

DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.343868>

УДК [53.097:547.024](211)

E-mail:

tkachenko.katya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0334-2519>

ДЖЕРЕЛА НАДХОДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ІОНІВ, ЇХ КОНЦЕНТРАЦІЇ ТА ШЛЯХИ МІГРАЦІЇ Й ТРАНСФОРМАЦІЇ У СНІГОВОМУ ПОКРИВІ АНТАРКТИКИ І ВПЛИВ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ НА ЦІ ПРОЦЕСИ

SOURCES, LEVELS AND FATE OF MAJOR IONS IN ANTARCTIC SNOW AND SUPPOSED CHANGES DUE TO GLOBAL WARMING

К. Ю. Ткаченко

Kateryna Yu. Tkachenko

¹Інститут геологічних наук НАН України, вул. Гончара, 55-б, Київ, 01054

¹Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Gonchara str., 55b, Kyiv, 01054, Ukraine

Вимірювання іонних концентрацій в сніговому покриві попри простоту й традиційність методу дає цінну інформацію, яка може бути цікавою для розуміння й моніторингу процесів змін клімату, коли танення льодовиків сприяє міграції біоти та розширенню місць поселення різних організмів, що супроводжується зростанням біогенного внеску та змінами іонного складу снігу. У наведеному огляді наставлено за мету показати ці взаємозв'язки за наявним даними щодо джерел, вимірних рівнів та хімічної поведінки основних іонів у снігу Антарктики з огляду на відкриття останніх років щодо шляхів трансформації через вільнорадикальні перетворення хлоридів, бромідів, нітратів, які інтенсифікуються в умовах глобального потепління. У статті також показано як концентрації окремих іонів можуть бути індикаторами певних природних процесів, і опосередковано відобразити їх інтенсивність, як то вулканічних вивержень (сульфати), зменшення крижаного покриву в умовах глобального потепління (зростання сольового навантаження), збільшення численності й поширення гніздових птахів (зростання вмісту фосфатів, калію, кальцію, амонію). На підставі узагальнених даних зроблено висновки щодо очікуваних змін іонного складу снігу внаслідок подальшого розвитку процесів глобального потепління.

Ключові слова: іони, концентрації, сніг, Антарктика, глобальне потепління, зміни клімату.

Keywords: ions, concentrations, snow, Antarctic, global warming, climate change.

Measurements of ionic concentrations in the snowpack, despite the simplicity and traditional nature of this method, provide valuable information that can be important for understanding and monitoring climate change processes. Glacier melting promotes the migration of biota and the expansion of habitats for various organisms, which is accompanied by an increasing biogenic contribution and changes in the ionic composition of snow. The present review aims to demonstrate these interrelationships by presenting available data on the sources, abundance levels, and chemical behavior of major ions in Antarctic snow, taking into account recent findings on their transformation pathways through free-radical reactions of chlorides, bromides, and nitrates, which are intensified under conditions of global warming. The article also shows that the concentrations of certain ions be indicative of specific natural processes and indirectly reflect their intensity, such as volcan eruptions (sulfates), reduction of ice cover under global warming (increased salt loading), and the growth and spatial expansion of nesting bird populations (increased levels of phosphates, potassium, calcium, and ammonium). Conclusions are drawn regarding the expected changes in the ionic composition of snow as a result of ongoing global warming.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2025. 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, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Цитування: Ткаченко К. Ю. Джерела надходження основних іонів, їх концентрації та шляхи міграції й трансформації у сніговому покриві Антарктики і вплив глобального потепління на ці процеси. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2025. Том 18. Вип. 1. С. 90–112. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.343868>.

Citation: Tkachenko K. Yu, 2025. Sources, levels and fate of major ions in Antarctic snow and supposed changes due to global warming. Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 18. Iss. 1. P. 90–112. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.343868>.

ВСТУП

У статті зібрано та обговорено наявні дані щодо джерел, рівнів наявності та поведінки основних іонів у снігу Антарктики. Огляд Bertler et al. (2005) за результатами Міжнародної трансантарктичної наукової експедиції узагальнив, підсумував усі наявні на той момент відомості щодо концентрацій основних іонів в снігу Антарктики і візуалізував основні закономірності змін і діапазони концентрацій іонів залежно від локації точки пробовідбору — близькості і дальності морського узбережжя. Літературі дані за наступні роки щодо концентрацій іонів були нечисленними і несистематизованими. Втім за останні два десятиліття істотно змінилися уявлення про хімічні реакції всередині снігового покриву, зокрема було відкрито можливість перебігу вільнорадикальних реакцій. Наприклад, у 1980–1990-ті роки загальноприйнятною вважалася теза, що «втрати хлориду», тобто зменшення їх відносної концентрації порівняно з натрієм, є результатом обмінних реакцій з кислотами (Legrand and Delmas, 1988). Насьогодні доведеним є перебіг вільнорадикальних реакцій в атмосфері та на поверхні снігу, зокрема зафіксовані продукти окиснення — хлорна та хлоратна кислоти (Tham et al., 2023) в атмосфері та хлорати на поверхнях аерозолів (Gonçalves et al., 2023). Зацікавленість наукової спільноти цим новим напрямом відволікла увагу науковців від простих традиційних методів, за допомогою яких, тим не менш, можна отримати вагому наукову інформацію. Наприклад, швидкі зміни клімату, що відбуваються останні роки, призводять до підвищення температури, скорочення масштабів зледеніння у зимовий період, а отже, до збільшення сольового навантаження на сніговий покрив. Унаслідок змін клімату мігрує біота, переміщуються місця поселень пінгвінів та інших птахів, змінюються розміри цих поселень. Збільшене біогенне навантаження також впливає на іонний склад снігу. Отже, концентрації певних іонів можуть стати індикаторами певних процесів, що побічно засвідчують їх інтенсивність.

Для розуміння динаміки змін, що відбуваються в іонному складі снігу, необхідно ясно уявляти, які чинники зумовлюють рівень концентрації того чи іншого іона. Поданий огляд є спробою надати такий всебічний опис, що містить наявні аналітичні літературні дані, останні відкриття про участь деяких з цих іонів у атмосферних радикальних реакціях і висновки про те, які іони можуть бути індикаторами тих чи інших процесів, що

відбуваються внаслідок глобальних змін клімату. Моніторинг цих іонів у часі та просторі здається автору перспективним напрямом досліджень.

1. ОСНОВНІ ДЖЕРЕЛА НАДХОДЖЕННЯ ІОНІВ У СНІГОВИЙ ПОКРИВ АНТАРКТИКИ

1.1. МОРСЬКІ АЕРОЗОЛИ

В морській зоні вони є основним джерелом надходження іонів у сніговий покрив. Морські аерозолі утворюються під час розприскування океанічних хвиль, отже, співвідношення компонентів в цих аерозолях повторює склад морської води (Millero et al., 2008). Найбільші концентрації мають натрій, хлорид, сульфат, магній. Ці іони домінують в снігу, що знаходиться на узбережжі, а з віддаленням від берега їх концентрації закономірно спадають. Це джерело іонів має вирішальний вплив на острові Галіндез, де працює Українська антарктична станція «Академік Вернадський». З посиленням глобального потепління, яке призводить до того, що океан навкруги острова перестає вкриватися взимку кригою, сольове навантаження на сніговий покрив острова зростає.

1.2. ПЕРЕНЕСЕННЯ АТМОСФЕРОЮ НА ДАЛЕКІ ВІДСТАНІ

Аерозолі з материків, леткі органічні сполуки та продукти вулканічних вивержень можуть переноситись на сотні і навіть тисячі кілометрів, що позначається терміном «атмосферне перенесення на далекі відстані» (long range atmospheric transport). Аерозолі з материків — це переважно дрібнодисперсна фракція мінерального походження. Аерозолі осаджуються на сніговий покрив, аналіз їх складу дає змогу отримати цінну інформацію про походження та силу вітрів, які їх перенесли.

Аерозолі, що осаджуються на морський лід, стають основним джерелом біодоступного заліза й стимулюють зростання фітопланктону (Falkowski et al., 1998). Механізми трансформації/окиснення мінеральної фракції досі погано зрозумілі й є предметом активних досліджень (Kim et al., 2012; Jeong et al., 2012).

1.3. ВУЛКАНІЗМ

Вулкани є постійним джерелом оксиду сірки (Bogillo et al., 2005) та галогеновмісних сполук (Aiuppa et al., 2005; Bazylevska and Bogillo, 2021), які завдяки атмосферному транспорту мігрують

на далекі відстані, беруть участь у атмосферних вільнорадикальних процесах та осідають на сніговий покрив й, у такий спосіб, можуть впливати на кислотність снігу та концентрації сульфату, хлориду, броміду, фторидів тощо.

1.4. ГЕОЛОГІЧНІ ФАКТОРИ

Імовірним чинником, що міг би впливати на склад снігу, є наявність гірських порід, які височіють над сніговим покривом і залягають під ним. З потеплінням клімату й таненням льодовиків площа звільненої від льодового покриву суші зростає, як і вплив хімічного вилуговування (Ryu et al., 2022). Здається, що умови нівального клімату є несприятливими для процесів хімічного вивітрювання за низьких температур та переважного знаходження води у замерзлому стані. Втім, наявність криги, навпаки, може стимулювати інтенсивне розчинення порід, що містять маггеміт, гоетит тощо (Kim et al., 2012; Jeong et al., 2012). Результати вивчення концентрацій ${}^7\text{Li}$ як маркера процесів вилуговування (Ryu et al., 2022) також засвідчують їх поживавлення з глобальним потеплінням. Однак слід зауважити, що це джерело може істотно впливати лише на рівні наявності слідових елементів, а для основних іонів, якщо вплив існує, то є відносно незначним порівняно із впливом інших джерел.

1.5. БІОГЕННІ ДЖЕРЕЛА

Водорості в океані та фітопланктон емітують у повітря метилбромід, бромформ (70% глобального бюджету, за (Carpenter & Liss, 2000)) та інші бромовмісні сполуки. Інтенсивність цих процесів посилюється з глобальним потеплінням (Abrahamsson et al., 2018). Леткі сполуки галогенів вступають у вільнорадикальні реакції в атмосфері та на границі сніг/атмосфера. Активна хімічна поведінка галогенів сприяє їх перерозподілу, що мало помітно для хлориду й більш суттєво впливає на тренди броміду та йодиду, концентрація яких у морській солі значно менша за концентрацію хлориду (наприклад, для броміду в 3,5 тисяч разів (за Millero et al., 2008)).

Життєдіяльність фітопланктону продукує диметилсульфід (CH_3)₂S, який трансформується у метансульфонову кислоту (MSA) разом з сірчаною кислотою й діоксидом сірки, які є джерелом сульфату не з морської солі (Wu et al., 2022).

Птахи, що проживають на океанічному узбережжі, також впливають на хімічний склад снігового покриву. Елементи накопичуються в хар-

чових ланцюгах, а згодом екскременти (гуано) та виділення залоз потрапляють у сніг у місцях гніздівель. Показано (Rankin and Wolff, 2000), що гніздівля збільшують концентрації таких іонів, як кальцій, калій, фосфат, сульфат, а також основних морських іонів, таких як натрій та хлорид, причому ця залежність має сезонний характер, починаючись у жовтні і сягаючи пікових значень у січні.

2. ОСНОВНІ ІОНИ

2.1. НАТРІЙ

Джерела надходження натрію у сніговий покрив. Основним джерелом потрапляння натрію у сніг є морська сіль. Зі збільшенням відстані від морського узбережжя концентрації натрію спадають. У внутрішніх регіонах Антарктики цей іон привноситься з морськими аерозолями вітром, тому пікові концентрації у кернах відповідають зимовим вітрам. У прибережних регіонах сезонна залежність протилежна — пікові концентрації припадають на кінець літа — початок осені, коли море максимально вільне від льоду (Wagenbach et al., 1988).

При інтерпретації кернів за рівнем концентрації натрію можна опосередковано оцінити інтенсивність морського джерела цього іона, тобто як близько до материка простягався крижаний покрив (Ferreira et al., 2024).

На відміну від багатьох аніонів, натрій, потрапивши в сніговий/крижаний покрив, не може емітувати в атмосферу, як, наприклад, хлорид (див. нижче). Тому цей іон зазвичай використовують як референтний для обчислення частки іонів морського походження за рівнянням

$$[sslon] = ([lon]/Na^+)_{sea} \times [Na^+]_{snow}, \quad (2)$$

де $([lon]/Na^+)_{sea}$ — відношення концентрації цього іона до концентрації натрію, характерне для морської солі (Millero et al., 2008).

Після цього можна оцінити, яка частка концентрації іона, виміряна у снігу, є результатом внеску інших джерел крім морської солі $[nsslon]$ за рівнянням (3):

$$[nsslon] = [lon]_{snow} - [sslon] \quad (3)$$

Оцінка того, наскільки виміряні співвідношення $([lon]/Na^+)_{snow}$ збігаються чи відрізняються від відповідного співвідношення для морської солі, як правило, визначаються графічно.

Зі зменшенням крижаного покриву в останні роки через потепління клімату сезонні флуктуації стають менш вираженими.

Закономірності змін концентрації натрію у сніговому покриві. Як зазначено в огляді Bertler et al. (2005), найбільші концентрації натрію фіксуються біля узбережжя і в зоні впливу вітрів, як, наприклад, на узбережжі Землі Королеви Мод та Землі Вікторії, на мисі Антарктичного півострова. У Східній Антарктиці на Землі Кайзера Вільгельма II катабатичні вітри перешкоджають потраплянню натрію у сніговий покрив.

З просуванням вглиб материка від океану концентрації закономірно спадають й відрізняються від прибережних на чотири порядки.

Максимальні концентрації фіксуються на молодому льоді, який при зростанні виштовхує сіль на поверхню. Наприклад, концентрація іона натрію в снігу біля фінської станції Авоа, за даними Karkas et al. (2005), на Землі Короліві Мод (72°32'0" S, 16°18'0" E) становила 8240 мкекв л⁻¹ та 2346 мкекв л⁻¹ на кризі. З віддаленням від берега концентрації іона натрію знижувалися — в 15 м від берега відповідна концентрація

дорівнювала 71 ± 8 мкекв л⁻¹, в 110 м від берега — 6 ± 2,7 мкекв л⁻¹.

