

DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.323346>

УДК [53.097:547.024] (211)

E-mail:  
tkachenko.katya@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-0334-2519>

*Ключові слова:* сніг, фільтрація, аерозолі, пилогазова суміш.

*Keywords:* snow, filtration, aerosols, dust-gas mixture.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

© Publisher Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2024. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## МОЖЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ КРИСТАЛІВ ЛЬОДУ У ПОГЛИНАННІ АЕРОЗОЛЬНИХ ЧАСТОК

### POTENTIAL PRACTICAL APPLICATIONS OF ICE CRYSTALS FOR ABSORBING OF AEROSOL PARTICLES

**К. Ю. Ткаченко**  
**Kateryna Yu. Tkachenko**

Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b, O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601

Ефективність кристалів льоду у поглинанні аерозольних часток багато вивчалась спеціалістами з фізики льоду та метеорологами як в лабораторних, так і в польових умовах. Накопичено велику кількість експериментального матеріалу, який показує, як варіюючи умови зростання цих кристалів можна змінювати їх мікрофізичні властивості. Але дотепер сніг і лід ніколи не використовувався для практичних цілей (крім операцій виморожування). У статті пропонуються підходи до можливості практичного використання снігових кристалів у системах кондиціонування повітря для уловлювання дрібнодисперсних аерозолів. Ефективність уловлювання можна підвищувати, спрямовано варіюючи електричні властивості частинок снігу. Такий сніговий генератор на шляху пилогазової суміші може бути задіяний як аналог скрубера (проте з більшою ефективністю уловлювання), електрофільтра (проте з можливістю роботи з вибухонебезпечними сумішами) і плазмохімічної установки для очищення газів і дезактивації домішок, що містяться в них. Незважаючи на різноманітність діючих у даний час способів очищення та кондиціонування повітря, уловлювання дрібнодисперсних частинок радіусом  $0,01 \text{ мкм} < r < 1 \text{ мкм}$  (так званий «проміжок Грінфілда») продовжує залишатися серйозною проблемою.

The efficiency of ice crystals in absorbing aerosol particles has been extensively studied by ice physics and meteorology specialists in both laboratory and field conditions. A large body of experimental data has been accumulated, demonstrating how varying the growth conditions of these crystals can alter their microphysical properties. However, until now, snow and ice have never been used for practical purposes (except for freezing operations). The article presents arguments for the potential practical use of snow crystals in air conditioning systems for capturing fine aerosols. The efficiency of capture can be enhanced by deliberately varying the electrical properties of snow particles. Such snow generator placed in the path of a dust-gas mixture could be used as an analogue of a scrubber (but with higher capture efficiency), an electrostatic precipitator (but with the ability to operate with explosive mixtures), and a plasma-chemical system for gas purification and deactivation of contaminants. Despite the variety of air purification and conditioning methods currently in use, the capture of fine particles with a radius of  $0.01 \text{ }\mu\text{m} < r < 1 \text{ }\mu\text{m}$  (the so-called "Greenfield gap") remains a significant challenge.

*Цитування:* Ткаченко К. Ю. 2024. Можливості практичного використання кристалів льоду у поглинанні аерозольних часток. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2024. Том 17, вип. 1. С. 109–120. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.323346>.

*Citation:* Tkachenko K. Yu., 2024. Potential practical applications of ice crystals for absorbing of aerosol particles. Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 17. Iss. 1, Pp. 109–120. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.323346>.

## ВСТУП

Запропоновані підходи до практичного використання штучного снігу в якості фільтра для очищення повітря є результатом авторських досліджень хімічних та фізичних процесів, що відбуваються на поверхні снігу/криги в умовах полярних регіонів. При вивченні питань електризації льоду під впливом різних факторів і впливу цих процесів на хімію атмосфери полярних регіонів (Tkachenko, Kozachkov, 2012; Tkachenko, 2017; Tkachenko, Jacobi, 2024) автором було проаналізовано і зібрано наявні в літературі дані про:

- відносну ефективність уловлювання дрібнодисперсних аерозолів снігом та дощем;
- збільшення цієї ефективності в процесі зростання крижаних кристалів;
- електризацію фазової границі під час зростання крижаного кристала;
- зміни поляризації крижаного кристала варіюванням вмісту домішок у вихідному розчині, що кристалізується;
- можливість ініціювання хімічних реакцій на поверхні зростаючого крижаного кристала;
- збільшення швидкості зростання крижаного кристала в електричному полі.

За результатами аналізу всієї сукупності цих даних були запропоновані нові підходи, які передбачають використання снігу для уловлювання дрібно- (і навіть мікро-) дисперсного пилу, встановивши на шляху пилегазового потоку «снігову гармату», яка генеруватиме кристали снігу *in situ*. Такі кристали снігу виступатимуть у ролі одноразових фільтрів. Поляризація, яка виникатиме в процесі зростання крижаного кристала, сприятиме ефективності уловлювання твердих частинок аерозолу і перебігу хімічних реакцій деструкції органічних домішок. Ефективність уловлювання штучним снігом аерозольних частинок можна контролювати, так як поляризація, що виникає в процесі зростання снігового кристала, може спрямовано варіюватись шляхом зміни домішок у вихідному розчині. Після захоплення аерозольних частинок використаний для цього сніг осідатиме, а після танення підлягатиме очищенню із застосуванням відповідних процедур.

В цілому, така конструкція є одночасно аналогом скрубера (проте з більшою ефективністю уловлювання), електрофільтра (проте з можливістю роботи з вибухонебезпечними сумішами) і плазмохімічної установки для очищення газів і дезактивації домішок, що містяться в них.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

*Механізми взаємодії водяної краплі/сніжинки з частинками аерозолу*

Процес поглинання частинок аерозолів краплями води та частинками криги відбувається у природі у хмарах та під час снігопадів, дощу, туману (так зване «вологе осадження»). Ці процеси всебічно досліджено фахівцями з фізики атмосфери (Reiter, 1964; Reiter, Carnuth, 1965, 1969; Carnuth, 1967; Graedel, Franey, 1975; Itagaki, Koenuma, 1962; Magono et al., 1974, 1975). Відомо, що при взаємодії краплі/сніжинки з частинками аерозолу діють різні механізми: інерційний механізм, перехоплення аерозольної частинки, розсіювання внаслідок впливу дифузійного, температурного градієнтів та конвективного броунівського руху, а також електростатичні взаємодії, що виникають внаслідок наявності електричних зарядів у краплі, сніжинки, аерозольної частинки (рис. 1).

Для різних розмірів частинок внесок перерахованих вище механізмів є різним (Wang, Pruppacher, 1980). Так, перехоплення внаслідок дії броунівських дифузійних механізмів відіграє значну роль для частинок, радіус яких є меншим за 0,01 мкм. Фільтрація завдяки інерційним механізмам значуща для більших частинок, радіус яких понад 1 мкм. Чим більшою є частинка, тим більшою є ймовірність її утримання за механізмом перехоплення. Електричні ефекти проявляють себе в діапазоні розмірів частинок 0,01 мкм <  $r$  < 1 мкм. При вологості близько 100% і за відсутності електричних ефектів уловлювання частинок радіусом 0,01 мкм <  $r$  < 1 мкм практично не відбувається. Цей мінімум у літературі отримав назву «проміжок Грінфілда» — “Greenfield gap” (Grieffield, 1957). У цьому діапазоні рівень поглинання частинок аерозолів краплями води та частинками криги залежить від вологості, температури, величини та знака електричного заряду на частинках аерозолу та краплях/кристалах криги, величини зовнішнього електричного поля.

