis S.M. A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2007;7(8):1961–1971. <https://doi.org/10.5194/acp-7-1961-2007>
24. Tijjani B.I., Sha'aibu F., Aliyu A. The Effect of Relative Humidity on Maritime Tropical Aerosols. *Open Journal of Applied Sciences*. 2014;4(6):299–322. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2014.46029>
25. Carrico C.M., Petters M.D., Kreidenweis S.M. et al. Water uptake and chemical composition of fresh aerosols generated in open burning of biomass. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010;10(11):5165–5178. <https://doi.org/10.5194/acp-10-5165-2010>
26. Drozd G., Woo J., Häkkinen S.A. K. et al. Inorganic salts interact with oxalic acid in submicron particles to form material with low hygroscopicity and volatility. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014;14(10):5205–5215. <https://doi.org/10.5194/acp-14-5205-2014>
27. Kreidenweis S.M., Koehler K., DeMott P.J. et al. Water activity and activation diameters from hygroscopicity data – Part I: Theory and application to inorganic salts. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2005;5(5):1357–1370. <https://doi.org/10.5194/acp-5-1357-2005>
28. Swietlicki E., Zhou J.C., Covert D.S. et al. Hygroscopic properties of aerosol particles in the north-eastern Atlantic during ACE-2. *Tellus. Series B. Chemical and Physical Meteorology*. 2000;52(2):201–227. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v52i2.16093>
29. Gysel M., McFiggans G. B., Coe H. Inversion of Tandem Differential Mobility Analyser (TDMA) Measurements. *Journal of Aerosol Science*. 2009;40(2):134–151. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.07.013>
30. Adam M., Putaud J.P., Martins dos Santos S. et al. Aerosol hygroscopicity at a regional background site (Ispra) in Northern Italy. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2012;12(13):5703–5717. <https://doi.org/10.5194/acp-12-5703-2012>
31. Jing B., Peng C., Wang Y. et al. Hygroscopic properties of potassium chloride and its internal mixtures with organic compounds relevant to biomass burning aerosol particles. *Scientific reports*. 2017;7:43572. <https://doi.org/10.1038/srep43572>
32. Köpke P., Hess M., Schult I., Shettle E. P. *Global Aerosol Data Set: Report No. 243*. Hamburg: Max-Planck-Institut für Meteorologie; 1997. 46 p.
33. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М.: Мир; 1965. 424 с. (Ориг. вер.: Junge C.E. *Air Chemistry and Radioactivity*. New York: Academic Press; 1963. 382 p.)  
Junge C.E. *Air Chemistry and Radioactivity*. New York: Academic Press; 1963. 382 p. (Trans. ver.: Junge C.E. *Air Chemistry and Radioactivity*. Moscow: Mir Publ. House; 1965. 424 p. (In Russ.))
34. Янике Р. Проблемы распределения глобального аэрозоля. *Успехи химии*. 1990;59(10):1654–1675. <https://doi.org/10.1070/RC1990v059n10ABEH003569>  
Jaenicke R. Problems of the distribution of the global aerosol. *Russian Chemical Reviews*. 1990;59(10):959–972. <https://doi.org/10.1070/rc1990v059n10abeh003569>
35. Васильев А.В. Об использовании аналитических выражений при аппроксимации экспериментально измеренных функций распределения аэрозольных частиц по размерам. В: *Естественные и антропогенные аэрозоли: Материалы 3-й международной конференции*. Санкт-Петербург, 24–27 сентября 2001 г. С-Пб.: Изд-во ВВМ; 2001. С. 98–103.  
Vasil'ev A.V. About using of analytical expressions in approximating experimentally measured size distribution functions of aerosol particles. In: *Natural and anthropogenic aerosols: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference*. St. Petersburg, 24–27 September 2001. St. Petersburg: VVM Publ. House; 2001. Pp. 98–103. (In Russ.)
36. Исмаилов Ф.И. *Атмосферный аэрозоль*. LAP LAMBERT Academic Publishing; 2019. 288 с. <https://doi.org/10.36719/2019/288>  
Ismailov F. I. *Atmospheric aerosol*. LAP LAMBERT Academic Publishing; 2019. 288 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.36719/2019/288>



### Информация об авторах

**Константин Анатольевич Черный** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-4700-0505](https://orcid.org/0000-0002-4700-0505), Scopus ID [57739104200](https://scopus.com/authorid/57739104200); e-mail [chernyy\\_k@mail.ru](mailto:chernyy_k@mail.ru)

**Григорий Захарович Файнбург** – доктор технических наук, профессор, научный руководитель кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9599-7581](https://orcid.org/0000-0002-9599-7581), Scopus ID [57217891724](https://scopus.com/authorid/57217891724); e-mail [faynburg@mail.ru](mailto:faynburg@mail.ru)

### Information about the authors

**Konstantin A. Chernyi** – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Life Safety, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0002-4700-0505](https://orcid.org/0000-0002-4700-0505), Scopus ID [57739104200](https://scopus.com/authorid/57739104200); e-mail [chernyy\\_k@mail.ru](mailto:chernyy_k@mail.ru)

**Grigorii Z. Faynburg** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Scientific Director of the Department of Mining, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9599-7581](https://orcid.org/0000-0002-9599-7581), Scopus ID [57217891724](https://scopus.com/authorid/57217891724); e-mail [faynburg@mail.ru](mailto:faynburg@mail.ru)

**Поступила в редакцию** 16.07.2024

**Поступила после рецензирования** 24.11.2024

**Принята к публикации** 24.12.2024

**Received** 16.07.2024

**Revised** 24.11.2024

**Accepted** 24.12.2024