Аналогічні закономірності зафіксовано Gjessing et al. (1984) також на Землі Королеви Мод (15°20' W) на шельфі Riisen-Larseisen біля узбережжя, де концентрація натрію дорівнювала 284 мкекв л⁻¹, за віддалення 60 км — 26,5 мкекв л⁻¹, а на відстані 120 км — 6,5 мкекв л⁻¹. На острові Джеймса Росса (64°12'54" S, 57°40'30" W) на висоті 1640 м над рівнем моря (р.м.) на вершині Dome Dalinger концентрація натрію становила 7,9 ± 11,9 мкекв л⁻¹.

У західній частині Антарктичного півострова на острові Horseshoe (67°49'00" S, 67°18'00" W, раніше англійська база «Y») (Kakareka et al., 2022), фонові концентрації натрію в снігу у місці локації тимчасової наукової станції Туреччини у 2022 р. дорівнювала 254 ± 75 мкекв л⁻¹, перевищуючи на порядок описані в літературі та обговорювані вище значення для інших прибережних станцій. Такі високі концентрації порівняно з іншими локаціями зумовлені тим, що цей регіон втрачає льодовий покрив пришвидшеними темпами (рис. 1). У цьому ж регіоні знаходиться

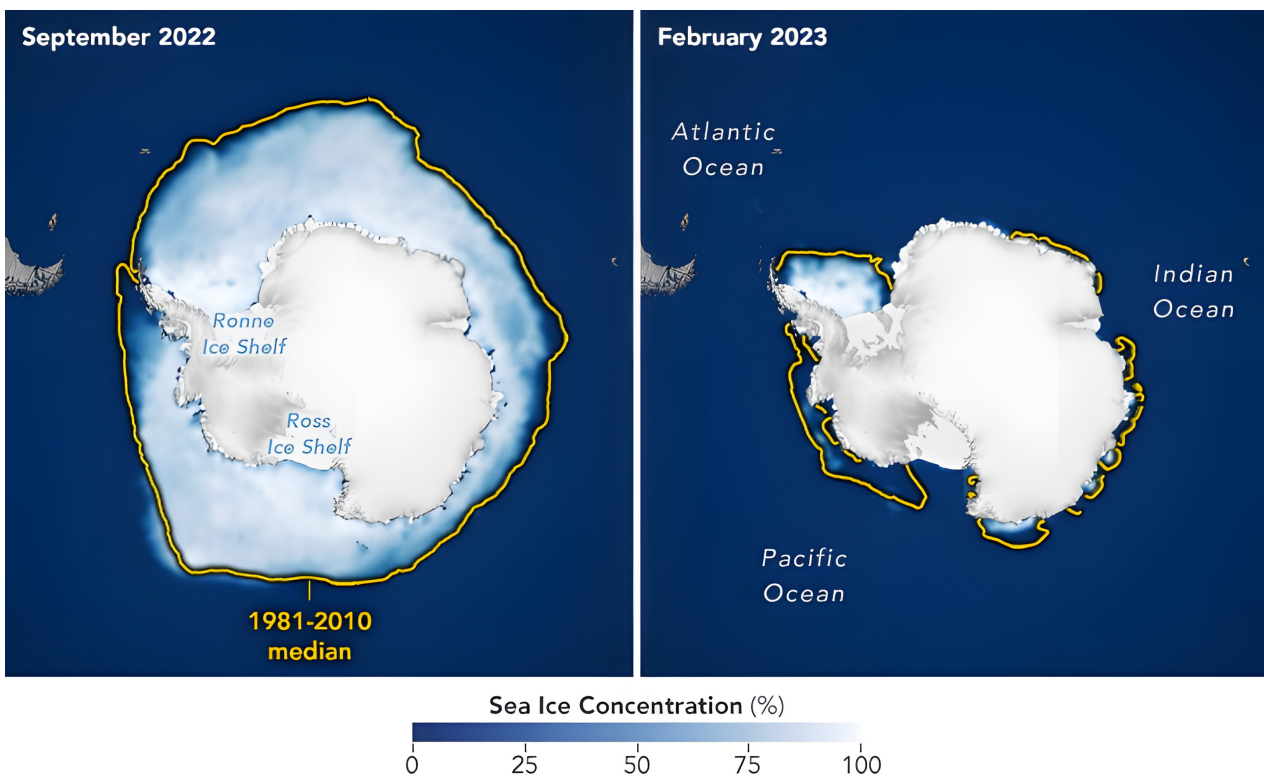


Рис. 1. Західна частина Антарктичного півострова втрачає льодовий покрив швидше за інші регіони Антарктики (<https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/sea-ice-antarctic>).

Fig. 1. The western part of the Antarctic Peninsula is losing its ice cover faster than other regions of Antarctica (from <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/sea-ice-antarctic>).

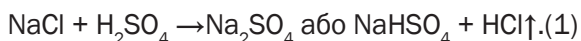
українська станція «Академік Вернадський», але автори не знайшли даних щодо іонного складу снігу в цьому регіоні.

2.2. ХЛОРИД

Джерела надходження у сніговий покрив. Хлорид – один із «основних» іонів, головним джерелом якого є морська сіль. Рівні концентрації в снігу визначаються, як правило, близькістю відкритої морської поверхні та висотою рельєфу.

У деяких випадках сезонні варіації концентрацій цього іона чітко простежуються (Aristarain et al., 2002), проте інші автори вказують на відсутність таких закономірностей (Wagenbach, 1998), оскільки сплески концентрації цього іона безпосередньо пов'язані з вітровою активністю та рівнем заledenіння, тобто наявністю відкритих незамерзлих ділянок моря та відстанню до них (Sovoie et al., 1993). У зв'язку з глобальним потеплінням кількість незамерзаючих ділянок океану зростає, тому відсутність сезонних коливань концентрації цього іона ставатиме новою нормою.

Зміна відношення Cl/Na та можливі шляхи трансформації хлорид іона. Феномен зміни співвідношення концентрацій хлориду та натрію (Cl/Na) було помічене ще в 1980-ті роки минулого століття (Legrand and Delmas, 1988), але було інтерпретовано як результат перебігу обмінних взаємодій в процесі атмосферного перенесення хлорид іона з кислотами (реакція 1):

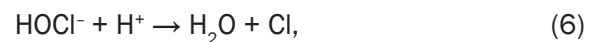
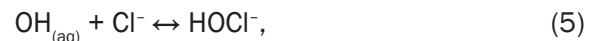
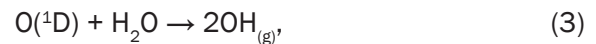
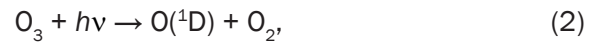


Крім сірчаної кислоти, що є в атмосфері, в реакцію з хлоридом можуть вступати й інші кислоти – HNO_3 , MSA (метан сульфенова кислота), кислоти оксиди, такі як SO_2 , органічні кислоти (Chameides and Stelson, 1992). Доступність MSA та SO_2 визначається інтенсивністю біогенних процесів та наявністю/відсутністю крижаного покриву (див. розділ 1.4), тобто інтенсивність цих реакцій зростає з глобальним потеплінням.

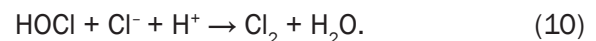
Коли останні десятиліття виник інтерес до атмосферних вільнорадикальних процесів, почали розглядати також можливість прямої участі хлорид іона у фотохімічних реакціях з озоном, гідроксильними та іншими радикалами як в атмосфері, так і на поверхні снігових часточок.

Реакції фотохімічної емісії хлору моделювали в лабораторних умовах (Oum et al., 1998). При реакції морської солі з озоном під впливом УФ-опромінення (254 нм) утворювався газоподіб-

ний хлор (Cl_2) – результат реакцій фотолізу, які можна описати такими рівняннями (Knipping et al., 2000):

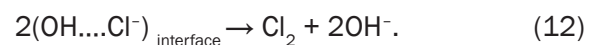
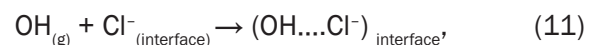


Паралельно гіпохлорит, що утворився, може взаємодіяти з хлорид іоном:



Згідно з експериментом Oum et al. (1998), вихідна концентрація озону не відігравала ролі, оскільки озон виступав у ролі ініціатора вільнорадикальних перетворень.

Безпосередня взаємодія гідроксильного радикала з хлоридом на межі розділу фаз також можлива, що приводить до утворення Cl_2 , який гідролізує у водній фазі:



Чи можуть ці реакції ініціюватися нефотохімічно, досі залишається нез'ясованим. Таким чинником, що може відповідати за ініціювання вільно-радикальних реакцій, може бути електрика (Tkachenko and Kozachkov, 2012, Tkachenko and Jacobi, 2024).

Вільнорадикальний механізм реакцій хлору в атмосфері був підтверджений різними польовими дослідженнями, піонером яких було мас-спектрометричне визначення Foster et al. (2001) сполук ClBr , Br_2 та Cl_2 на станції Alert, Nunavut у Канаді.

В результаті перебігу реакцій (1–12), що призводять до емісії хлору, відношення концен-

трацій іонів Cl/Na змінюється. Беручи участь у вільнорадикальних (наприклад, фотохімічних) реакціях, хлорид іон може окислюватися і переноситися, тобто, зникаючи в одному місці (де Cl/Na зменшується), він осаджується в іншому (де Cl/Na збільшується). Gonçalves et al. (2023) зібрили дані про відношення Cl/Na, отримані під час аналізу крижаних кернів і аерозолів біля станцій, що розташовані не на береговій лінії, а всередині Антарктичного материка, таких як Dome C, Восток, Byrd, South Pole, WAIS (Legrand and Delmas, 1988; Röthlisberger R. et al., 2003; Palais & Legrand, 1985; Winski et al., 2021), і представили у вигляді схеми (рис. 2), порівнюючи дані голоценового

періоду (за даними кернів) (на схемі – стовпчики червоного кольору) і сучасності (на схемі – стовпчики голубого кольору). Зі схеми очевидно, що на даний час унаслідок глобального потепління кількість надлишкового хлориду у внутрішніх регіонах Антарктиди збільшується (Gonçalves et al., 2023), що засвідчує більш інтенсивні процеси емісії у прибережних частинах материка.

Можна припустити, що зменшення відношення Cl/Na на узбережжі і збільшення в районах Антарктичного плато є результатом глобального фракціонування – вода, що випаровується у прибережних районах/сублімований сніг, захоплюю-

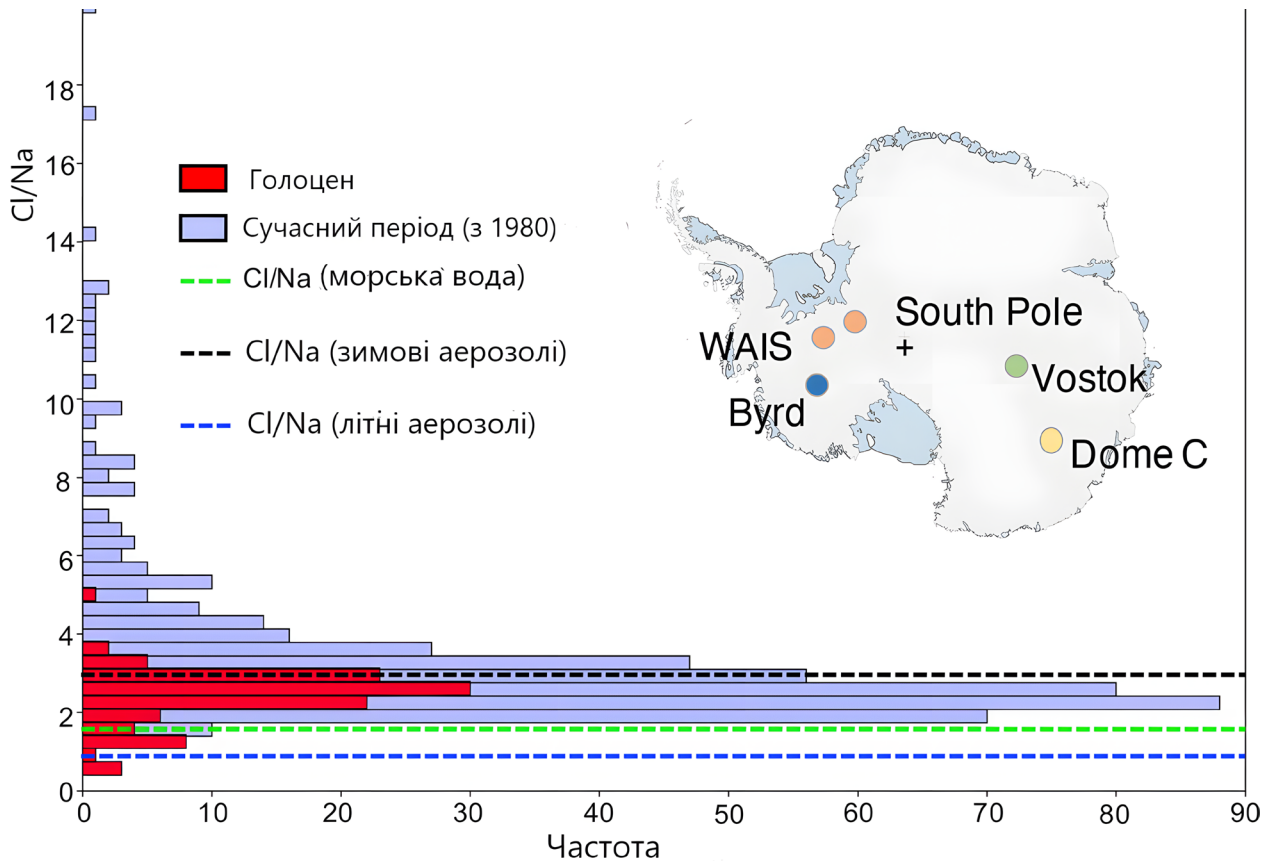


Рис. 2. Порівняння відношення Cl/Na для сучасного періоду та голоцену за результатами аналізу кернів та аерозолів, отриманих на станціях всередині Антарктичного материка. Пунктирні лінії вказують середнє значення Cl/Na (1,8) для морської води (зелена лінія), середнє літнє (1,4) (синя лінія) та зимове (3,3) (чорна лінія) значення Cl/Na у дрібнодисперсних аерозолях (з Gonçalves et al., 2023 (рис. 7 без змін), Copyright 2023, відтворено згідно з умовами ліцензії CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)).