*Порівняння ефективності уловлювання дрібнодисперсних аерозолів снігом та дощем*

Польові дослідження у німецьких Альпах (Reiter, 1964; Reiter, Carnuth, 1969; Carnuth, 1967), США (Graedel, Franey, 1975), Японії (Koenuma, 1962; Magono et al., 1974, 1975; Murakami et al., 1981) показали більш високу ефективність уловлювання аерозолів снігом (максимально в 50 разів) у порівнянні з дощем, якщо вміст води в цих

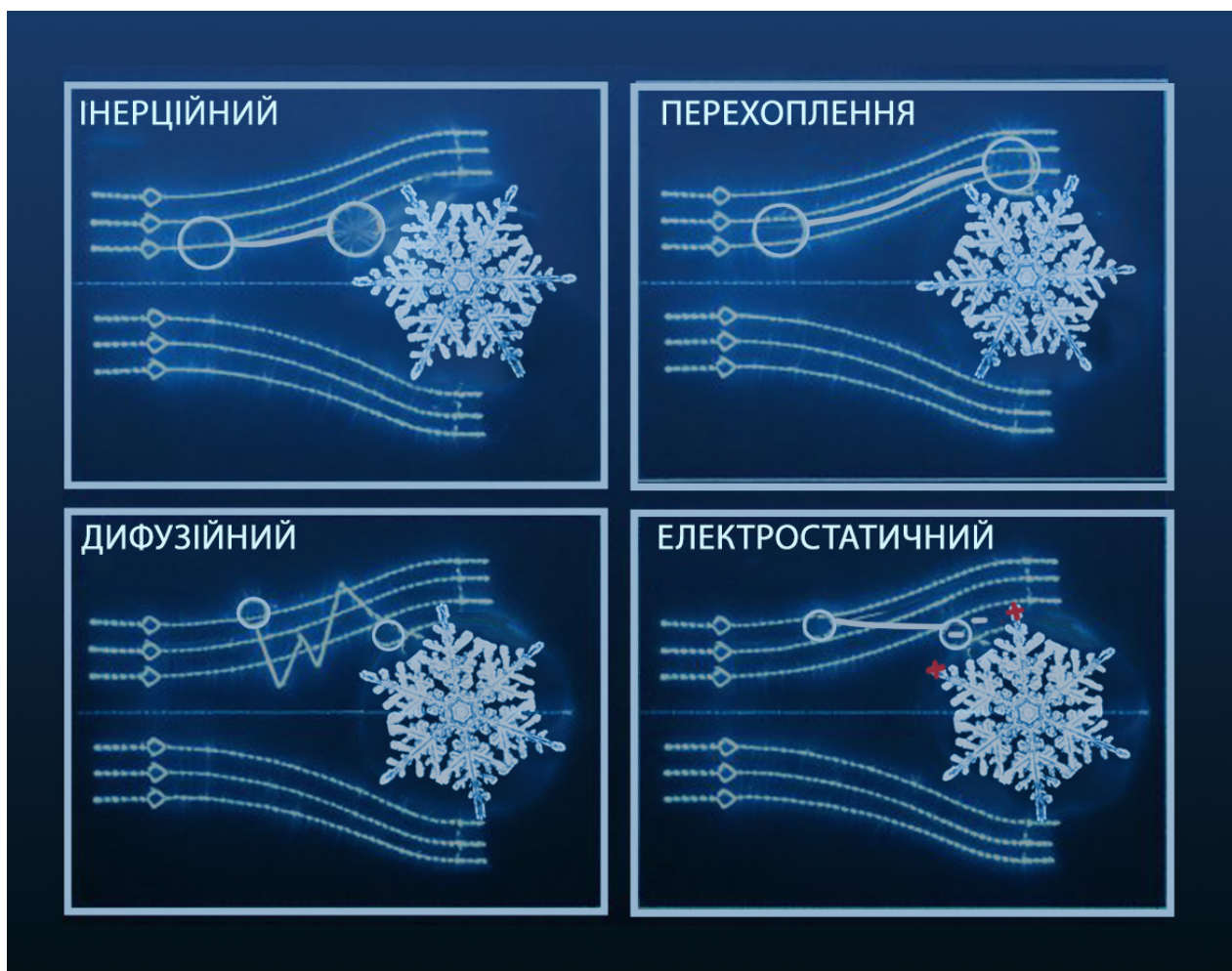


Рис. 1. Механізми фільтрації: інерція, перехоплення, розсіювання, електростатичне тяжіння.

Fig. 1. Filtration mechanisms: inertia, diffusion, interception, and electrostatic.

опадах є однаковим. Аналогічні результати були отримані в лабораторних дослідженнях (Murakami et al., 1985; Sauter, Wang, 1989) та підтверджені моделюванням (Wang, Prupacher, 1980; Martin et al., 1980; Miller, Wang, 1989). Згідно з дослідженнями (Cragin, Hewitt, 1993), субмікронний пил вимивається снігом у 4–5 разів ефективніше, ніж дощем. Ефективність уловлювання снігом субмікронних частинок показана також у роботах (Magono et al., 1975, 1979; Graedel, Franay, 1975; Murakami et al., 1981, 1983; Radke et al., 1980).

*Зростання крижаного кристала та фактори, що впливають на це*

Крижаний кристал, що починає зростати з центра нуклеації, зростає або вздовж центральної осі  $c$  (Face basal), утворюючи стовпчики та голки, або по шістьох осях  $a$  (Face prismatic), утворюючи плоскі гексагональні кристали (рис. 2).

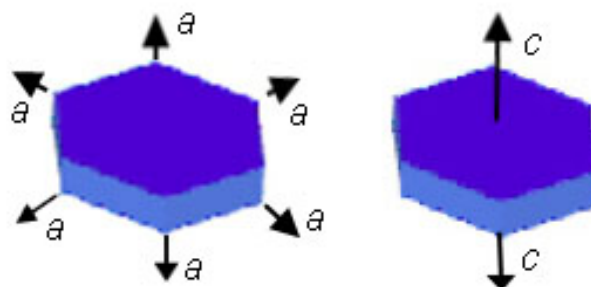


Рис. 2. Напрямки зростання зародку крижаного кристала.