Fig. 2. Comparison of the Cl/Na ratio for the modern period and the Holocene based on analyses of ice cores and aerosols collected at stations located within the Antarctic continent. Dashed lines indicate the mean Cl/Na ratio (1.8) for seawater (green line), the mean summer value (1.4) (blue line), and the mean winter value (3.3) (black line) for fine aerosol particles (reproduced from Gonçalves et al., 2023 (fig. 7 without changes), Copyright 2023, according to CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)).

чи хлорорганічні сполуки в атмосфері, осаджується у вигляді снігопадів на більш холодному плато.

Однак якщо окиснення іона хлориду відбувається максимально з утворенням іонів хлорату (який має максимальну валентність іона хлору +7), частинки цієї солі можуть залишатися у складі досліджуваної проби, проте не виявлятися методом іонної хроматографії, який використовується як стандарт. Вони залишаються «невидимими», і їх не враховують. Наявність хлоритів і хлоратів у складі морських аерозолів підтверджено багатьма останніми дослідженнями (Tham et al., 2023). Gonçaves et al. (2023) провели EXAFS-дослідження частинок морських аерозолів і наоч-

но продемонстрували наявність хлоритів та хлоратів на поверхні частинок (на рис. 3 позначено як Cl_xO_y). Частки аерозолів можуть утворюватися із снігу при випаровуванні під час сильного вітру, а можуть, навпаки, захоплюватися сніговими часточками. Таким чином, у складі снігу можуть бути окислені форми хлору, які не виявляються традиційними методами.

Закономірності змін концентрації у сніговому покриві. Головним джерелом хлориду є морська вода, тому концентрації в снігу визначаються близькістю до узбережжя. Це може бути проілюстровано закономірностями зміни іонного складу на індійській станції Maitri ($70^\circ 48'41'' \text{ S}$,

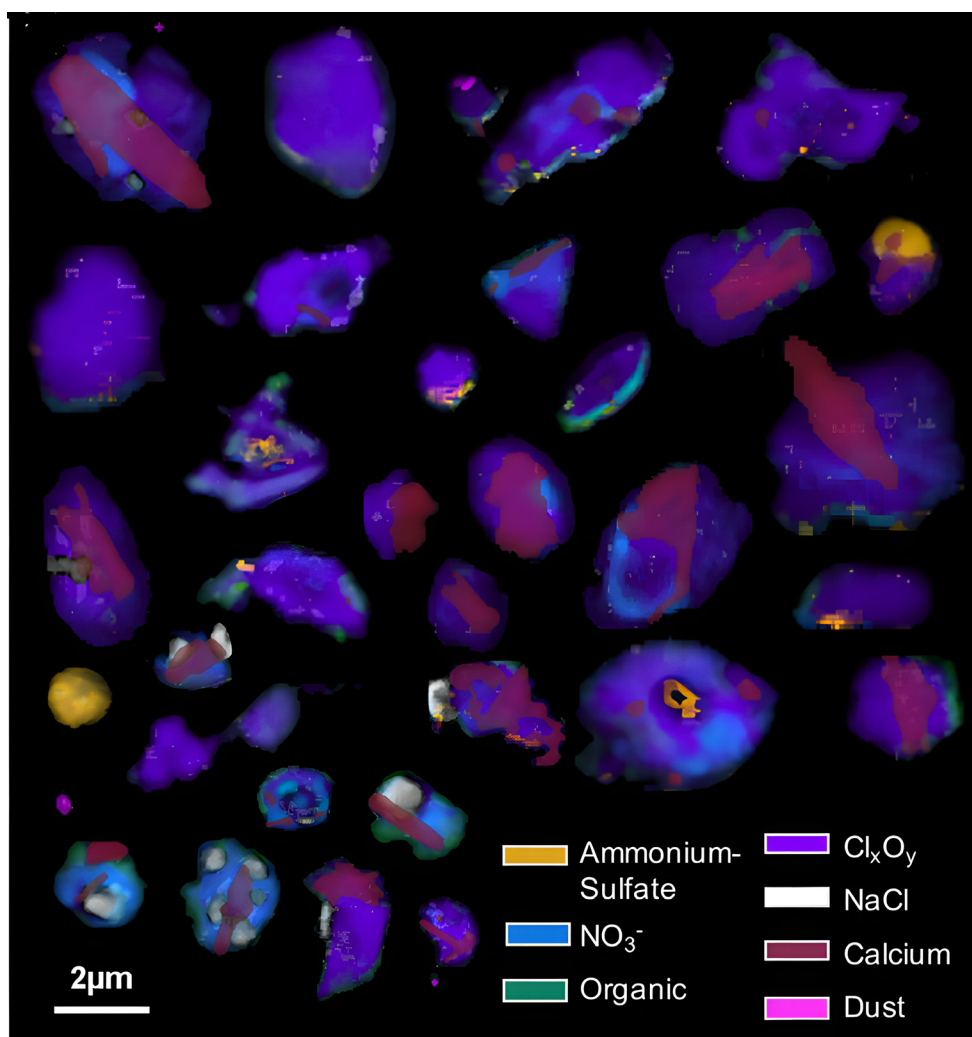


Рис. 3. EXAFS-дослідження частинок морських аерозолів, що містять великі кількості хлоритів і хлоратів (позначені як Cl_xO_y) — фіолетовий колір (з Gonçaves et al., 2023 (рис. 2b без змін), Copyright 2023, відтворено згідно з умовами ліцензії CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)).

Fig. 3. EXAFS study of marine aerosol particles with large amounts of chlorites and chlorates (labeled as Cl_xO_y) (purple) (reproduced from Gonçaves et al., 2023 (fig. 2b without changes), Copyright 2023, according to CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)).

11° 39'41" E). За даними Nijampurkar et al. (1988) концентрація хлориду в свіжому снігу становила 14,4 мкекв л⁻¹, в шельфовому льоді — близько 20 мкекв л⁻¹, в затоці на шельфовому льоді — 225,4 мкекв л⁻¹. У внутрішніх озерах накопичення солей призводить до засолення цих озер. Так, згідно з даними Ghosh et al. (1997) щодо іонного складу води озер в тому самому районі (70° 45'53" S, 11° 44'3" E), вміст хлориду в озерах варіював від 281,7 до 816,9 мкекв л⁻¹.

Свіжий сніг, якщо він принесений вітром з боку моря, може бути солонішим, ніж поверхневий. Так, вимірювання (Bundhavant et al., 2014) у районі Larsemann Hills (69° 24'23" S, 76° 12'40" E) показали 32–66 мкекв л⁻¹ для свіжого снігу та 16,3–35,1 мкекв л⁻¹ для поверхневого.

Під час утворення молодого морського льоду сіль виштовхується на поверхню, утворюючи калюжі розсолу, тому вміст хлорид іона в снігу, що лежить на такій тонкій морській кризі, може бути дуже високим. Наприклад, відповідні значення концентрацій хлориду у снігу на поверхні морської криги біля фінської станції Aboa, Dronning Maud Land становили 10 379 мкекв л⁻¹, 4 550 мкекв л⁻¹ (Karkas et al., 2005). З віддаленням від берега концентрації знижувалися — в 15 м від берега (72° 32'0" S 16° 18'0" E) концентрація дорівнювала 78 ± 6 мкекв л⁻¹, в 110 м від берега (72° 36'6" S, 16° 18'6" E) — 6,9 ± 2,8 мкекв л⁻¹.

Інші знайдені у літературі значення мали той самий порядок — у районі прибережних станцій концентрація хлориду у середньому становила кілька десятків мкекв л⁻¹, але інколи сягала й кількох сотень. Наприклад, за даними Aristarain et al. (2002), на острові Джеймса Росса біля Антарктичного півострова на висоті 1640 м над р.м. концентрації цього іона в середньому становили 9,9±17,5 мкекв л⁻¹, а на рівні моря — понад 38 мкекв л⁻¹. Для станції Maitri (70° 48'41" S, 11° 39'41" E) концентрація хлориду за даними Ali et al. (2010) змінювалась від 21,2 до 284,4 мкекв л⁻¹, за даними статті (Bundhavant, 2014) — 16,9 мкекв л⁻¹.

Для Землі Королеви Вікторії середня концентрація в льодових ядрах, видобутих у 70 км від узбережжя на висоті 1560 м, за даними Gragnani et al. (1998) дорівнювала 22,76 ± 29,63 мкекв л⁻¹, у ядрі з льодовика в 60 км від узбережжя й на висоті 1630 м — 9,55 ± 34,9 мкекв л⁻¹ (Nyamgerel et al., 2020), а у поверхневому снігу там само — 28,67 ± 75,27 мкекв л⁻¹ (Nyamgerel et al., 2021).

Можна припустити, що відсутність льодового покриву взимку на морі у зв'язку з процесами потепління збільшуватиме сольове навантаження на прибережні території.

2.3. СУЛЬФАТ

Джерела надходження у сніговий покрив. Сульфат може потрапляти в сніг з морської солі (ця компонента концентрації має назву ssSO₄²⁻ — sea salt sulfate) або з інших джерел (nssSO₄²⁻ — non sea salt sulfate). Такими додатковими джерелами сульфату є, по-перше, реакції атмосферної трансформації диметилсульфіду (DMS), який виробляється фітопланктоном (див. розділ 1.4) (Fattori et al., 2005), по-друге, вулканізм, по-третє, важливим є вплив антропогенного чинника. Крім того, в деяких джерелах (наприклад, Delmas and Boutron, 1980) згадується можливість надходження сульфату зі стратосфери.

Вулканізм — постійно діюче джерело оксиду сірки. Згідно з Aiurra et al. (2005) глобальний вулканічний викид SO₂ дорівнює в середньому 14,6×10¹² г×рік⁻¹. Постійно діючий Антарктичний вулкан Еребус, що розміщується на острові Росса, викидає в середньому 25×10⁶ тонн SO₂ за рік (Andres and Kasgnoc, 1998). У моменти вивержень вулканів концентрація nssSO₄²⁻ суттєво збільшується, що використовується при датуванні льодових ядер — піки концентрацій сульфату відповідають великим виверженням (рис. 4, за (Isaksson et al., 2001)).

Концентрація сульфату, джерелом якого не є морська сіль, визначається за формулою

$$[nssSO_4^{2-}] = [SO_4^{2-}] - \left\{ \frac{[SO_4^{2-}]}{[Na^+]} \right\}_{sea} \times [Na^+]. \quad (4)$$

Основний внесок у nssSO₄²⁻ роблять біогенні морські джерела, тому значення [nssSO₄²⁻] закономірно зменшується з віддаленням від берегової лінії (див. нижче). Проте, хоча загальна концентрація сульфату зменшується, відносна частка компоненти, джерелом якої не є морська сіль, збільшується. Наприклад, при вивченні (Isaksson et al., 2001) ядра, датованого 1865–1991 рр, який було отримано у Східній Антарктиці на Землі Королеви Мод (75° S, 2° E) на плато (2900 м над р.м.) більш ніж за 300 км від узбережжя, частка сульфата, джерелом якого є морська сіль, складала лише 6% (58,1 нг×г⁻¹ nssSO₄²⁻–61,6 нг×г⁻¹ total SO₄²⁻)

Сезонні варіації. Біогенний компонент nssSO₄²⁻ має виражену сезонну залежність.

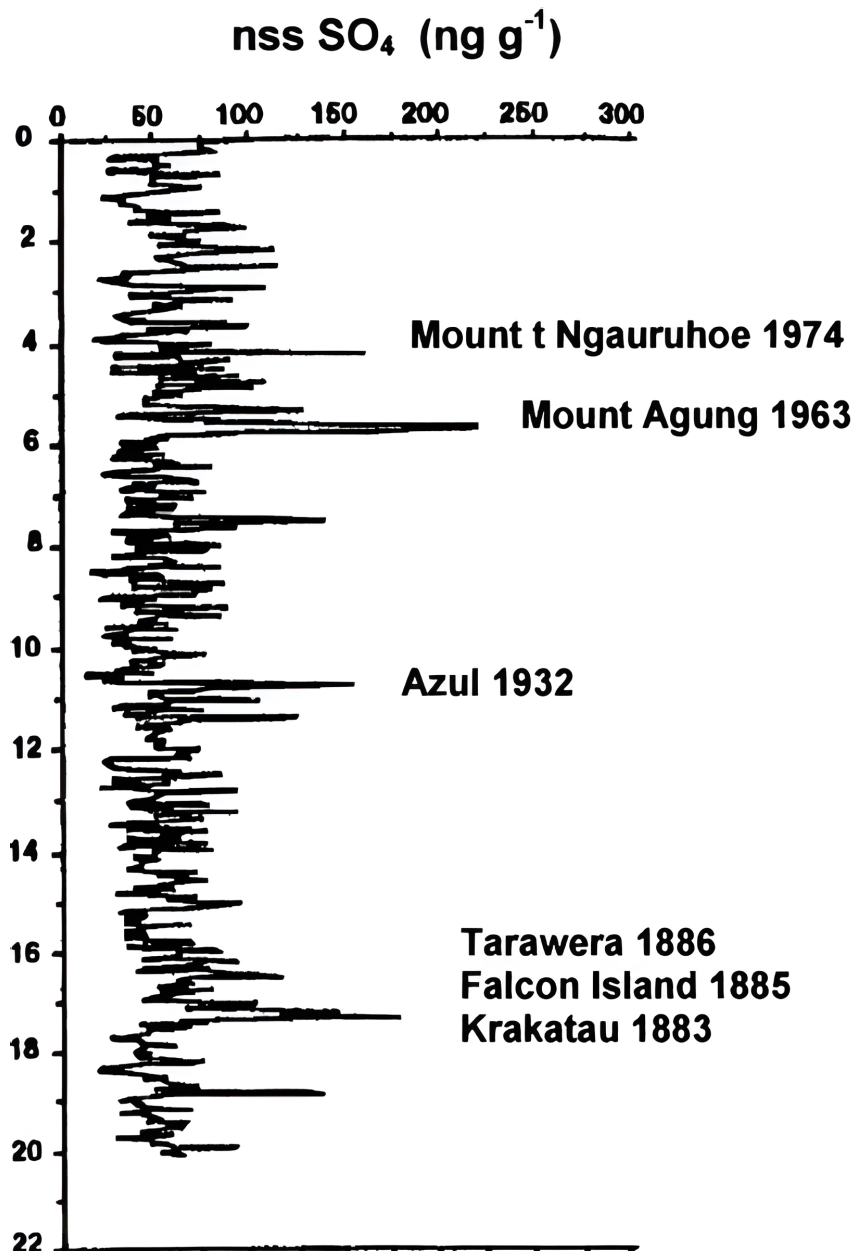


Рис. 4. Збільшення концентрації сульфату у роки великих вулканічних вивержень (керна, Земля Королеви Мод з публікації) (відтворено з (Isaksson et al., 1996) за дозволом Cambridge University Press, Copyright 2001)

Fig. 4. Increase in sulfate concentrations during years of big volcanic eruptions in the ice core from Dronning Maud Land (from (Isaksson et al., 1996) with permission from Cambridge University Press, Copyright 2001)

Літній максимум сульфату пояснюється як інтенсивним цвітінням фітопланктону, так і збільшенням вертикального перемішування тропосфери (Cunningham and Zoller, 1981), фотохімічними процесами (Bogillo et al., 2005), відповідальними за окиснення сірки до сульфату, можливістю інтрузії стратосферних мас (Delmas and Boutron, 1980).

У прибережній Антарктиці взимку величина $[nssSO_4^{2-}]$, розрахована за формулою (2), може набувати негативних значень. Це є показником того, що сумарна концентрація сульфату (з морської солі та з інших джерел), що входить до складу снігу та льоду, зменшується. Наприклад, відомо, що знижені концентрації сульфату знаходять при аналізі крижаних квітів (Rankin et al., 2002), що

виростають на поверхні молодого морського льоду за високих градієнтів температур над поверхнею. Ці крижані квіти є джерелом зимових аерозолів, які також виявляються збідненими на сульфат. Одне з пояснень цього явища — випадіння кристалів мірабіліту $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ за зниження температури нижче -8°C .

Закономірності змін концентрації сульфату у сніговому покриві. Так само, як показано вище для натрію та хлориду, концентрація сульфату змінюється залежно від близькості до океану, як джерела морської солі та біогенних сульфатів, а також від кількості опадів й особливостей їх формування. Наприклад, на береговій італійській базі “Mario Zucchelli”, Campo Faraglione ($74^\circ 41' \text{S}$, $164^\circ 06' \text{E}$), Земля Вікторії, затока Terra Nova, концентрація сульфату у снігу, що полежав, дорівнювала 52 мкекв л^{-1} (Barbaro et al., 2017) й зменшувалась у 5 разів після випадіння свіжого снігу (Barbaro et al., 2017). На поверхні льоду концентрації сульфату в снігу максимальні, як біля фінської станції Абоа на Землі Королеви Мод (Karkas et al., 2005): $70^\circ 07'4'' \text{S}$, $05^\circ 23'1'' \text{E}$ — 659 мкекв л^{-1} , $70^\circ 07'0'' \text{S}$, $05^\circ 20'7'' \text{E}$ — 235 мкекв л^{-1} . З віддаленням від берега концентрації сульфату зменшуються — $78 \pm 6 \text{ мкекв л}^{-1}$ в 15 м від берега ($72^\circ 32'0'' \text{S}$, $16^\circ 18'0'' \text{E}$), в 110 м від берега ($72^\circ 36'6'' \text{S}$, $16^\circ 18'6'' \text{E}$) — $3,2 \pm 0,5 \text{ мкекв л}^{-1}$.

Для станції Maitri ($70^\circ 48'41'' \text{S}$, $11^\circ 39'41'' \text{E}$) за вимірюваннями Aristarain and Delmas (2002) концентрація сульфату дорівнювала $2,5 \pm 2,2 \text{ мкекв л}^{-1}$, за даними Ali et al. (2010) — $31,2 \text{ мкекв л}^{-1}$, за даними Bundhavant (2014) — $2,1 \text{ мкекв л}^{-1}$. На острові Джеймса Росса ($64^\circ 12'54'' \text{S}$, $57^\circ 40'30'' \text{W}$) на висоті 1640 м над р.м. — вершина Dome Dalinger, концентрація загального сульфату складала $2,5 \pm 2,2 \text{ мкекв л}^{-1}$, більшість якого складав сульфат не з морської солі: $1,6 \pm 1,75 \text{ мкекв л}^{-1}$ (Aristarain and Delmas, 2002).

2.4. МЕТАНСУЛЬФОНОВА КИСЛОТА

Походження та надходження у сніговий покрив. Метансульфонова кислота (MSA) утворюється разом із сірчаною кислотою та діоксидом сірки в результаті серії вільнорадикальних реакцій з диметилсульфіду $(\text{CH}_3)_2\text{S}$, який, в свою чергу, є продуктом життєдіяльності фітопланктону (Wu et al., 2022). Діоксид сірки внаслідок подальшого вільнорадикального окиснення також перетворюється на сульфат. Сульфат і MSA беруть активну участь у формуванні аерозолів: сульфат як нуклеюючий агент, а MSA — як конденсуючий агент

(Yan et al., 2020). Вторинні сульфатні аерозолі, що утворилися, збільшують поглинання сонячної радіації і слугують ядрами конденсації в хмарах, у такий спосіб впливаючи на клімат Землі в цілому (Ayers et al., 1987; Hoffmann et al., 2021).

Диметилсульфід є не єдиним джерелом msSO_4^{2-} (розділ 3.2), але єдиним джерелом MSA, тому концентрацію MSA часто використовують як індикатор інтенсивності біогенного циклу сірковмісних сполук (Ivey and others, 1986, Saigne and Legrand, 1987). Якщо концентрації MSA в кернах на Антарктичному плато не демонструють сезонних закономірностей (Ivey et al, 1986; Legrand et al, 1992), то на узбережжі така залежність простежується, що є закономірним (Mulvaney et al., 1992). Інтенсивність утворення диметилсульфіду як прекурсора MSA залежить від процесів, що йдуть в океані, наприклад Legrand and Feniet-Saigne (1991) було відзначено, а іншими дослідниками підтверджено (наприклад: (Isakksson et al., 2001)), що піки концентрацій MSA в льодових кернах збігаються з фазами потепління Ель-Ніньо.

Закономірності змін концентрації у сніговому покриві. Виміряні значення концентрацій MSA на французькій прибережній станції Dumont d'Urville ($66^\circ 39'46'' \text{S}$, $140^\circ 00'07'' \text{E}$) (Maupetit and Delmas, 1992) змінювались в діапазоні від 0 до $0,55 \text{ мкекв л}^{-1}$, середня концентрація MSA становила $0,08 \text{ мкекв л}^{-1}$. Вимірювання на фінській станції Абоа на Землі Королеви Мод (Karkas et al., 2005) також давали значення від $0,1$ до $1,7 \text{ мкекв л}^{-1}$, крім одного аномально високого значення ($4,5 \pm 0,2$) мкекв л^{-1} на відстані лише 15 м від океану ($72^\circ 32'0'' \text{S}$, $16^\circ 18'0'' \text{E}$). Для Землі Вікторії середня концентрація MSA в льодових кернах, видобутих у 40 км від узбережжя на висоті 650 м над р.м. на хребті McCarthy, за даними (Stenni et al., 2000), дорівнювала $0,33 \pm 0,3 \text{ мкекв л}^{-1}$, на льодовику Campbell в 70 км від узбережжя на висоті 1560 м над р.м. за даними (Graggani et al., 1998) — $0,21 \pm 0,15 \text{ мкекв л}^{-1}$, у керні з льодовика Stux в 60 км від узбережжя й висоті 1630 м над р.м. — $0,1 \pm 0,09 \text{ мкекв л}^{-1}$ (Nyamgerel et al., 2020), а у поверхневому снігу там само — $0,18 \pm 0,20 \text{ мкекв л}^{-1}$ (Nyamgerel et al., 2021).

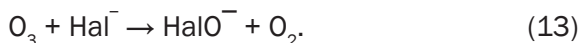
2.5. БРОМІД

Джерела надходження у сніговий покрив. Бромід наявний у морській воді, тобто потрапляє у сніг з морськими аерозолями. Ще одне джерело потрапляння бромиду — вулкани. Бромід вибірково

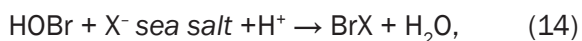
накопичується багатьма водоростями, які дали емітують бром в атмосферу у вигляді бромформу та інших сполук. В атмосфері бромід і броморганічні сполуки вступають у вільнорадикальні реакції, аналогічні описаним у попередньому розділі для хлориду.

Трансформація в атмосферних реакціях.

Бромід — це галоген, який за властивостями багато в чому подібний до хлорид іона. Проте першою відмінністю є порівняно незначна його концентрація в морській солі — у 267,6 раза нижча за концентрацію хлориду (Millero, 2008). Однак у вільнорадикальних реакціях в атмосфері бромід відіграє більш впливову роль, ніж хлорид, тому що константа швидкості реакції окиснення галогенід іона за реакцією (13) у разі участі атомів бромю становить $3 \cdot 10^2$ моль⁻¹ с⁻¹ (Finlayson-Pitts et al., 2002), що на 5 порядків вище, ніж відповідне значення для атомів хлору ($2 \cdot 10^{-3}$ моль⁻¹ с⁻¹). Таким чином, окиснення бромю відбувається значно швидше, і, як результат, сполуки бромю діють набагато ефективніше у руйнації атмосферного озону.



Саме з бромом пов'язують різкі падіння концентрації озону («ozone depletion events» — ODE) від рівня фону (30–35 ppt) до межі виявлення (0,2 ppt), що виникають полярною весною в морській зоні й супроводжуються різким збільшенням вмісту в атмосфері сполук бромю. Показано, що перші бромовмісні радикали, які й запускають увесь процес руйнації озону, з'являються в результаті гетерогенної реакції на поверхні криги або зимових аерозолів. Подальший процес за участю газозафазного HOBr згідно з (Fan and Jacob, 1992) вивільняє нові порції бромю у формі Br₂ і BrCl з морської солі, окиснюючи бромід, наявний в конденсованій фазі (реакція 14):

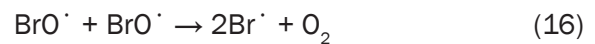
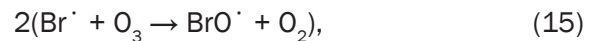


де X⁻ = Br⁻, Cl⁻.

Унаслідок кожного циклу реакції в газовій фазі з'являється вже не один, а два атоми бромю. Цим можна пояснити різке збільшення концентрації сполук бромю в атмосфері до 10^{14} молекул см⁻². Процес отримав назву «вибух бромю» (bromine explosion) (Vogt, 1996) й викликав цілу хвилю наукових публікацій (підсумовано в огляді Simpson et al. (2015)), проте досі механізм ініціювання цього процесу є не зовсім зрозумілими.

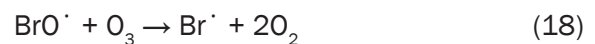
Отже, в періоди ODE саме бром-радикали значною мірою контролюють окиснювальний потенціал атмосфери, впливаючи не лише на руйнування озону, а й на інші процеси, як то осадження ртуті (mercury deposition events), окиснення диметилсульфіду (див. розділ 3.3), що в результаті впливає на хмароутворення.

Руйнацію озону в газовій фазі можна описати такими реакціями:

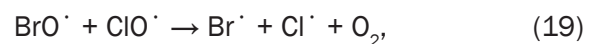


За рівня BrO[·] 10^{14} молекул см⁻² швидкість руйнації озону становитиме 1–2 ppt/годину, що при фоновому рівні озону 30–40 ppt призводить до його зникнення протягом двох днів.

Додатково озон може руйнуватися за схемою



З аналогічним хлоровмісним радикалом ClO[·] можливе утворення інтергалогенідів (Foster et al., 2001) (реакції 19–21):



Відомо, що активація бромю має нефотохімічну природу і дедалі більше нових даних підтверджують, що ці процеси йдуть у темряві (Abrahamsson, 2018; Simpson et al., 2018), крига у цих реакціях є не пасивним носієм, а активним учасником реакцій, погано зрозумілих так званих «мікрофізичних процесів» (Bartels-Rausch et al., 2014).

Інтенсивність і частота ODE, що відбувається одночасно з вибухоподібним збільшенням газоподібного бромю, зростає з глобальним потеплінням (Bougoudis et al., 2020; Seo et al., 2020).

Так само, як і у випадку хлориду, бром, що емітував у процесі подій ODE, переноситься атмосферою і знову осідає на сніговий покрив. Інші чинники перерозподілу фонових концентрацій бромю — його накопичення певними видами водоростей та дія вулканічних джерел. Роль емісії та факторів перерозподілу доволі значні, а почат-

кові фонові концентрації броміду в морській воді, навпаки, невеликі порівняно з концентраціями хлориду (Millero et al., 2008), тому і відношення Br/Na флюктує, а закономірності розподілу бром у сніговому покриві менш виражені, ніж для відношення Cl/Na.

Закономірності змін концентрації у сніговому покриві. Відомостей про концентрацію броміду у сніговому покриві в літературі обмаль. У роботах 20-річної давнини цей іон, зазвичай, не вимірювали. Після хвилі наукового інтересу до подій «вибуху бром» в атмосфері, число робіт про бром також вибухово зросло. Проте для вивчення цього феномену застосовуються супутникові дані щодо концентрації BrO[•] в атмосфері (у одиницях «молекул см⁻²»), а літературні дані щодо рівнів наявності цього іона в снігу є незначними. Основні джерела броміду пов'язані з океаном, тому концентрації на узбережних локаціях вищі, а всередині материка та на висоті — нижчі. Наприклад, на станції Palmer, що розташована на узбережжі Антарктичного півострова (64° 46' S, 64° 05' W), виміряна концентрація броміду в снігу становила 0,31 мкекв л⁻¹, причому туман і дощ акумулювали бромід навіть ефективніше (0,39 мкекв л⁻¹ та 0,625 мкекв л⁻¹ відповідно) (DeFelice, 1999). А на півночі Землі Вікторії (72° 48' S, 159° 06' E) на висоті 1781–2318 м над р.м. концентрація броміду у снігу була на 2–3 порядки меншою й коливалась від 0,0025 до 0,025 мкекв л⁻¹ (середня концентрація — 0,00825 мкекв л⁻¹) (Maffezzoli et al., 2017). Локація Law Dome (66° 46' S, 112° 48' E), проміжна за висотою (1370 м над р.м.), демонструвала й проміжні концентрації броміду, середня концентрація складала 0,04 мкекв л⁻¹ (Vallelonga et al., 2017).