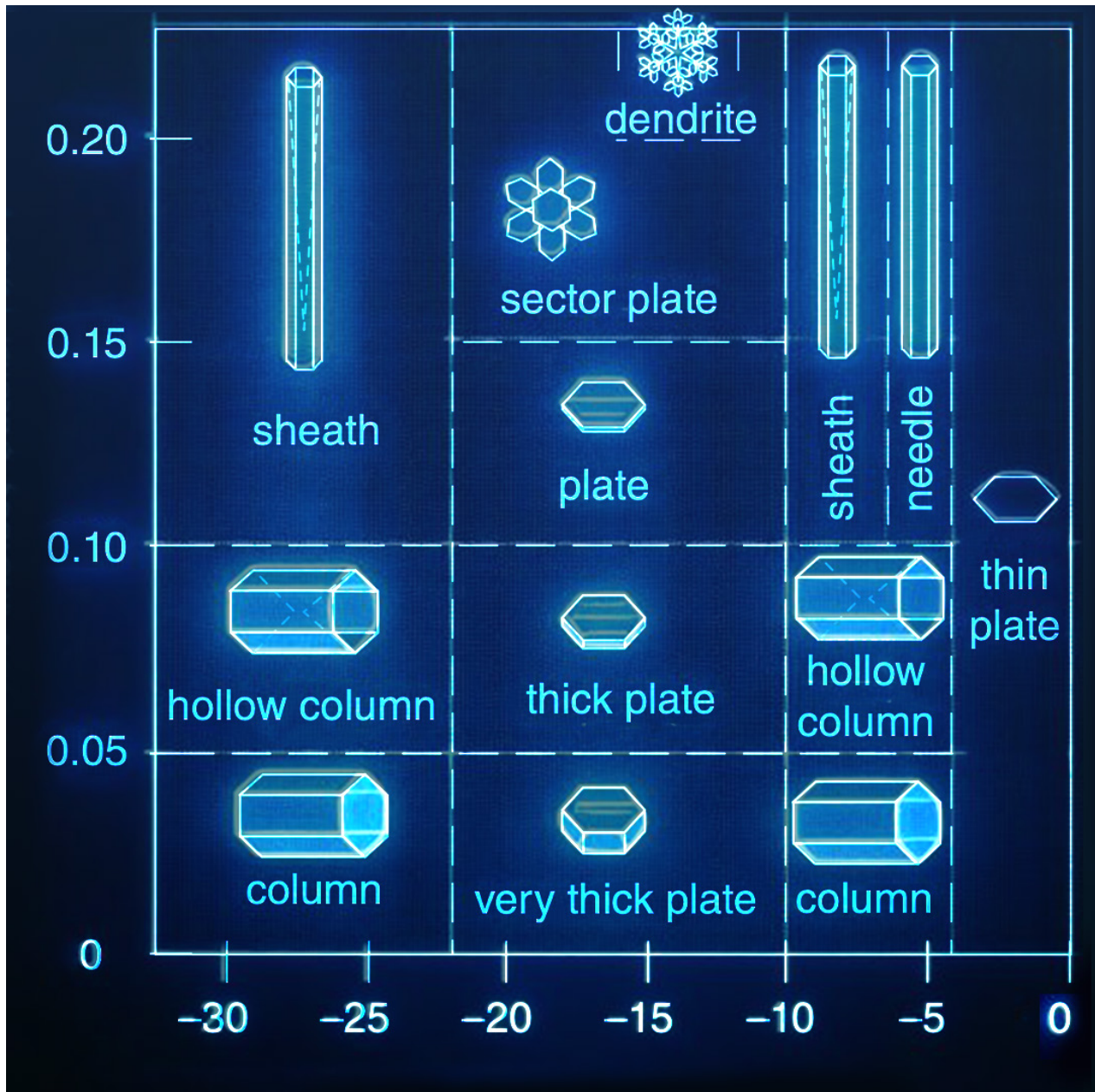
Fig. 2. Directions of an ice crystal growth.



Морфологія кристала, що утворюється, залежить від температури і вологості, тобто, варіюючи співвідношення цих параметрів, можна контролювати морфологію кристала, що утворюється (рис. 3), й отримувати дендрити, стовпчики, шестигранні пластинки, голки тощо.

Крім того, в процесі зростання крижаного кристала відбувається перерозподіл основних носіїв заряду (протонів, гідроксилів та дефектів Б'єрума), зона зростання стає електрично актив-

ною (Nelson, Baker, 2003). Заряд, що накопичується на зростаючому крижаному кінці кристала, поляризує частинки вологи у зоні свого впливу, притягуючи їх в області максимального градієнта електричного поля (рис. 4). За рахунок цих ефектів швидкість зростання крижаного кристала підвищується (Pitter, Finnegan, 2010). Зовнішнє електричне поле ще більше збільшує швидкість зростання крижаного кристала (Libbrecht, 2005), сприяючи голчастій морфології.



**Рис. 3** Залежність морфології крижаного кристала від умов зростання при зміні температури (°C) (вісь X) та перенасиченні парю (г/м³) (вісь Y) (ілюстровано автором за даними (Young, 1993)).

**Fig. 3.** Ice crystal morphology dependence of the growth conditions, where X-axis is temperature (°C), and Y-axis is vapor supersaturation (g/m³) (illustrated by the author based on data from (Young, 1993)).

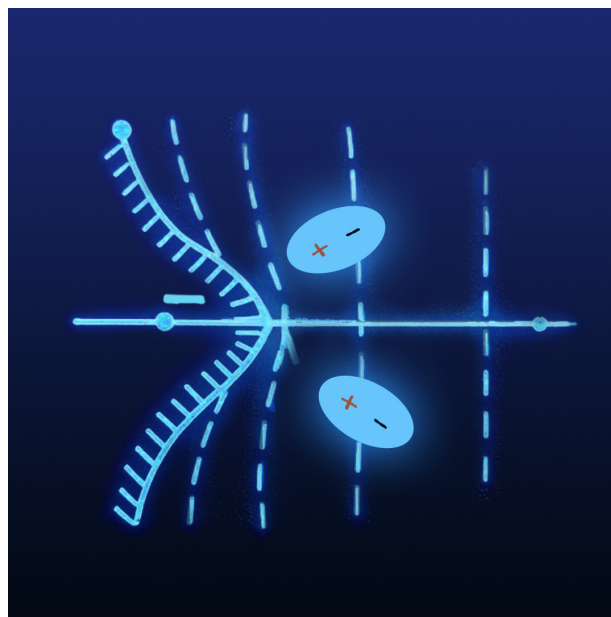
Вплив розподілу заряду в процесі зростання крижаного кристала на ефективність уловлювання аерозолів досліджено у публікації (Zhang, Pitter, 1991). Результати моделювання та лабораторні дослідження підтверджуються даними польових робіт. Так, у праці (Wang, 2002) показано, що шестигранні крижані пластинки (plates), більш активно вловлюють частинки в субмікронному діапазоні  $0,01 \text{ мкм} < r < 1 \text{ мкм}$  (Greenfield gar), а крапельки води і крижані стовпчики (ice columns) більш ефективні при вловлюванні крупних частинок. Це може свідчити про те, що утворені в результаті швидкого зростання шестигранні пластинки ефективні за рахунок прояву електричних ефектів. У той же час при уловлюванні крупних частинок діють інерційні механізми. Тому ефективними є повільно зростаючі крижані стовпчики і краплі води.

*Можливість впливу на напрямок поляризації крижаного кристала та електричний потенціал у зоні зростання*

Виникнення значної різниці потенціалів на границі «зростаючий крижаний кристал/квасирідкий шар на його поверхні» було описано E. J. Workman and S. E. Reynolds у 1950 р. і носить ім'я своїх відкривачів (Workman, Reynolds, 1950). Величина та знак цієї різниці потенціалів визначається іонним складом і концентрацією вихідного розчину солі, причому ефект спостерігається тільки в діапазоні концентрацій  $10^{-3}$ – $10^{-6}$  н. Наприклад, зростання крижаного кристала з  $10^{-4}$  н розчину NaCl призводить до виникнення «потенціалу зростання» 30 В, з  $4 \cdot 10^{-6}$  н розчину сульфату амонію – до потенціалу –61 В, а з  $10^{-4}$  н розчину карбонату амонію – до 109 В (Gross, 1967).

Процес зростання супроводжується перерозподілом зарядів усередині крижаного кристала – заряди одного знака концентруються у зоні зростання, а протилежного – у центрі кристала, тобто сумарний заряд системи залишається нульовим (Рис. 5).

E. J. Workman and S. E. Reynolds (Workman, Reynolds 1950) пояснювали ці ефекти вибіркоким включенням деяких іонів у кристалічну ґратку крижаного кристала. Інші вчені (Finnigan, Pitter, 1997) вважали, що цей потенціал є результатом перерозподілу іонів на границі «квасирідкий шар/криг». А модельні розрахунки (Nelson, Baker, 2003) виходили з того, що виникнення потенціалу зростання є результатом міграції протонів, гідроксидів та дефектів Б'єрума, які є основними



**Рис. 4.** Механізм стимулювання зростання крижаного кристала завдяки електричному заряду, що акумулюється в зоні зростання. Як результат, лінії електростатичного поля концентруються, мікрокраплі вологи поляризуються і притягуються.

**Fig. 4.** Mechanism of stimulating ice crystal growth due to the electric charge accumulated in the growth zone. As a result, electrostatic field lines concentrate, microdroplets of moisture become polarized and are attracted.

носіями заряду у кризі. І хоча існує різноманіття трактувань механізмів електризації зростаючого крижаного кристала, але наявність цього феномена – багаторазово експериментально підтверджений факт (Findeisen, 1940; Takahashi, 1973; Dong, Hallett, 1992). Після зупинки зростання кристала льоду поляризація зникає. Таким чином, умови зростання крижаних кристалів можуть впливати не тільки на його морфологію та швидкість зростання, але також на розподіл заряду.

*Стимулювання хімічних реакцій на поверхні снігових кристалів*

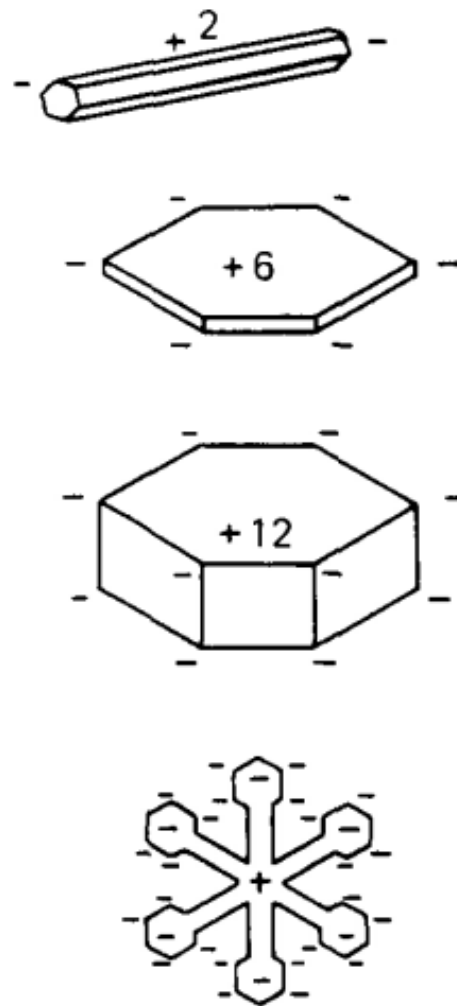
Електричний потенціал, що виникає в процесі зростання крижаного кристала, може призводити до хімічних реакцій. У роботах (Finnigan et al., 1991, 2001) наведено докази того, що потенціал зростання може ініціювати редокс-реакції на поверхні крижаного кристала. У публікації (Takenaka et al., 1996) продемонстровано, що деякі реакції можуть навіть прискорюватися при заморожуванні. (Takenaka et al., 1996) пояснювали це

концентрування компонентів у квазірідкому шарі на поверхні крижаного кристала.

Останні 20 років роль крижаних аерозолів в ініціюванні вільнорадикальних реакції, що призводять до окиснення галогенід аніонів, знаходиться в центрі уваги полярних дослідників (Simpson et al., 2015; Gonçalves et al., 2023). Розрив хімічного зв'язку, що спричиняє утворення вільних радикалів та ініціювання реакцій за їх участю в полярних умовах, відбувається завдяки впливу УФ-квантів (Bartels-Rausch et al., 2014) чи електрики (Tkachenko, Kazachkov, 2012), що може також бути використано в умовах установки, яка пропонується. Таким чином, штучний сніг не тільки вловлюватиме домішки, але також виступатиме в якості субстрату для перебігу реакцій окиснення і розкладання хімічних речовин, що присутні у складі пилу. У наших попередніх роботах уже обговорювалася можливість використання снігу як носія в установці для дезактивації особливо небезпечних речовин, зокрема вибухонебезпечних (Ткаченко та ін., 2015).

Таким чином, підбиваючи перші підсумки, можна констатувати, що сніг може бути ефективним для уловлювання дрібних частинок до 1 мкм, для яких вплив форетичних та електричних сил є визначальним. Кристал криги при зростанні поляризується, і зона росту є електрично активною, поляризуючи мікрочаплі вологи в зоні свого впливу, втягуючи і вбудовуючи їх у кристалічну ґратку (див. рис. 4). Тому зростання кристала прискорюється, що, своєю чергою, збільшує поляризацію крижаного кристала. Спостерігається позитивний зворотний зв'язок між швидкістю зростання крижаного кристала та електризацією фазової границі. Високі електричні потенціали, що виникають у зоні зростання, можуть призводити до хімічних перетворень (дезактивації?) захоплених органічних молекул. Контрольоване застосування електричного поля може стимулювати описані вище процеси.

*Короткий огляд технік, які застосовуються на даний час для очищення атмосферних потоків, що містять домішки аерозолів*  
Спектр методів, що використовуються в даний час для очищення повітря від твердих частинок, є досить широким (Industrial..., 2001, 2021). Проте кожен із методів має свої обмеження. Ефективність застосування тієї чи іншої системи фільтрації оцінюється для кожного конкретного випадку. Приймаються до уваги:



**Рис. 5.** Поляризація зростаючих крижаних кристалів, за ((Finnigan, Pitter, 1988) за дозволом Elsevier)<sup>1</sup>.

**Fig. 5.** Polarization of growing ice crystals according to ((Finnigan, Pitter, 1988), Copyright 1988, with permission from Elsevier).

- собівартість очищення;
- ефективність очищення, зокрема, можливість вловлювати мікрочастинки;
- можливість вбудувати очисну установку в технологічний цикл, що передбачає можливість проводити автоматичну регенерацію фільтра;
- можливість очищення вибухонебезпечних газових та пилових сумішей.

<sup>1</sup> Надруковано з праці Finnigan W. G., Pitter R. L. A postulate of electric multipoles in growing ice crystals: Their role in the formation of ice crystal aggregates. Atmospheric Research. 1988. Vol. 22. P. 235–250. Copyright 1988, with permission from Elsevier.)



Як правило, технології, які широко використовуються в даний час для фільтрації газових потоків відповідають не всім, а лише деяким з перерахованих вимог. Дешеве гравітаційне очищення дозволяє вловлювати лише крупні частинки. Відцентрові пиловловлювачі, так звані циклони, засновані на інерційному осадженні зважених частинок за рахунок створення в полі руху газового потоку відцентрової сили при зміні його напрямку руху (див. рис. 1). Циклони застосовуються здебільшого для осадження частинок 10–20 мкм. Ці фільтри неможливо вбудувати безпосередньо у технологічний цикл, так як необхідним є періодичне розбирання з очищенням фільтра. Промивний спосіб очищення газу здійснюється промиванням газового потоку розчинником, частіше водою та конструктивно представлений скруберами. Ступінь уловлювання пилу в таких апаратах тим більше, чим більші витрати зрошуючої рідини та розмір частинок пилу. Таким чином, у цих методах значно вищою є ефективність уловлювання крупних частинок. При механічній фільтрації газовий потік направляється у фільтр-пиловловлювач, в якому волога і зважені частинки осаджуються на елементі, що фільтрує. Використовуються паперові, керамічні, тканинні, полімерні та інші матеріали, які вимагають періодичної заміни або регенерації, що є дорогою процедурою. Чим меншою є дисперсність зважених частинок, тим швидше забивається механічний фільтр.