2.6. АМОНІЙ

Джерела надходження у сніговий покрив мають біогенну природу. Ґрунти, пожежі, внесок яких є істотним у середніх широтах, відсутні в Антарктиці як чинники впливу. Основним джерелом іона амонію в полярних умовах є морська біота.

Закономірності змін концентрації у сніговому покриві. Високі локальні концентрації амонію виявляються у місцях колоній птахів разом із підвищеними концентраціями калію, сульфату, кальцію (Rankin and Wolff, 2000). Джерелом забруднення є гуано та виділення назальних залоз. Глобальне потепління може призводити до часткового танення забрудненого снігового покриву, на якому розташовувалися гніздування

та колонії пінгвінів, та до емісії високих концентрацій амонію в океан.

Забруднення розміщується плямами, тому наявність амонію в снігу, що переноситься вітром, є спорадичною і визначається траєкторією вітрових мас.

На шельфі Brunt Ice в 15 км від британської станції Halley на місці колонії імператорських пінгвінів (*Aptenodytes forsteri*) було виявлено максимальні концентрації амонію (до 500 000 ppb). Такі забруднення мають сезонну залежність, з'являються в жовтні і стають максимальними у січні. З віддаленням від гніздівля концентрації амонію швидко спадають і вже на відстані 1 км стають зівставними з фоновими (5–15 ppb) (Rankin and Wolff, 2000). Аналогічні результати були отримані на станції Dumont d'Urville для колонії пінгвінів Аделі (*Pygoscelis adeliae*) (Legrand et al., 1998).

2.7. МАГНІЙ

Джерелом надходження магнію у сніговий покрив є тільки морська сіль. Для іона магнію характерні ті самі закономірності змін концентрацій, що і для інших іонів, джерелом яких є морська сіль. У внутрішніх регіонах Антарктики концентрації іонів морського походження у снігу збільшуються взимку внаслідок вітрового перенесення, а у прибережній зоні максимумами фіксують улітку, коли зледеніння мінімальне. Скорочення площі льодового покриву внаслідок змін клімату зменшує ці сезонні відмінності й призводить до більшого засолення берегової зони. Наявність колоній пінгвінів практично не впливає на концентрацію магнію (Rankin and Wolff, 2000).

Закономірності змін концентрації у сніговому покриві. На поверхні льоду, де сніг найбільш забруднений морською сіллю, та на береговій лінії концентрації магнію максимальні. Наприклад, біля затоки Terra Nova на береговій італійській базі "Mario Zucchelli", Campo Faraglione (74° 41' S, 164° 06' E), Земля Вікторії концентрація магнію дорівнювала 905 мкекв л⁻¹ (Barbaro et al., 2017) й зменшувалась до 123,55 мкекв л⁻¹ після випадіння свіжого снігу (Barbaro et al., 2017). На поверхні льоду біля фінської станції Авоа на Землі Королеви Мод (Karkas et al., 2005) концентрація магнію сягала 2115 мкекв л⁻¹ у точці (70° 07' 4" S, 05° 23' 1" E) й 737 мкекв л⁻¹ у точці (70° 07' 0" S, 05° 20' 7" E). З віддаленням від берега концентрації магнію у сніговому покриві ставали нижчими — 16 ± 1 мкекв л⁻¹ у 15 м від берега (72° 32' 0" S, 16° 18' 0" E) і 1.1 ± 0,5 мкекв л⁻¹ — у 110 м від

берега (72°36'6" S, 16°18'6" E) (Karkas et al., 2005).

На станції Maitri (70°48'41" S, 11°39'41" E), за вимірюваннями Ali et al. (2010), концентрація магнію у сніговому покриві дорівнювала 15,0 мкекв л⁻¹, за даними Bundhavant (2014) — 3,7 мкекв л⁻¹.

Зі збільшенням відстані від узбережжя та за висотою концентрації спадають. Так, на льодовому шельфі Riisen-Larseisen за даними Gjessing (1984) в 1 км від узбережжя концентрація магнію у снігу була 37,4 мкекв л⁻¹, в 60 км вона зменшилась до 3,86 мкекв л⁻¹, а в 120 км уже дорівнювала 0,82 мкекв л⁻¹.

Середня концентрація Mg²⁺ у льодових кернах, видобутих на льодовику Campbell Землі Королеви Вікторії в 70 км від узбережжя на висоті 1560 м за даними Gragnani et al. (1998), становила 1,85 ± 2,5 мкекв л⁻¹, у керні з льодовика Styx у 60 км від узбережжя й на висоті 1630 м над р.м. — 0,86 ± 3,2 мкекв л⁻¹ (Nyamgerel et al., 2020), а у поверхневому снігу там само — 2,53 ± 6,8 мкекв л⁻¹ (Nyamgerel et al., 2021).

Фонова концентрація на острові Horseshoe (67°49'00" S, 67°18'00" W, раніш англійська база «У»), у місці локації тимчасової наукової станції Туреччини у 2022 р. (Kakareka et al., 2022) — 25,1 ± 6,6 мкекв л⁻¹ є зіставною з концентраціями берегових станцій Maitri (Ali et al., 2010) та Aboa (Karkas et al., 2005).

2.8. КАЛІЙ

Джерела надходження калію у сніговий покрив — морська сіль та біота. На поширення іона калію, джерелом походження якого є морська сіль, впливають ті самі закономірності, що вище описано для хлориду, натрію і магнію, а саме зимові вітри та зледеніння океану. На поширення калію, джерелом якого є біота, впливає близькість до центрів гніздівель морських птахів, а інтенсивність цього джерела є сезонною. Локальні надвисокі концентрації цього іона (до 60 000 мкг л⁻¹ біля колонії імператорських пінгвінів (*Aptenodytes forsteri*), за (Rankin and Wolff, 2000)), мають вогнищевий характер поширення, тобто наявність/відсутність калію в снігу, що переноситься вітром, залежить від того, чи проходила траєкторія вітрових мас через такі забруднені місця.

Після прийняття Мадридського протоколу в 1991 р. кількість колоній пінгвінів зростає щорічно, що збільшує вплив цього біогенного джерела, особливо в прибережній Антарктичній

зоні, зокрема на острові Галіндез (де розташована Українська антарктична станція), який має дві багатотисячні колонії субантарктичних пінгвінів (*Gentoo Penguin*).

Закономірності змін концентрації калію у сніговому покриві. Ці концентрації біля узбережжя є найбільшими, але їх значення залежить від сезону та наявності гніздівель.

Біля фінської станції Абоа на Землі Королеви Мод концентрація калію у сніговому покриві в 15 м від берега (72°32'0" S, 16°18'0" E) за Karkas et al. (2005) дорівнювала 2,8 ± 1,8 мкекв л⁻¹, а вже у 110 м від берега (72°36'6" S, 16°18'6" E) — 0,5 ± 0,4 мкекв л⁻¹ (Karkas et al., 2005).

Зіставними є значення, що вимірювали Ali et al. (2010) на станції Maitri (70°48'41" S, 11°39'41" E), — 2,7 мкекв л⁻¹, але за даними Bundhavant (2014) у тому самому місці концентрація калію на порядок менша — 0,5 мкекв л⁻¹. На станції Dumont d'Urville концентрації калію, виміряні (Maupetit and Delmas, 1992), коливались від 0,1 аж до 9,15 мкекв л⁻¹. Біля цієї станції також, як і на острові Галіндез, гніздуються колонії пінгвінів, але іншого виду (*Pygoscelis adeliae*).

У поверхневих водах, які утворились зі снігу, що розтанув, на узбережжі Західної Антарктики в бухті Admiralty Bay на острові King George концентрація калію становила 12,46 мкекв л⁻¹ (Nędzarek et al., 2014).

Концентрація калію в льодових кернах, як і на узбережжі, залежить від локальних чинників й може відрізнятись на порядок. Так, у кернах, видобутих на льодовику Campbell Землі Королеви Вікторії в 70 км від узбережжя на висоті 1560 м за даними Gragnani et al. (1998), концентрація K⁺ дорівнювала 3,7 ± 4,9 мкекв л⁻¹, а у керні з льодовика Styx у 60 км від узбережжя і на висоті 1630 м над р.м. лише 0,19 ± 0,73 мкекв л⁻¹ (Nyamgerel et al., 2020) й була зіставною з концентрацією цього іона там само у поверхневому снігу — 0,52 ± 1,46 мкекв л⁻¹ (Nyamgerel et al., 2021).

Фонова середня концентрація на острові Horseshoe (67°49'00" S, 67°18'00" W) за нашими даними дорівнювала 13,6 ± 4,9 мкекв л⁻¹ за (Kakareka et al., 2022). Проте слід враховувати, що сезонні коливання, як ми вже зауважували, можуть змінити ці показники на порядок величини.

2.9. КАЛЬЦІЙ

Джерела надходження кальцію у сніговий покрив. Багато авторів розглядають наявність кальцію як результат привнесення вітром континентальних та інших аерозолів, за складом і поширенням яких можна робити висновки стосовно напрямків вітрових потоків (Mayevski and Lyon, 1982) та інтенсивності циклонів (Issaksson et al., 2001).

Rankin and Wolff (2000) показали, що колонії пінгвінів забруднюють місце свого перебування, оскільки гуано та виділення залоз привносять додаткові концентрації, зокрема і кальцію. Можливо, агресивна кисла обстановка, що створюється виділеннями пінгвінів у містах гніздівель, сприяє розчиненню гірських порід. Крім того, можна припустити, що залишки яєчної шкаралупи та стулки морських раковин у такій агресивній обстановці також можуть розчинятися. Втім це лише припущення й питання є цікавим для подальших досліджень. Максимальне збільшення концентрацій кальцію, калію, сульфату відбувається в період гніздування та народження потомства у грудні – січні.

Для Землі Вікторії середня концентрація в льодових ядрах, видобутих у 70 км від узбережжя на висоті 1560 м над р.м. за даними Gragnani et al. (1998), дорівнювала $2,05 \pm 1,35$ мкекв л^{-1} , у керні з льодовика в 60 км від узбережжя і на висоті 1630 м над р.м. – $0,67 \pm 1,28$ мкекв л^{-1} (Nyamgerel et al., 2020), а у поверхневому снігу там само – $0,6 \pm 1,3$ мкекв л^{-1} (Nyamgerel et al., 2021).

Біля фінської станції Aboa, Dronning Maud Land, у 15 м від берега ($72^\circ 32'0''$ S, $16^\circ 18'0''$ E) (Karkas et al., 2005) концентрація кальцію становила $3,9 \pm 0,4$ мкекв л^{-1} з них $nssCa$ $0,8 \pm 1,1$ мкекв л^{-1} , в 110 м від берега ($72^\circ 36'6''$ S, $16^\circ 18'6''$ E) $1,6 \pm 1,4$ мкекв л^{-1} , з яких $nssCa$ $1,4 \pm 1,3$ мкекв л^{-1} .

Фонова середня концентрація на острові Horseshoe ($67^\circ 49'00''$ S, $67^\circ 18'00''$ W) у лютому – березні, тобто після закінчення гніздівель, дорівнювала $16,7 \pm 8,2$ мкекв л^{-1} , за Kakareka et al. (2022). На Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» моніторинг змін концентрацій цього іона у просторі і часі не проводили.

2.10. НІТРАТ

На відміну від амонію, джерелом якого є переважно колонії пінгвінів, нітрат і суміш газоподібних оксидів NO і NO_2 (разом NO_x) прекурсорів цього іона опиняються в Антарктиці або в результаті

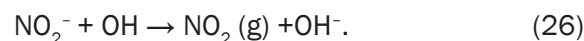
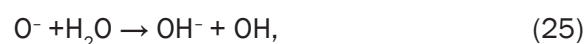
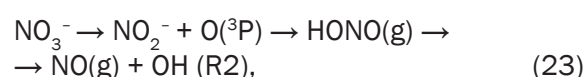
атмосферного перенесення, або синтезу під впливом атмосферної електрики в атмосфері, або в сніговому покриві внаслідок перебігу фотохімічних реакцій. В результаті зміна концентрацій NO_x та нітрату від прибережних районів Антарктики до внутрішніх не має такої чіткої закономірності, як для інших іонів, джерелом котрих є морська сіль. На Антарктичному плато рівні емісії NO_x у літній період, коли йдуть фотохімічні реакції у сніговому покриві, можна порівняти з подібними рівнями у промислових регіонах (огляд (Blaszczak-Boxe and Saiz-Lopez, 2018) з посиланнями).

Цикл фотохімічних перетворень нітрату можна описати рівняннями (22–30):

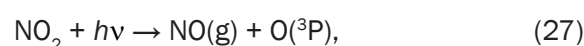
1-й шлях через утворення NO_2 –



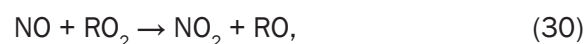
2-й шлях через утворення нітриту –



NO_x , який емітує в газову фазу, за наявності УФ-опроміювання контролює окисний потенціал атмосфери, в тому числі рівень наявності озону:



NO відновлюється до NO_2 , причому використовує озон, отже NO стає каталізатором процесу:



де M – молекули O_2 чи N_2 , які акумулюють надлишкову енергію, R – метил, ацил, H.

Таким чином, радикальні реакції можуть йти різними шляхами з виділенням або поглинанням озону залежно від вихідних реакційних компонентів, їх концентрацій та умов реакції. В результаті окиснювальних процесів оксиди азоту знову перетворюються на нітрат і повертають

ся у сніговий покрив. Цикли випаровування та осадження змінюють один одного. Інтенсивність цих процесів у конкретному полярному регіоні оцінюють за допомогою визначення коефіцієнта фракціонування ізотопними методами.