Уловлювання частинок розміром менше 1 мкм є технологічною проблемою, з якою найбільш ефективно порастється електрофільтр. При пропусканні пилогазової суміші через електричний фільтр відбувається іонізація газу, і заряджені частинки захоплюються осаджувальними електродами, звідки періодично видаляються. Електроосадження — досить універсальний спосіб фільтрації, що дозволяє працювати з різними середовищами, температурами, тиском. Тим не менш, цей метод має суттєве обмеження — неможливість проводити очищення вибухонебезпечних газів та пилу. Промивний спосіб здається найбільш ефективним для роботи з вибухонебезпечними пиловими газовими потоками, проте, як ми вже згадували вище, проблемою цього способу фільтрації є недостатня ефективність уловлювання мікродисперсного (< 1 мкм) пилу. Електрофільтри та фільтри для промивання ефективні для вбудовування в технологічний цикл на відміну від установок фільтрації центробіжним і механічним способами, які вимагають періодичних зупи-

нок для очищення/заміни камери фільтруючого елементу.

Таким чином, короткий аналіз технологій фільтрації, що активно використовуються в даний час, показує, що найбільшою проблемою є вловлювання мікродисперсного потенційно вибухонебезпечного пилу. Пропонований нами новий технологічний підхід дозволяє вирішити цю проблему.

#### *Принцип конструкції устаткування, що пропонується*

Згідно з підходом, запропонованим авторкою, така установка для очищення повітря від дрібнодисперсного пилу повинна включати снігову гармату, що встановлюватиметься на шляху попередньо охолодженої пилогазової суміші. Стандартні снігові гармати, що використовуються на гірськолижних курортах і виробляють сніг із крапель при швидкому охолодженні, не можуть бути застосовані, оскільки в установці має використовуватись сніг кристалічної структури, який є поляризованим (див. рис. 5), наприклад, гексагональної морфології. Параметри зовнішнього електричного поля і концентрація вихідного розчину можуть застосовуватись для спрямованого впливу на морфологію (див. рис. 2) і сорбційні характеристики снігових кристалів. Передбачається, що сніг, який розпилюватиметься, уловлюватиме аерозолі. Після осадження сніг розтоплюватиметься, а отриманий розчин очищуватиметься від домішок.

#### *Отримання снігу гексагональної морфології*

Для отримання снігу гексагональної морфології можна використати зразки снігових гармат, наприклад, патент (Breiling et al., 2012), які розроблені для продукування снігу гексагональної морфології для гірськолижного спорту. Принципова схема апарату (Breiling et al., 2012) така: спочатку потік вологого повітря змішується у закритому просторі з потоком холодного повітря для створення атмосфери, перенасиченої вологою; далі конструкція приладу забезпечує формування кристалів льоду та можливість зростання сніжинок, що левітують у перенасиченій атмосфері приладу протягом заданого періоду часу, який є необхідним для отримання сніжинок із задалегідь заданими параметрами; потім кристали снігу, що утворюються, переміщуються потоком повітря по спіралі і в результаті перерозподіляються вздовж цієї траєкторії відповідно до свого розміру; отримання сніжинок заданого розміру відбувається

через певний час через випускний отвір приладу продуванням потоком повітря носія.

#### Переваги методу, що пропонується

Установка для очищення повітря описаного вище типу може розглядатися як:

- Аналог скрубера, проте ефективність уловлювання вище, так як ефективність уловлювання снігом вища, ніж дощем. Установка дозволить уловлювати мікродисперсні частинки (до 1 мкм).
- Аналог електрофільтра. Має ті ж переваги, що й електрофільтр, а саме: високу ступінь очищення, незалежність від тиску газів; широкий діапазон концентрацій та агресивності пилу; повну автоматизацію роботи. Проте пропонується метод дозволяє уловлювати такі види пилу, для яких електрофільтрація не може бути застосована (наприклад, сажа, відгони окису цинку та ін.).
- Аналог плазмо-хімічного методу. Застосування сильних зовнішніх полів призведе до виникнення на кожному зі снігових кристалів коронного розряду. Тоді потік снігових частинок перетвориться на область холодної плазми, в якій газоподібні органічні забруднювачі будуть руйнуватися, трансформуючись у менш шкідливі сполуки.

#### ВИСНОВКИ

У статті пропонується інноваційний підхід до практичного використання снігових кристалів у системах для очищення повітря й уловлювання дрібнодисперсних аерозолів із застосуванням досвіду, накопиченого метеорологами та фахівцями з атмосферної електрики. Знаючи фактори, що зумовлюють електризацію кристалів льоду, змінюючи умови зростання та хімічний склад вихідних розчинів, можна спрямовано варіювати електричні властивості зростаючих снігових кристалів та їх сорбційні властивості. Створення такої установки дозволить вирішити проблему уловлювання вибухонебезпечних дрібнодисперсних частинок радіусом  $0,01 \text{ мкм} < r < 1 \text{ мкм}$ , для яких не можуть бути застосовані електрофільтри та уловлювання яких продовжує залишатися на даний час проблемою.

*Представлені дослідження проведено в рамках бюджетної теми «Будова та склад літосфери, хімія атмосфери та гляціосфери західної частини Антарктичного півострова» та за підтримки Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці.*

*Авторка щиро вдячна доктору хімічних наук О. А. Варзацькому за цікаві та плідні дискусії.*

#### REFERENCES

Tkachenko. E. Y., Varzatskii O. A., Lozovoy M. A., 2015. "Cold combustion" as a new method of toxic waste destruction *Science Rise*. Vol. 5, No. 10. Pp. 106–110. (In Russian). <http://dx.doi.org/10.15587/2313-8416.2015.42289>.

Alvarez-Aviles L., Simpson W. R., Douglas T. A., Sturm M., Perovich D., Domine F., 2008. Frost flower chemical composition during growth and its implications for aerosol production and bromine activation. *J. Geophys. Res.* Vol. 113. D21304. <https://doi.org/10.1029/2008JD010277>.

Bartels-Rausch T., Jacobi H.-W., Kahan T. F., Thomas J. L., Thomson E. S., Abbatt J. P. D., Ammann M., Blackford J. R., Bluhm H., Boxe C., Domine F., Frey M. M., Gladich I., Guzmán M. I., Heger D., Huthwelker Th., Klán P., Kuhs W. F., Kuo M. H., Maus S., Moussa S. G., McNeill V. F., Newberg J. T., Pettersson J. B. C., Roeselová M., and Sodeau J. R., 2014. A review of air-ice chemical and physical interactions (AICI): liquids, quasi-liquids, and solids in snow. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 14. Pp. 1587–1633. <https://doi.org/10.5194/acp-14-1587-2014>.

Ткаченко Е. Ю., Варзацкий О. А., Лозовой М. А. «Холодное сжигание» — новый метод деструкции токсических отходов. *Science Rise*. 2015. Vol. 5, № 10. С. 106–110. <http://dx.doi.org/10.15587/2313-8416.2015.42289>.

Alvarez-Aviles L., Simpson W. R., Douglas T. A., Sturm M., Perovich D., Domine F. Frost flower chemical composition during growth and its implications for aerosol production and bromine activation. *J. Geophys. Res.* Vol. 113. 2008. D21304. <https://doi.org/10.1029/2008JD010277>.

Bartels-Rausch T., Jacobi H.-W., Kahan T. F., Thomas J. L., Thomson E. S., Abbatt J. P. D., Ammann M., Blackford J. R., Bluhm H., Boxe C., Domine F., Frey M. M., Gladich I., Guzmán M. I., Heger D., Huthwelker Th., Klán P., Kuhs W. F., Kuo M. H., Maus S., Moussa S. G., McNeill V. F., Newberg J. T., Pettersson J. B. C., Roeselová M., and Sodeau J. R. A review of air-ice chemical and physical interactions (AICI): liquids, quasi-liquids, and solids in snow. *Atmos. Chem. Phys.* 2014, Vol. 14. P. 1587–1633. <https://doi.org/10.5194/acp-14-1587-2014>.