Фонова середня концентрація нітрату біля фінської станції Aboa, Dronning Maud Land у 15 м від берега ($72^{\circ}32'0''$ S, $16^{\circ}18'0''$ E) (Karkas et al., 2005) становила $0,8 \pm 0,2$ мкекв л^{-1} , в 110 м від берега ($72^{\circ}36'6''$ S, $16^{\circ}18'6''$ E) — $0,9 \pm 0,2$ мкекв л^{-1} . Для Землі Вікторії середня концентрація нітрату в льодових кернах, видобутих в 70 км від узбережжя на висоті 1560 м над р.м. за даними Gragnani et al. (1998) становила $0,97 \pm 0,42$ мкекв л^{-1} , у керні з льодовика в 60 км від узбережжя й на висоті 1630 м над р.м. — $0,68 \pm 0,3$ мкекв л^{-1} (Nyamgerel et al., 2020), а у поверхневому снігу там само — $0,79 \pm 0,39$ мкекв л^{-1} (Nyamgerel et al., 2021).

ВИСНОВКИ

Як зазначено вище, метою огляду було зібрати воєдино дані різних джерел про основні іони в снігу Антарктики, включаючи найсвіжіші дані щодо хімічних реакцій, які впливають на їх розподіл.

Така стаття є своєрідною енциклопедичною довідкою з гідрохімії снігу полярних регіонів, що різуче відрізняється від традиційної та звичної гідрохімії помірних широт, і дає змогу намітити напрями досліджень на майбутнє.

У статті показано, як концентрації деяких іонів є індикаторами вулканічних вивержень (сульфати), зменшення крижаного покриву (збільшення кількості хлоридів) у зв'язку з глобальним потеплінням і збільшення кількості та поширення гніздових птахів (калій, фосфати, кальцій, амоній). Крім того, докладно описано різні цикли вільнорадикальних реакцій в атмосфері, які також у зв'язку з глобальним потеплінням інтенсифікуються (як, наприклад, події руйнування тропосферного озону) і змінюють співвідношення між концентраціями іонів (приміром співвідношення Cl/Na).

Автори вважають, що хоча вимірювання концентрацій основних іонів — це простий старовинний традиційний метод, аналіз багаторічних рядів даних може бути корисним для аналізу динаміки процесів, пов'язаних з глобальним потеплінням. Проведення такого моніторингу на станції «Академік Вернадський» здається перспективним напрямом дослідження.

REFERENCES

- Mitrokhyn O. V., 2025. Galindez Island — physiographic and geological survey. *Geologičnij žurnal*. 3 (392). Pp. 16–30.
- Abrahamsson K., Granfors A., Ahnoff M., Cuevas C. A., Saiz-Lopez A., 2018. Organic bromine compounds produced in sea ice in Antarctic winter. *Nat. Commun.* Vol. 9. P. 5291.
- Aiuppa A., Federico C., Franco A., Giudice G., Gurrieri S., Inguaggiato S., Liuzzo M., McGonigle A.J.S., Valenza M., 2005. Emission of bromine and iodine from Mount Etna volcano. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. Vol. 6(8). Pp. Q08008.
- Ali K., Sonbawane S., Chate D. M., Siingh D., Rao P. S.P., Safai P. D., Budhavant K. B., 2011. Chemistry of snow and lake water in Antarctic region. *J. Earth System Science*. Vol. 119. Pp. 753–762.
- Andres R. J., Kasgnosc A. D., 1998. A Time-averaged Inventory of Sub-aerial Volcanic Sulfur Emissions. *J. Geophys. Res.* Vol. 103. Pp. 25251–25262.
- Aristarain A. J., Delmas R. J. Snow chemistry measurements on James Ross Island (Antarctic Peninsula) showing sea-salt aerosol modifications. *Atmospheric Environment*. 2002. Vol. 36. Pp. 765–772.
- Ayers G. P., Gras J. L., 1991. Seasonal relationship between cloud condensation nuclei and aerosol methanesulphonate in marine air. *Nature*. Vol. 353. Pp. 834–835.
- Bartels-Rausch T., Jacobi H.-W., Kahan T. F., Thomas J. L., Thomson E. S., Abbatt J. P. D., Ammann M., Blackford J. R., Митрохин О. В. Острів Галіндез — фізико-географічний та геологічний опис. *Геол. журнал*. 2025. Т. 3(392), С. 16–30.
- Abrahamsson K., Granfors A., Ahnoff M., Cuevas C. A., Saiz-Lopez A. Organic bromine compounds produced in sea ice in Antarctic winter. *Nat. Commun.* 2018. Vol. 9. P. 5291.
- Aiuppa A., Federico C., Franco A., Giudice G., Gurrieri S., Inguaggiato S., Liuzzo M., McGonigle A.J.S., Valenza M. Emission of bromine and iodine from Mount Etna volcano. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2005. Vol. 6(8). Q08008.
- Ali K., Sonbawane S., Chate D. M., Siingh D., Rao P. S.P., Safai P. D., Budhavant K. B., Chemistry of snow and lake water in Antarctic region. *J. Earth System Science*. 2011. Vol. 119. P. 753–762. <https://doi.org/10.1007/s12040-010-0063-0>.
- Andres R. J., Kasgnosc A. D. A Time-averaged Inventory of Sub-aerial Volcanic Sulfur Emissions. 1998. *J. Geophys. Res.* Vol. 103. P. 25251–25262.
- Aristarain A. J., Delmas R. J. Snow chemistry measurements on James Ross Island (Antarctic Peninsula) showing sea-salt aerosol modifications. *Atmospheric Environment*. 2002. Vol. 36. P. 765–772
- Ayers G. P., Gras J. L. Seasonal relationship between cloud condensation nuclei and aerosol methanesulphonate in marine air. *Nature*. 1991. Vol. 353. P. 834–835.
- 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.
- Bazylevska M. S. and Bogillo V. I., 2021. The impact of volcanic emission of halogenated compounds on the Southern Hemisphere and Antarctic environment. *Ukr. Ant. Journal.* Vol. 2. Pp. 12–34.
- Bertler N., Mayewski P. A., Aristarain A., Barrett P., Becagli S., Bernardo R., Bo S., Xiao C., Curran M., Qin D., Dixon D., Ferron F., Fischer H., Frey M., Frezzotti M., Fundel F., Genthon C., Gagnani R., Hamilton G., Handley M., Hong S., Isaksson E., Kang J., Ren J., Kamiyama K., Kanamori S., Kärkäs E., L. Karlöf, Kaspari S., Kreutz K., Kurbatov A., Meyerson E., Ming Y., Zhang M., Motoyama H., Mulvaney R., Oerter H., Osterberg E., Proposito M., Pyne A., Ruth U., Simões J., Smith B., Sneed S., Teinilä K., Traufetter F., Udisti R., Virkkula A., Watanabe O., Williamson B., Winther J-G., Li Y., Wolff E., Li Z., Zielinski A., 2005. Snow chemistry across Antarctica. *Annals of Glaciology.* Vol. 41. Pp.167–179.
- Blaszczak-Boxe C. S., Saiz-Lopez A., 2018. Nitrate photolysis in ice and snow: A critical review of its multiphase chemistry. *Atmospheric Environment.* Vol. 193. Pp. 224–241.
- Bogillo V., Borhers R., & Bazylevska M., 2005. Origin of Atmospheric Hydrocarbons and Sulfur-Containing Impurities in the glacier of Galindez Island, Vernadsky. *Ukr. Ant. Journal.* Vol. 3. Pp. 67–74.
- Bougoudis I., Blechschmidt A-M., Richter A., Seo S., Burrows J. Ph., Theys N., Rinke A., 2020. Long-term time series of Arctic tropospheric BrO derived from UV–VIS satellite remote sensing and its relation to first-year sea ice. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 20. Pp. 11869–11892.
- Budhavant K. B., Rao P. S. P., Safai P. D. 2014. Chemical Composition of Snow-Water and Scavenging Ratios over Coastal Antarctica. *Aerosol and Air Quality Research.* Vol. 14. Pp. 666–676.
- Carpenter E. J., Liss P. S., 2000. On temperate sources of bromoform and other reactive organic bromine gases. *J. Geophys. Res: Atmosph.* Vol. 105. Pp. 20539–20547.
- Chameides W. L., Stelson A. W., 1992. Aqueous phase chemical processes in deliquescent sea-salt aerosol: a mechanism that couples the atmospheric cycles of S and sea-salt. *J. Geophys. Res.* Vol. 97. Pp. 20565–20580.
- Charlson R. J., Lovelock J. E., Andreae M. O., Warren, S.G. 1987. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo, and climate. *Nature.* Pp. 326, 655–661.
- CODATA Value: vacuum electric permittivity, 2018 *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty, 2019.*
- Cunningham W. I., Zoller W. H. 1981. The chemical composition of remote area aerosols. *J. Aerosol Sci.* Vol. 12 (4). Pp. 367–384.
- 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.
- Bazylevska M. S. and Bogillo V. I., The impact of volcanic emission of halogenated compounds on the Southern Hemisphere and Antarctic environment. *Ukr. Ant. Journal.* 2021. Vol. 2. P. 12–34.
- Bertler N., Mayewski P. A., Aristarain A., Barrett P., Becagli S., Bernardo R., Bo S., Xiao C., Curran M., Qin D., Dixon D., Ferron F., Fischer H., Frey M., Frezzotti M., Fundel F., Genthon C., Gagnani R., Hamilton G., Handley M., Hong S., Isaksson E., Kang J., Ren J., Kamiyama K., Kanamori S., Kärkäs E., L. Karlöf, Kaspari S., Kreutz K., Kurbatov A., Meyerson E., Ming Y., Zhang M., Motoyama H., Mulvaney R., Oerter H., Osterberg E., Proposito M., Pyne A., Ruth U., Simões J., Smith B., Sneed S., Teinilä K., Traufetter F., Udisti R., Virkkula A., Watanabe O., Williamson B., Winther J-G., Li Y., Wolff E., Li Z., Zielinski A. Snow chemistry across Antarctica. *Annals of Glaciology.* 2005. Vol. 41. P. 167–179.
- Blaszczak-Boxe C.S., Saiz-Lopez A., Nitrate photolysis in ice and snow: A critical review of its multiphase chemistry. *Atmospheric Environment.* 2018. Vol. 193. P. 224–241.
- Bogillo V., Borhers R. & Bazylevska M. Origin of Atmospheric Hydrocarbons and Sulfur-Containing Impurities in the glacier of Galindez Island, Vernadsky. *Ukr. Ant. Journal.* 2005. Vol. 3. P. 67–74.
- Bougoudis I., Blechschmidt A-M., Richter A., Seo S., Burrows J. Ph., Theys N., Rinke A. Long-term time series of Arctic tropospheric BrO derived from UV–VIS satellite remote sensing and its relation to first-year sea ice. *Atmos. Chem. Phys.* 2020. Vol. 20. P. 11869–11892.
- Budhavant K. B., Rao P. S.P., Safai P. D. Chemical Composition of Snow-Water and Scavenging Ratios over Coastal Antarctica. *Aerosol and Air Quality Research.* 2014. Vol. 14. P. 666–676.
- Carpenter E. J., Liss P. S. On temperate sources of bromoform and other reactive organic bromine gases. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* 2000. Vol. 105. P. 20539–20547.
- Chameides W. L., Stelson A. W., Aqueous phase chemical processes in deliquescent sea-salt aerosol: a mechanism that couples the atmospheric cycles of S and sea-salt. *Journal of Geophysical Research.* 1992. Vol. 97. P. 20565–20580.
- Charlson R. J., Lovelock, J. E., Andreae M. O., Warren, S. G. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo, and climate. *Nature.* 1987. P. 326, 655–661.
- CODATA Value: vacuum electric permittivity, 2018 *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. 2019.*
- Cunningham W. I., Zoller W. H. The chemical composition of remote area aerosols. *J. Aerosol Sci.* 1981. Vol. 12 (4). P. 367–384.