- Breiling M., Bacher M., Sokratov S., Best F. G., 2012. Patent WO2011029115 Method and device for producing snow. Pub. No.: US 2012/0193440 A1 Pub. Date: Aug. 2, 2012.
- Carnuth W., 1967. Zur Abhaengigkeit des Aerosol Partikel Spektrum von meteorologischen Vorgaengen und Zustaende. *Arch. f. Meteor. Geophys. Biokl. Ser. A*. Vol. 16. Pp. 321–343. <https://doi.org/10.1007/BF02246477>.
- Cragin J. H., Hewitt A. D., 1993. Aerosol Scavenging by falling snow. *50th eastern snow conf., 61st western snow conference*, Quebec City, Pp. 307–314.
- Dong Y., Hallett J., 1992. Charge separation by ice and water drops during growth and evaporations. *J. Geophys. Res.* Vol. 97 (D18). Pp. 20361–20371. <https://doi.org/10.1029/92JD02075>.
- Findeisen W., 1940. On the origin of storm electricity. *Meteorol. Zh.* Vol. 57, No. 6. Pp. 201–215.
- Finnigan W. G., Pitter R. L., 1988. A postulate of electric multipoles in growing ice crystals: their role in the formation of ice crystal aggregates. *Atmospheric Research*. Vol. 22, Pp. 235–250. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(88\)90019-1](https://doi.org/10.1016/0169-8095(88)90019-1).
- Finnegan W. G., Pitter R. L., Young L. G., 1991. Preliminary study of coupled oxidation-reduction reactions of included ions in growing ice crystals. *Atmospheric Environment*. Vol. 25A, No. 11, Pp. 2531–2534. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90169-8](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90169-8).
- Finnegan W. G., Pitter R. L., 1997. Ion-induced charge separations in growing single ice crystals: Effects on growth and interaction processe., *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 189. Pp. 322. <https://doi.org/10.1006/jcis.1997.4829>.
- Finnegan W. G., Pitter R. L., Hinsvark B. A., 2001. Redox Reactions in Growing Single Ice Crystals: A Mechanistic Interpretation of Experimental Results. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 242. Pp. 373–377. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7825>.
- Graedel T. E., Franey J. P., 1975. Field measurements of submicron aerosol washout by snow. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 2. Pp. 325–328. <https://doi.org/10.1029/GL002i008p0032>.
- Gonçalves Jr. S. J., Evangelista H., Weis J., Tristan H. H., China S., Müller S., Marques M. M., de Magalhães Neto N., Passos H. R., Sampaio M., Simões J. C., de Oliveira B. V. X., Yamamoto C. I., Laskin A., Gilles M. K., Godoi R. H. M., 2023. Stratospheric ozone depletion in the Antarctic region triggers intense changes in sea salt aerosol geochemistry. *Commun Earth Environ.* Vol. 4. P. 77. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00739-z>.
- Greenfield S. M., 1957. Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere. *J. Meteorol.* Vol. 14, No. 2. Pp. 115–125. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1957\)014<0115:RSORPM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1957)014<0115:RSORPM>2.0.CO;2).
- Gross G. W., 1968. Some effects of trace inorganics on the ice/water system. In: Trace Inorganics in Water. Advances in Chemistry Series, 73. American Chemical Society, Washington, D. C., Pp. 27–97.
- Industrial Ventilation Design Guidebook., 2001. (Eds. H. Goodfellow and E. Tahti). Academic Press, Vol. 1. 1519 p.
- Industrial Ventilation Design Guidebook., 2021. (Eds. H. Goodfellow and Yi. Wang). Academic Press, Vol. 2. 713 p.
- Breiling M., Bacher M., Sokratov S., Best F. G. Patent WO2011029115 Method and device for producing snow. Pub. No.: US 2012/0193440 A1 Pub. Date: Aug. 2, 2012.
- Carnuth W. Zur Abhaengigkeit des Aerosol Partikel Spektrum von meteorologischen Vorgaengen und Zustaende. *Arch. f. Meteor. Geophys. Biokl. Ser. A*. 1967. Vol. 16. P. 321–343. <https://doi.org/10.1007/BF02246477>.
- Cragin J. H., Hewitt A. D., Aerosol Scavenging by falling snow. *50th eastern snow conf., 61st western snow conference*, Quebec City, 1993. P. 307–314.
- Dong Y., Hallett J., Charge separation by ice and water drops during growth and evaporations. *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97 (D18). P. 20361–20371. <https://doi.org/10.1029/92JD02075>.
- Findeisen W. On the origin of storm electricity. *Meteorol. Zh.* 1940. Vol. 57, No. 6. P. 201–215.
- Finnigan W. G., Pitter R. L. A postulate of electric multipoles in growing ice crystals: their role in the formation of ice crystal aggregates. *Atmospheric Research*. 1988. Vol. 22, P. 235–250. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(88\)90019-1](https://doi.org/10.1016/0169-8095(88)90019-1).
- Finnegan W. G., Pitter R. L., Young L. G. Preliminary study of coupled oxidation-reduction reactions of included ions in growing ice crystals. *Atmospheric Environment*. 1991. Vol. 25A, No. 11, P. 2531–2534. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90169-8](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90169-8).
- Finnegan W. G., Pitter R. L. Ion-induced charge separations in growing single ice crystals: Effects on growth and interaction processe., *Journal of Colloid and Interface Science*. 1997. Vol. 189. P. 322. <https://doi.org/10.1006/jcis.1997.4829>.
- Finnegan W. G., Pitter R. L., Hinsvark B. A. Redox Reactions in Growing Single Ice Crystals: A Mechanistic Interpretation of Experimental Results. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2001. Vol. 242. P. 373–377. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.7825>.
- Graedel T. E., Franey J. P. Field measurements of submicron aerosol washout by snow. *Geophys. Res. Lett.* 1975. Vol. 2. P. 325–328. <https://doi.org/10.1029/GL002i008p0032>.
- Gonçalves Jr. S. J., Evangelista H., Weis J., Tristan H. H., China S., Müller S., Marques M. M., de Magalhães Neto N., Passos H. R., Sampaio M., Simões J. C., de Oliveira B. V. X., Yamamoto C. I., Laskin A., Gilles M. K., Godoi R. H. M. Stratospheric ozone depletion in the Antarctic region triggers intense changes in sea salt aerosol geochemistry. *Commun Earth Environ.* 2023. Vol. 4. P. 77. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00739-z>.
- Greenfield S. M. Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere. *J. Meteorol.* 1957. Vol. 14, No. 2. P. 115–125. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1957\)014<0115:RSORPM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1957)014<0115:RSORPM>2.0.CO;2).
- Gross G. W. Some effects of trace inorganics on the ice/water system. In: Trace Inorganics in Water. Advances in Chemistry Series, 73. American Chemical Society, Washington, D. C., 1968. P. 27–97.
- Industrial Ventilation Design Guidebook. (Eds. H. Goodfellow and E. Tahti). Academic Press, 2001. Vol. 1. 1519 p.
- Industrial Ventilation Design Guidebook. (Eds. H. Goodfellow and Yi. Wang). Academic Press, 2021. Vol. 2. 713 p.

- Itagaki K., Koenuma S., 1962. Altitude distribution of fallout contained in rain and snow. *J. Geophys. Res.* Vol. 67. Pp. 3927–3933. <https://doi.org/10.1029/JZ067i010p03927>.
- Libbrecht K. G., 2005. The physics of snow crystals. *Reports on Progress in Physics*. Vol. 68, No. 4. P. 855–895. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/4/R03>.
- Magono C., Endoh T., Hariyama T., Kuboda S., 1974. A measurement of scavenging effect of falling snow crystals on the aerosol concentration. *J. Meteor. Soc., Japan*. Vol. 52. Pp. 407–416. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.52.5\\_407](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.52.5_407).
- Magono C., Endoh T., Itasaka M., 1975. Observation of aerosol particles attached to falling snow crystals. *J. Fac. Sci., Hokkaido Universit.*, Vol. 4. Pp. 103–119.
- Magono C., Endoh T., Ueno F., Kubota S., Itasaka M., 1979. Direct observations of aerosols attached to falling snow crystals. *Tellus*. Vol. 31. Pp. 102–114. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v31i2.10415>.
- Martin J. J., Wang P. K., Pruppacher H. R., 1980. A theoretical study of the effect of electric charges on the efficiency with which aerosol particles are collected by simple ice crystal plates. *J. Colloid interface. Sci.* Vol. 78. Pp. 44–56. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(80\)90494-4](https://doi.org/10.1016/0021-9797(80)90494-4).
- Miller N. L., Wang P. K., 1991. A theoretical determination of the collection rates of aerosol particles by falling ice crystal plates and columns. *Atmospheric Environment*. Vol. 25, No. 11. Pp. 2593–2606. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90177-9](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90177-9).
- Murakami M., Hiramatsu C., Magono C., 1981. Observation of aerosol scavenging by falling snow crystals at two sites of different heights. *J. Met. Soc. Japan*. Vol. 59. Pp. 763–811. [https://doi.org/10.2151/JMSJ1965.59.5\\_763](https://doi.org/10.2151/JMSJ1965.59.5_763).
- Murakami M., Kimura T., Magono C., Kikuchi K., 1983. Observation of precipitation scavenging for water-soluble particles. *J. Met. Soc. Japan*. Vol. 61. Pp. 346–358. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.61.3\\_346](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.61.3_346).
- Murakami M., Kikuchi K., Magono C., 1985. Experiments of aerosol scavenging by natural snow crystals. Part I. Collection efficiency of uncharged snow crystals for micron and submicron particles. *J. Met. Soc. Japan*. Vol. 63. Pp. 119–129. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.63.1\\_119](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.63.1_119).
- Murakami M., Kikuchi K., Magono C., 1985. Experiments of aerosol scavenging by natural snow crystals. Part II Attachment rate of 0.1  $\mu\text{m}$  diameter particles to stationary snow crystals. *J. Met. Soc. Japan*. Vol. 63. Pp. 130–135. [https://doi.org/10.2151/JMSJ1965.63.1\\_130](https://doi.org/10.2151/JMSJ1965.63.1_130).
- Nakaya U., 1954. *Snow Crystals: Natural and Artificial*. Cambridge: Harvard University Press,
- Nelson J., Baker M., 2003. Charging of ice-vapor interfaces: applications to thunderstorms. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 3. Pp. 1237–1252. <https://doi.org/10.5194/acp-3-1237-2003>.
- Pitter R. L., Finnegan W. G., 2010. Mechanism of single ice crystal growth in mixed clouds. *Atmospheric Research*. Vol. 97, No. 4. Pp. 438–445. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.05.012>.
- Itagaki K., Koenuma S. Altitude distribution of fallout contained in rain and snow. *J. Geophys. Res.* 1962. Vol. 67. P. 3927–3933. <https://doi.org/10.1029/JZ067i010p03927>.
- Libbrecht K. G. The physics of snow crystals. *Reports on Progress in Physics*. 2005. Vol. 68, No. 4. P. 855–895. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/4/R03>.
- Magono C., Endoh T., Hariyama T., Kuboda S. A measurement of scavenging effect of falling snow crystals on the aerosol concentration. *J. Meteor. Soc., Japan*. 1974. Vol. 52. P. 407–416. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.52.5\\_407](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.52.5_407).
- Magono C., Endoh T., Itasaka M. Observation of aerosol particles attached to falling snow crystals. *J. Fac. Sci., Hokkaido Universit.*, 1975. Vol. 4. P. 103–119.
- Magono C., Endoh T., Ueno F., Kubota S., Itasaka M. Direct observations of aerosols attached to falling snow crystals. *Tellus*. 1979. Vol. 31. P. 102–114. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v31i2.10415>.
- Martin J. J., Wang P. K., Pruppacher H. R. A theoretical study of the effect of electric charges on the efficiency with which aerosol particles are collected by simple ice crystal plates. *J. Colloid interface. Sci.* 1980. Vol. 78. P. 44–56. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(80\)90494-4](https://doi.org/10.1016/0021-9797(80)90494-4).
- Miller N. L., Wang P. K. A theoretical determination of the collection rates of aerosol particles by falling ice crystal plates and columns. *Atmospheric Environment*. 1991. Vol. 25, No. 11. P. 2593–2606. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90177-9](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90177-9).
- Murakami M., Hiramatsu C., Magono C. Observation of aerosol scavenging by falling snow crystals at two sites of different heights. *J. Met. Soc. Japan*. 1981. Vol. 59. P. 763–811. [https://doi.org/10.2151/JMSJ1965.59.5\\_763](https://doi.org/10.2151/JMSJ1965.59.5_763).
- Murakami M., Kimura T., Magono C., Kikuchi K. Observation of precipitation scavenging for water-soluble particles. *J. Met. Soc. Japan*. 1983. Vol. 61. P. 346–358. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.61.3\\_346](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.61.3_346).
- Murakami M., Kikuchi K., Magono C. Experiments of aerosol scavenging by natural snow crystals. Part I. Collection efficiency of uncharged snow crystals for micron and submicron particles. *J. Met. Soc. Japan*. 1985. Vol. 63. P. 119–129. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.63.1\\_119](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.63.1_119).
- Murakami M., Kikuchi K., Magono C. Experiments of aerosol scavenging by natural snow crystals. Part II Attachment rate of 0.1  $\mu\text{m}$  diameter particles to stationary snow crystals. *J. Met. Soc. Japan*. 1985. Vol. 63. P. 130–135. [https://doi.org/10.2151/JMSJ1965.63.1\\_130](https://doi.org/10.2151/JMSJ1965.63.1_130).
- Nakaya U. *Snow Crystals: Natural and Artificial*. Cambridge: Harvard University Press, 1954.
- Nelson J., Baker M. Charging of ice-vapor interfaces: applications to thunderstorms. *Atmos. Chem. Phys.* 2003. Vol. 3. P. 1237–1252. <https://doi.org/10.5194/acp-3-1237-2003>.
- Pitter R. L., Finnegan W. G. Mechanism of single ice crystal growth in mixed clouds. *Atmospheric Research*. 2010. Vol. 97, No. 4. P. 438–445. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.05.012>.