- DeFelice T.P., 1999. Chemical composition of fresh snowfalls at Palmer Station, Antarctica. *Atmospheric Environment*. Vol. 33. Pp. 155–161.
- Delmas R., Boutron C., 1980. Are the past variations of the stratospheric sulfate burden recorded in central Antarctic snow and ice layers? *J. Geophys. Res.: Oceans*. Vol. 85 (C10). Pp. 5645–5649.
- Duft D., Achtzehn T., Müller R., Huber B. A., Leisner T., 2003. Coulomb fission: Rayleigh jets from levitated microdroplets. *Nature*. Vol. 421(6919). Pp. 128.
- Dunin A. K., 1961. *Evaporation of snow*, Siberian Academy of Science of USSR, Novosibirsk.
- Enami S., Colussi A. J., 2013. Long-range specific ion-ion interactions in hydrogenbonded liquid films. *J. Chem. Phys.* Vol. 138. Pp. 184706.
- Enami S., Mishra H., Hoffmann M. R., Colussi A. J., 2012. Hofmeister effects in micromolar electrolyte solutions. *J. Chem. Phys.* Vol. 136. Pp. 154707.
- Falkowski P. G., Barber R. T., and Smetacek V., 1998. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*. Vol. 281. Pp. 200–206.
- Fattori I., Becagli S., Bellandi S., Castellano E., Innocenti M., Mannini A., Severi M., Vitale V., Udisti R., 2005. Chemical composition and physical features of summer aerosol at Terra Nova Bay and Dome C, Antarctica. *J. Environ. Monit.* Vol. 7. Pp. 1265e1274.
- Ferreira R. S., Simões J. C., Thoen I. U. & Bernardo R. T., 2024. Glaciochemistry and environmental interpretation of a snow core from West Antarctica. *An Acad Bras Cienc*. Vol. 96 (suppl. 2). P. e20240243.
- Foster K. L., Plastridge R. A., Bottenheim J. W., Shepson P. B., Finlayson-Pitts B.J., Spicer Ch.W., 2001. The Role of Br₂ and BrCl in Surface Ozone Destruction at Polar Sunrise. *Science*. Vol. 291. Pp. 471–474.
- Frey M. M., Norris S., Brooks I. M., Nishimura K., Anderson P. A., Palm S., Jones A. E., Yang X., Wolff E., 2017. Sea Salt Aerosol from Blowing Snow above Sea Ice –observed evidence of a missing source. *The 27th Goldschmidt Conference of the European Association of Geochemistry*.
- Ghosh T. K., Muley R. D., Ghode R. and Ramteke D. S., 1997. Water and wastewater management at Indian Station Maitri in Antarctica. *13th Indian Expedition to Antarctica, Scientific Report*, Department of Ocean Development, Technical Publication no. 2. Pp. 301–311.
- Gjessing Y., 1984. Marine and Non-Marine Contribution to the Chemical Composition of Snow at the Riiser Larsenisen Ice Shelf in Antarctica. *Atmospheric Environment*. Vol. 18. № 4, Pp. 825–830.
- 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. Pp. 77–88.
- DeFelice T. P. Chemical composition of fresh snowfalls at Palmer Station, Antarctica. *Atmospheric Environment*. 1999. Vol. 33. P. 155–161.
- Delmas R., Boutron C. Are the past variations of the stratospheric sulfate burden recorded in central Antarctic snow and ice layers? *J. Geophys. Res. Oceans*. 1980. Vol. 85 (C10). P. 5645–5649.
- Duft D., Achtzehn T., Müller R., Huber B. A., Leisner T. Coulomb fission: Rayleigh jets from levitated microdroplets. *Nature*. 2003. Vol. 421(6919). P. 128.
- Dunin A. K. *Evaporation of snow*, 1961. Siberian Academy of Science of USSR, Novosibirsk.
- Enami S., Colussi A. J. Long-range specific ion-ion interactions in hydrogenbonded liquid films. *J. Chem. Phys.* 2013. Vol. 138. P. 184706.
- Enami S., Mishra H., Hoffmann M. R., Colussi A. J. Hofmeister effects in micromolar electrolyte solutions. *J. Chem. Phys.* 2012. Vol. 136. P. 154707.
- Falkowski P. G., Barber R. T., and Smetacek V. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*. 1998. Vol. 281. P. 200–206.
- Fattori I., Becagli S., Bellandi S., Castellano E., Innocenti M., Mannini A., Severi M., Vitale V., Udisti R. Chemical composition and physical features of summer aerosol at Terra Nova Bay and Dome C, Antarctica. *J. Environ. Monit.* 2005. Vol. 7. P. 1265e1274.
- Ferreira R. S., Simões J. C., Thoen I. U. & Bernardo R. T. Glaciochemistry and environmental interpretation of a snow core from West Antarctica. *An Acad Bras Cienc*. 2024. Vol. 96 (suppl. 2). P. e20240243.
- Foster K. L., Plastridge R. A., Bottenheim J. W., Shepson P. B., Finlayson-Pitts B.J., Spicer Ch. W. The Role of Br₂ and BrCl in Surface Ozone Destruction at Polar Sunrise. *Science*. 2001. Vol. 291. P. 471–474.
- Frey M. M., Norris S., Brooks I. M., Nishimura K., Anderson P. A., Palm S., Jones A. E., Yang X., Wolff E. Sea Salt Aerosol from Blowing Snow above Sea Ice –observed evidence of a missing source. 2017. *The 27th Goldschmidt Conference of the European Association of Geochemistry*
- Ghosh T. K., Muley R. D., Ghode R. and Ramteke D. S. Water and wastewater management at Indian Station Maitri in Antarctica, 1997, *13th Indian Expedition to Antarctica, Scientific Report*, Department of Ocean Development, Technical Publication no. 2. P. 301–311.
- Gjessing Y. Marine and Non-Marine Contribution to the Chemical Composition of Snow at the Riiser Larsenisen Ice Shelf in Antarctica. *Atmospheric Environment* 1984. Vol. 18. N 4, P. 825–830.
- 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. 77–88.

- Gordon M., Biswas S., Taylor P. A., Hanesiak J., Albarran-Melzer M., Fargey S., 2010. Measurements of drifting and blowing snow at Iqaluit, Nunavut, Canada during the STAR project. *Atmos.-Ocean*. Vol. 48. Pp. 81–100.
- Gagnani R., Smiraglia C., Stenni B., and Torcini S., 1998. Chemical and isotopic profiles from snow pits and shallow firn cores on Campbell Glacier, northern Victoria Land, Antarctica. *Ann. Glaciol.* Vol. 27. Pp. 679–684.
- Grannas A. M., Jones A. E., Dibb J., Ammann M., Anastasio C., Beine H. J., Bergin M., Bottenheim J., Boxe C. S., Carver G., 2007. An overview of snow photochemistry: evidence, mechanisms and impacts. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 7. P. 4329–4373.
- Grigor'ev A.I., Doroshenko D. N., 1987. Critical conditions for instability of an aqueous film on the surface of a stationary charged melting hailstone in an external electric field. *Fluid Dyn.* Vol. 22 (1). P. 7–11.
- Hendrics C. D., and Schneider J. M., 1963. Stability of conducting droplet under the influence of surface tension and electrostatic forces. *Am. J. Phys.* Vol. 31. Pp. 450–453.
- Hoffmann E. H., Heinold B., Kubin A., Tegen I. & Herrmann H., 2021. The importance of the representation of DMS oxidation in global chemistry-climate simulations. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 48, Pp. e2021GL094068.
- Honrath R. E., Peterson M. C., Guo S., Dibb J. E., Shepson P. B., and Campbell B., 1999. Evidence of NO_x production within or upon ice particles in the Greenland snowpack. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 26. Pp. 695–698.
- Iribarne J. V., Godson W. L., 2013. 4. Water-air systems 4.8 Clausius-Clapeyron Equation in: Atmospheric Thermodynamics, Springer.
- Isaksson E., Karlen W., Mayewski P. A., Twickler M., Whitlow S., 2001. A High-Altitude Snow Chemistry Record from Amundsenisen, Dronning Maud Land, Antarctica. *J. Glaciology*. Vol. 47 (158). Pp. 489–496.
- Ivey J. P., Davies D. M., Morgan V., Ayers G. P. 1986. Methansulphonate in Antarctic ice. *Tellus*. Vol. 38B. Pp. 375–379.
- Jacobi H.-W., Obleitner F., Da Costa S., Ginot P., Eleftheriadis K., Aas W., and Zanatta M., 2019. Deposition of ionic species and black carbon to the Arctic snowpack: Combining snow pit observations with modeling. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 19. Pp. 10361–10377.
- Jeong D., Kim K., and Choi W., 2012. Accelerated dissolution of iron oxides in ice. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 12. Pp. 11125–11133.
- Ji W., and Wang P. K., 1990. Numerical simulation of threedimensional unsteady viscous flow past fixed hexagonal ice crystals in the air — Preliminary results. *Atmos. Res.* Vol. 25, Pp. 539–557.
- Jones A. E., Anderson P. S., Begoin M., Brough N., Hutterli M. A., Marshall G. J., Richter A., Roscoe H. K., Wolff E. W., 2009. BrO, blizzards, and drivers of polar tropospheric ozone depletion events. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 9. Pp. 4639–4652.
- Kakareka S., Kukharchyk T., Kurman P., 2022. Trace and major elements in surface snow and fresh water bodies of
- Gordon M., Biswas S., Taylor P. A., Hanesiak J., Albarran-Melzer M., Fargey S. Measurements of drifting and blowing snow at Iqaluit, Nunavut, Canada during the STAR project. *Atmos. — Ocean*. 2010. Vol. 48. P. 81–100.
- Gagnani R., Smiraglia C., Stenni B. and Torcini S. Chemical and isotopic profiles from snow pits and shallow firn cores on Campbell Glacier, northern Victoria Land, Antarctica. *Ann. Glaciol.* 1998. Vol. 27. P. 679–684.
- Grannas A. M., Jones A. E., Dibb J., Ammann M., Anastasio C., Beine H. J., Bergin M., Bottenheim J., Boxe C. S., Carver G. An overview of snow photochemistry: evidence, mechanisms and impacts. *Atmos. Chem. Phys.* 2007. Vol. 7. P. 4329–4373.
- Grigor'ev A.I., Doroshenko D. N. Critical conditions for instability of an aqueous film on the surface of a stationary charged melting hailstone in an external electric field. *Fluid Dyn.* 1987. Vol. 22 (1). P. 7–11.
- Hendrics C. D., and Schneider J. M. Stability of conducting droplet under the influence of surface tension and electrostatic forces. *Am. J. Phys.* 1963. Vol. 31. P. 450–453.
- Hoffmann E. H., Heinold B., Kubin A., Tegen I. & Herrmann H. The importance of the representation of DMS oxidation in global chemistry-climate simulations. *Geophys. Res. Lett.* 2021. Vol. 48, e2021GL094068.
- Honrath R. E., Peterson M. C., Guo S., Dibb J. E., Shepson P. B., and Campbell B. Evidence of NO_x production within or upon ice particles in the Greenland snowpack. *Geophys. Res. Lett.* 1999. Vol. 26. P. 695–698.
- Iribarne J. V., Godson W. L. 4. Water-air systems 4.8 Clausius-Clapeyron Equation in: Atmospheric Thermodynamics, Springer, 2013.
- Isaksson E., Karlen W., Mayewski P. A., Twickler M., Whitlow S. A High-Altitude Snow Chemistry Record from Amundsenisen, Dronning Maud Land, Antarctica. *J. Glaciology*. 2001. Vol. 47 (158). P. 489–496.
- Ivey J. P., Davies D. M., Morgan V., Ayers G. P. Methansulphonate in Antarctic ice. *Tellus*. 1986. Vol. 38B. P. 375–379.
- Jacobi H.-W., Obleitner F., Da Costa S., Ginot P., Eleftheriadis K., Aas W., and Zanatta M. Deposition of ionic species and black carbon to the Arctic snowpack: Combining snow pit observations with modeling. *Atmos. Chem. Phys.* 2019. Vol 19. P. 10361–10377.
- Jeong D., Kim K., and Choi W. Accelerated dissolution of iron oxides in ice. *Atmos. Chem. Phys.* 2012. Vol. 12. P. 11125–11133.
- Ji W., and Wang P. K. Numerical simulation of threedimensional unsteady viscous flow past fixed hexagonal ice crystals in the air — Preliminary results. *Atmos. Res.* 1990. Vol. 25. P. 539–557.
- Jones A. E., Anderson P. S., Begoin M., Brough N., Hutterli M. A., Marshall G. J., Richter A., Roscoe H. K., Wolff E. W. BrO, blizzards, and drivers of polar tropospheric ozone depletion events. *Atmos. Chem. Phys.* 2009. Vol. 9. P. 4639–4652.
- Kakareka S., Kukharchyk T., Kurman P. Trace and major elements in surface snow and fresh water bodies of

- the Marguerite Bay Islands, Antarctic Peninsula. *Polar Science*. Vol. 32. Pp. 100792 (1–11).
- Kärkäs E., Teinilä K., Virkkula A., Aurela M., 2005. Spatial variations of surface snow chemistry during two austral summers in western Dronning Maud Land, Antarctica. *Atm. Env.* Vol. 39. Pp. 1405–1416.
- Keith W. D., Saunders C. P. R., 1988. Light emission from colliding ice particles. *Nature*. Vol. 336. Pp. 362–364.
- Kim K., Yoon H. I., Choi W., 2012. Enhanced Dissolution of Manganese Oxide in Ice Compared to Aqueous Phase under Illuminated and Dark Conditions. *Environ. Sci. Technol.* Vol. 46. Pp. 13160–13166.
- Knipping E. M., Lakin M. J., Foster K. L., Jungwirth P., Tobias D. J., Gerber R. B., Dabdub D., Finlayson-Pitts B. J. 2000. Experiments and Simulations of Ion-Enhanced Interfacial Chemistry on Aqueous NaCl Aerosols. *Science*. Vol. 288 (5464). Pp. 301–306.
- Latham J., 1963. Electrification produced by the asymmetric rubbing of ice on ice. *Br. J. Appl. Phys.* Vol. 14. Pp. 488–490.
- Latham J., 1964. The electrification of snowstorms and sandstorms. *Quart. J. R. Met. Soc.* Vol. 90 (383). Pp. 91–95.
- Latham J., Stow C. D., 1965. Electrification of blowing snow. *J. Met. Soc. Jap. Ser. 2*. Vol. 43 (1). Pp. 23–29.
- Leblanc F., Aplin K. L., Yair Y., Harrison R. G., Lebreton J. P., Blanc M. 2008. *Planetary atmospheric electricity*, Springer, Dordrecht. 534 pp.
- Legrand M. R., Delmas, R.J. 1988. Formation of HCl in the Antarctic atmosphere. *J. Geophys. Res.* Vol. 93. Pp. 7153–7168.
- Legrand M., Ducroz F., Wagenbach D., Mulvaney R., Hall S. S., 1998. Ammonium in coastal Antarctic aerosol and snow: role of the polar ocean and penguin emissions. *J. Geophys. Res.* Vol. 103 (D9), Pp. 11043–11056.
- Legrand M., Fenirt-Saigne C., Saltzman E. S., Germain C., 1992. Spatial and temporal variations of methanesulphonic acid and non-sea-salt sulphate in Antarctic ice. *J. Atm. Chemistry*. Vol. 14. Pp. 1–4.
- Legrand M., Fenirt-Saigne C., 1991. Methanesulphonic acid in south polar snow layers: a record of strong El Nino? *Geophys. Res. Letters*. Vol. 18(2). Pp. 187–190.
- Levich V. G., 1962. *Physicochemical Hydrodynamics*. Prentice-Hall 700 pp.
- Lieb-Lappen R.M., Obbard R. W., 2015. The role of blowing snow in the activation of bromine over first-year Antarctic sea ice. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 15. Pp. 7537–7545.
- Lyons B., Welch K. A., 1997. Lithium in waters of a polar desert. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 61 (20). Pp. 4309–4319.
- Maeno N., 1981. *The science of ice*, Hokkaido University Press (in Japanese),
- Maffezzoli N., Spolaor A., Barbante C., Bertó M., Frezzotti M., Vallelonga P., 2017. Bromine, iodine and sodium in surface snow along the 2013 Talos Dome GV7 traverse (northern Victoria Land, East Antarctica). *Cryosphere*. Vol. 11. Pp. 693e705.
- Marguerite Bay Islands, Antarctic Peninsula. *Polar Science*. 2022. Vol. 32. P. 100792 (1–11).
- Kärkäs E., Teinilä K., Virkkula A., Aurela M. Spatial variations of surface snow chemistry during two austral summers in western Dronning Maud Land, Antarctica. *Atm. Env.* 2005. Vol. 39, P. 1405–1416.
- Keith W. D., Saunders C. P. R. Light emission from colliding ice particles. *Nature*. 1988. Vol. 336. P. 362–364.
- Kim K., Yoon H. I., Choi W. Enhanced Dissolution of Manganese Oxide in Ice Compared to Aqueous Phase under Illuminated and Dark Conditions. *Environ. Sci. Technol.* 2012. Vol. 46. P. 13160–13166.
- Knipping E. M., Lakin M. J., Foster K. L., Jungwirth P., Tobias D. J., Gerber R. B., Dabdub D., Finlayson-Pitts B. J. Experiments and Simulations of Ion-Enhanced Interfacial Chemistry on Aqueous NaCl Aerosols. *Science*. 2000. Vol. 288 (5464). P. 301–306.
- Latham J. Electrification produced by the asymmetric rubbing of ice on ice. *Br. J. Appl. Phys.* 1963. Vol. 14. P. 488–490.
- Latham J., The electrification of snowstorms and sandstorms. *Quart. J. R. Met. Soc.* 1964. Vol. 90 (383). P. 91–95.
- Latham J., Stow C. D. Electrification of blowing snow. *J. Met. Soc. Jap. Ser. 2*. 1965. Vol. 43 (1). P. 23–29.
- Leblanc F., Aplin K. L., Yair Y., Harrison R. G., Lebreton J. P., Blanc M. *Planetary atmospheric electricity*, Springer, Dordrecht. 2008. 534 pp.
- Legrand M. R., Delmas R. J. Formation of HCl in the Antarctic atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1988. Vol. 93. P. 7153–7168.
- Legrand M., Ducroz F., Wagenbach D., Mulvaney R., Hall S. S. Ammonium in coastal Antarctic aerosol and snow: role of the polar ocean and penguin emissions. *Journal of Geophysical Research*. 1998. Vol. 103(D9). P. 11043–11056.
- Legrand M., Fenirt-Saigne C., Saltzman E. S., Germain C. Spatial and temporal variations of methanesulphonic acid and non-sea-salt sulphate in Antarctic ice. *J. Atm. Chemistry*. 1992. Vol. 14. P. 1–4.
- Legrand M., Fenirt-Saigne C. Methanesulphonic acid in south polar snow layers: a record of strong El Nino? *Geophys. Res. Letters*. 1991. Vol. 18(2). P. 187–190.
- Levich V. G. *Physicochemical Hydrodynamics*. 1962. Prentice-Hall, 700 pp.
- Lieb-Lappen R.M., Obbard R. W. The role of blowing snow in the activation of bromine over first-year Antarctic sea ice. *Atmos. Chem. Phys.* 2015. Vol. 15. P. 7537–7545.
- Lyons B., Welch K. A. Lithium in waters of a polar desert. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. Vol. 61 (20). P. 4309–4319.
- Maeno N. *The science of ice*. 1981. Hokkaido University Press (in Japanese),
- Maffezzoli N., Spolaor A., Barbante C., Bertó M., Frezzotti M., Vallelonga P. Bromine, iodine and sodium in surface snow along the 2013 Talos Dome GV7 traverse (northern Victoria Land, East Antarctica). *Cryosphere*. 2017. Vol. 11. P. 693e705.