- Radke L. F., Hobbs P. V., Eltgroth M. W., 1980. Scavenging of Aerosol Particles by Precipitation. *J. Appl. Meteor.* Vol. 19. Pp. 715–722. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1980\)019%3C0715:SOAPBP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1980)019%3C0715:SOAPBP%3E2.0.CO;2).
- Reiter R. Felder, 1964. *Stroeme und Aerosole*, Verlag D. Steinkopff, Darmstadt, 603 p.
- Reiter R., Carnuth W., 1965. Washout balance between 700 and 3000 m above sea level. *Preprints, Int. Conf. on Cloud Phys.* Tokyo and Sapporo, Pp. 390–394.
- Reiter R., Carnuth W., 1969. Washout Untersuchungen an Fallout Partikel in der unteren Troposphaere. *Arch. f. Meteor., Geophys., Biokl. Ser. A*. Vol. 18. Pp. 111–146. <https://doi.org/10.1007/BF02247867>.
- Sauter D. P., Wang P. K., 1989. An Experimental Study of the Scavenging of Aerosol Particles by Natural Snow Crystals. *J. Atmos. Sci.* Vol. 46. Pp. 1650–1655. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046%3C1650:AESOTS%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046%3C1650:AESOTS%3E2.0.CO;2).
- Simpson W. R., Brown S. S., Saiz-Lopez A., Thornton J A., Glasow R. A., 2015. Tropospheric Halogen Chemistry: Sources, Cycling, and Impacts. *Chem. Rev.* Vol. 115 (10). Pp. 4035–4062.
- Takahashi T., 1973. Electrification of growing ice crystal. *J. Atmos. Sci.* Vol. 30. Pp. 1220–1224. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1973\)030%3C1220:EOGIC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1973)030%3C1220:EOGIC%3E2.0.CO;2).
- Takenaka N., Ueda A., Daimon T., Bandow H., Dohmaru T., Maeda Y., 1996. Acceleration mechanism of chemical reaction by freezing: the reaction of nitrous acid with dissolved oxygen. *J. Phys. Chem.* Vol. 100, No. 32. Pp. 13874–13884. <https://doi.org/10.1021/jp9525806>.
- Tkachenko. E. Y., 2017. Possible role of electric forces in bromine activation during polar boundary layer ozone depletion and aerosol formation events. *Atmos. Res.* Vol. 196. Pp. 1–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.05.012>.
- Tkachenko E. Y., Kozachkov S. G., 2012. Possible contribution of triboelectricity to snow – air interactions. *Env. Chemistry.* Vol. 9, No. 2. Pp. 109–115. <http://dx.doi.org/10.1071/EN10074>.
- Tkachenko K. Y., Jacobi H. W., 2024. Electrical charging of snow and ice in polar regions and the potential impact on atmospheric chemistry. *Env. Science: Atmosphere.* Vol. 4. Pp. 144–163. <https://doi.org/10.1039/D3EA00084B>.
- Wang P. K., Lin H., 1995. Comparison of model results of collection efficiency of aerosol particles by individual water droplets and ice crystals in a subsaturated atmosphere. *Atmospheric Research.* Vol. 38. Pp. 381–390. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(95\)00007-E](https://doi.org/10.1016/0169-8095(95)00007-E).
- Wang P. K., 2002. Comparison of collection efficiency of aerosol particles by individual water droplets, ice plates and ice columns In: *Ice Microdynamics*. Academic Press, Science, Pp. 78–188. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(95\)00007-E](https://doi.org/10.1016/0169-8095(95)00007-E).
- Wang P. K., Pruppacher H. R., 1980. On the efficiency with which aerosol particles of radius less than 1  $\mu\text{m}$  are collected by columnar ice crystals. *Pure and Applied Geophysics.* Vol. 118, No. 2. Pp. 1090–1108. <https://doi.org/10.1007/BF01593052>.
- Radke L. F., Hobbs P. V., Eltgroth M. W. Scavenging of Aerosol Particles by Precipitation. *J. Appl. Meteor.* 1980. Vol. 19. P. 715–722. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1980\)019%3C0715:SOAPBP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1980)019%3C0715:SOAPBP%3E2.0.CO;2).
- Reiter R. Felder, *Stroeme und Aerosole*, Verlag D. Steinkopff, Darmstadt, 1964. 603 p.
- Reiter R., Carnuth W. Washout balance between 700 and 3000 m above sea level. *Preprints, Int. Conf. on Cloud Phys.* Tokyo and Sapporo, 1965. P. 390–394.
- Reiter R., Carnuth W. Washout Untersuchungen an Fallout Partikel in der unteren Troposphaere. *Arch. f. Meteor., Geophys., Biokl. Ser. A*. 1969. Vol. 18. P. 111–146. <https://doi.org/10.1007/BF02247867>.
- Sauter D. P., Wang P. K. An Experimental Study of the Scavenging of Aerosol Particles by Natural Snow Crystals. *J. Atmos. Sci.* 1989. Vol. 46. P. 1650–1655. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046%3C1650:AESOTS%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046%3C1650:AESOTS%3E2.0.CO;2).
- Simpson W. R., Brown S. S., Saiz-Lopez A., Thornton J A., Glasow R. A. Tropospheric Halogen Chemistry: Sources, Cycling, and Impacts. *Chem. Rev.* 2015. Vol. 115 (10). P. 4035–4062.
- Takahashi T. Electrification of growing ice crystal. *J. Atmos. Sci.* 1973. Vol. 30. P. 1220–1224. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1973\)030%3C1220:EOGIC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1973)030%3C1220:EOGIC%3E2.0.CO;2).
- Takenaka N., Ueda A., Daimon T., Bandow H., Dohmaru T., Maeda Y. Acceleration mechanism of chemical reaction by freezing: the reaction of nitrous acid with dissolved oxygen. *J. Phys. Chem.* 1996. Vol. 100, No. 32. P. 13874–13884. <https://doi.org/10.1021/jp9525806>.
- Tkachenko E. Y., Kozachkov S. G. Possible contribution of triboelectricity to snow – air interactions. *Environmental Chemistry.* 2012. Vol. 9, No. 2. P. 109–115. <http://dx.doi.org/10.1071/EN10074>.
- Tkachenko. E. Y. Possible role of electric forces in bromine activation during polar boundary layer ozone depletion and aerosol formation events. *Atmos. Res.* 2017. Vol. 196. P. 1–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.05.012>.
- Tkachenko K. Y., Jacobi H. W. Electrical charging of snow and ice in polar regions and the potential impact on atmospheric chemistry. *Env. Science: Atmosphere.* 2024. Vol. 4. P. 144–163. <https://doi.org/10.1039/D3EA00084B>.
- Wang P. K., Lin H. Comparison of model results of collection efficiency of aerosol particles by individual water droplets and ice crystals in a subsaturated atmosphere. *Atmospheric Research.* 1995. Vol. 38. P. 381–390. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(95\)00007-E](https://doi.org/10.1016/0169-8095(95)00007-E).
- Wang P. K. Comparison of collection efficiency of aerosol particles by individual water droplets, ice plates and ice columns In: *Ice Microdynamics*. Academic Press, Science, 2002. P. 178–188. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(95\)00007-E](https://doi.org/10.1016/0169-8095(95)00007-E).
- Wang P. K., Pruppacher H. R. On the efficiency with which aerosol particles of radius less than 1  $\mu\text{m}$  are collected by columnar ice crystals. *Pure and Applied Geophysics.* 1980. Vol. 118, No. 2. P. 1090–1108. <https://doi.org/10.1007/BF01593052>.



Workman E. J., Reynolds S. E., 1950. Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute aqueous solutions and their possible relationship to thunderstorm electricity, *Phys. Rev.*, Vol. 78, Pp. 254–259. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.78.254>.

Young K. C., 1993. *Microphysical Processes in Clouds*. Oxford Univ. Press, New York,

Zhang R., Pitter R. L., 1991. A numerical simulation of aerosol scavenging rate by simple ice crystals. *J. Geophys. Res.: Atmospher.* Vol. 96, iss. D12. Pp. 22491–22500. <https://doi.org/10.1029/91JD02351>.

Workman E. J., Reynolds S. E. Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute aqueous solutions and their possible relationship to thunderstorm electricity, *Phys. Rev.*, 1950. Vol. 78, P. 254–259. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.78.254>.

Young K. C. *Microphysical Processes in Clouds*. Oxford Univ. Press, New York, 1993.

Zhang R., Pitter R. L. A numerical simulation of aerosol scavenging rate by simple ice crystals. *J. Geophys. Res.: Atmospher.* 1991. Vol. 96, iss. D12. P. 22491–22500. <https://doi.org/10.1029/91JD02351>.

Manuscript received January 22, 2024;  
revision accepted April 30, 2024.

Інститут геологічних наук НАН України,  
Київ, Україна