- Maupetit F., Delmas R. J., 1992. Chemical Composition of Falling Snow at Dumont D'urville, Antarctica. *J. Atm. Chem.* Vol. 14. Pp. 31–42.
- Maupetit F., Delmas R. J. Chemical Composition of Falling Snow at Dumont D'urville, Antarctica. *Journal of Atmospheric Chemistry.* 1992. Vol. 14. P. 31–42.
- Mayewski P. A., Lyons W. B., 1982. Source and climatic implication of the reactive iron and reactive silicate concentrations found in a core from Meserve Glacier, Antarctica. *Geophys. Res Letters.* Vol. 9(3). Pp. 190–192.
- Mayewski P. A., Lyons W. B. Source and climatic implication of the reactive iron and reactive silicate concentrations found in a core from Meserve Glacier, Antarctica. *Geophys. Res Letters.* 1982. Vol. 9(3). 190–192.
- Millero F. J., Feistel R., Wright D. G. and McDougall T. J., 2008. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep-Sea Res. Pt. I.* Vol. 55. Pp. 50–72.
- Millero F. J., Feistel R., Wright D. G. and McDougall T. J. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep-Sea Res. Pt. I.* 2008. Vol. 55. P. 50–72.
- Mukherjee R., Ahmadi S. F., Zhang H., Qiao R., Boreyko J. B., 2021. Electrostatic jumping of frost. *ACS Nano.* Vol. 15 (3). Pp. 4669–4677.
- Mukherjee R., Ahmadi S. F., Zhang H., Qiao R., Boreyko J. B. Electrostatic jumping of frost. *ACS Nano.* 2021. Vol. 15(3). P. 4669–4677.
- Mulvaney R., Pasteur E. C., Peel D. A., Saltzman E. S., Whung P.-Y., 1992. The ratio of MSA to non-sea-salt sulphate in Antarctic Peninsula ice cores. *Tellus.* Vol. 44B (4). Pp. 295–303.
- Mulvaney R., Pasteur E. C., Peel D. A., Saltzman E. S., Whung P.-Y. The ratio of MSA to non-sea-salt sulphate in Antarctic Peninsula ice cores. *Tellus.* 1992. Vol. 44B (4). P. 295–303.
- Nijampurkar V. N., 1988. *Glaciochemical studies in Antarctica; Fifth Indian Expedition to Antarctica. Scientific Report*, Department of Ocean Development, Technical Publication no. 5. Pp. 219–224.
- Nijampurkar V. N. Glaciochemical studies in Antarctica; Fifth Indian Expedition to Antarctica. Scientific Report, Department of Ocean Development, Technical Publication no. 5. 1988. P. 219–224.
- Ńędzarek A., Tórz A., Podlasińska J., 2014. Ionic composition of terrestrial surface waters in Maritime Antarctic and the processes involved in formation Antarctic. *Science.* Vol. 27 (2). Pp. 150–161.
- Ńędzarek A., Tórz A., Podlasińska J. Ionic composition of terrestrial surface waters in Maritime Antarctic and the processes involved in formation Antarctic. *Science.* 2014. Vol. 27 (2). P. 150–161.
- Nelson J., 1997. Sublimation of Ice Crystals. *J. Atm. Science.* Vol. 55. Pp. 910–919.
- Nelson J. Sublimation of Ice Crystals. *J. Atm. Science.* 1997. Vol. 55. P. 910–919.
- Nelson J., Baker M., 2003. Charging of ice-vapor interfaces: applications to thunderstorms. *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 3. Pp. 1237–1252.
- Nelson J., Baker M. Charging of ice-vapor interfaces: applications to thunderstorms. *Atmos. Chem. Phys.* 2003. Vol. 3. P. 1237–1252.
- Nyamgerel Y., Hong S., Han Y., Kim S., Lee J., Do Hur S., 2021. Snow-Pit Record from a Coastal Antarctic Site and Its Preservation of Meteorological Features. *Earth Interactions.* Vol. 25. Pp. 108–118.
- Nyamgerel Y., Hong S., Han Y., Kim S., Lee J., Do Hur S. Snow-Pit Record from a Coastal Antarctic Site and Its Preservation of Meteorological Features. *Earth Interactions.* 2021. Vol. 25. P. 108–118.
- Odenchantz F. K., Amand P. St., Finnegan W. G., McEwan W. S., 1968. Mechanism for multiplication of atmospheric ice crystals: apparent charge distribution on laboratory crystals. *Science.* Vol. 160 (3834). Pp. 1345–1346.
- Odenchantz F. K., Amand P. St., Finnegan W. G., McEwan W. S. Mechanism for multiplication of atmospheric ice crystals: apparent charge distribution on laboratory crystals. *Science.* 1968. Vol. 160 (3834). P. 1345–1346.
- Oum K. W., Lakin M. J. and Finlayson-Pitt B. J., 1998. Bromine activation in the troposphere by the dark reaction of O₃ with seawater ice. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 25. № 21. Pp. 3923–3926.
- Oum K. W., Lakin M. J. and Finlayson-Pitt B. J. Bromine activation in the troposphere by the dark reaction of O₃ with seawater ice. *Geophysical Research Letters.* 1998. Vol. 25. № 21. P. 3923–3926.
- Palais J. M., Legrand, M., 1985. Soluble impurities in the Byrd Station ice core, Antarctica: Their origin and sources. *J. Geophys. Res.* Vol. 90. Pp. 1143–69.
- Palais J. M., Legrand, M. Soluble impurities in the Byrd Station ice core, Antarctica: Their origin and sources. *J. Geophys. Res.* 1985. Vol. 90. P. 1143–69.
- Petrenko V. F., 1996. *Electromechanical Phenomena in Ice.* Cold Regions Research & Engineering Laboratory Special Report 96–2, Thayer School of Engineering Dartmouth College, USA.
- Petrenko V. F. *Electromechanical Phenomena in Ice.* Cold Regions Research & Engineering Laboratory Special Report 96–2, 1996. Thayer School of Engineering Dartmouth College, USA.
- Petrenko V. F., Colbeck S. C., 1995. Generation of electric fields by ice and snow friction. *J. Appl. Phys.* Vol. 77 (9). Pp. 4518–4521.
- Petrenko V. F., Colbeck S. C. Generation of electric fields by ice and snow friction. *J. Appl. Phys.* 1995. Vol. 77(9). P. 4518–4521.
- Petrenko V. F., Whitworth R. W., 2003. *Physics of ice*, Oxford University Press, New York, 2d edition.
- Petrenko V. F., Whitworth R. W. *Physics of ice*, 2003. Oxford University Press, New York, 2d edition

- Pruppacher H. R., Klett J. D., 1978. *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Reidel, 714 pp.
- Rankin A. M., Wolff E. W., 2000. Ammonium and potassium in snow around an emperor penguin colony, *Antarctic Science*. Vol. 72 (2). Pp. 154–159.
- Rankin A. M., Wolff E. W., Martin S., 2002. Frost flowers: Implications for tropospheric chemistry and ice core interpretation. *J. Geophys. Res. Atmosph.* Vol. 107. D23. Pp. AAC 4–1–AAC 4–15.
- Röthlisberger R., Mulvaney R. and Wolff E. W., Hutterli M. A. Bigler M., de Angelis M., Hansson M. E., Steffensen J. P., Udisti R., 2003. Limited dechlorination of sea-salt aerosols during the last glacial period: Evidence from the European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) Dome C ice core. *J. Geophys. Res.: Atmos.* Vol. 108. Pp. 1–6.
- Ryi J.-S., Lim H. S., Choi H.-B., Kim J. H., Kim O. S. Vigier N., 2022. Lithium isotope geochemistry in the Barton Peninsula, King George island, Antarctica. *Frontiers Earth Science*. Vol. 10. Pp. 913687.
- Saigne C., Legrand, M., 1987. Measurements of methanesulphonic acid in Antarctic ice. *Nature*. Vol. 330 (6145). Pp. 240–242.
- Savoie D. L., Prospero J. M., Larsen R. J., Huang F., Izaguirre M. A., Huang T., Snowdon T. H., Custals L., Sanderson C. G., 1993. Nitrogen and sulfur species in Antarctic aerosols at Mawson, Palmer and Marsh (King George Island). *J. Atm. Chemistry*. Vol. 17. Pp. 95–122.
- Schmidt R. A., Gluns D. R., 1992. Sublimation of snow – the basics, Proceedings of the 1992 International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA. Pp. 11–17.
- Schmidt D. S., Schmidt R. A., Dent J. D., 1999. Electrostatic force in blowing snow. *Bound Layer Meteorol.* Vol. 93. P. 29–45.
- Schmidt R. A., 1972. Sublimation of wind-transported snow – a model. Research Paper RM-90, USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, CO, 80 pp.
- Seo S., Richter A., Blechschmidt A.-M., Bougoudis I., Burrows J. P., 2020. Spatial distribution of enhanced BrO and its relation to meteorological parameters in Arctic and Antarctic sea ice regions. *Atm. Chem. Phys.* Vol. 20 (20). Pp. 12285–12312.
- Shi G., Ma H., Hu Z., Chen Z., An C., Jiang S., Li Y., Ma T., Yu J., Wang D., Lu S., Sun B., and Hastings M. G., 2021. Brief communication: Spatial and temporal variations in surface snow chemistry along a traverse from coastal East Antarctica to the ice sheet summit (Dome A). *Cryosphere*. Vol. 15. P. 1087–1095.
- Shibkov A. A., Zheltov M. A., Korolev A. A., 2001. Pulsed electromagnetic and acoustic emission accompanying fast crystallization of supercooled water droplets. *Vestn. Tambov. Gos. Univ., Ser. Estestv. Tekh. Nauki*. Vol. 6 (2). Pp. 162–169.
- Simpson W. R., Frieß U., Thomas J. L., Lampel J. and Platt U., 2018. Polar nighttime chemistry produces intense reactive bromine events. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 45. Pp. 9987–9994.
- Pruppacher H. R., Klett J. D. *Microphysics of Clouds and Precipitation*, 1978. Reidel, 714 pp
- Rankin A. M., Wolff E. W. Ammonium and potassium in snow around an emperor penguin colony, *Antarctic Science*. 2000. Vol. 72 (2). P. 154–159.
- Rankin A. M., Wolff E. W., Martin S. Frost flowers: Implications for tropospheric chemistry and ice core interpretation. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2002. Vol. 107. D23. P. AAC 4–1–AAC 4–15.
- Röthlisberger R., Mulvaney R. and Wolff E. W., Hutterli M. A. Bigler M., de Angelis M., Hansson M. E., Steffensen J. P., Udisti R. Limited dechlorination of sea-salt aerosols during the last glacial period: Evidence from the European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) Dome C ice core. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2003. Vol. 108. P. 1–6.
- Ryi J.-S., Lim H. S., Choi H.-B., Kim J. H., Kim O. S. Vigier N. Lithium isotope geochemistry in the Barton Peninsula, King George island, Antarctica. *Frontiers Earth Science*. 2022. Vol. 10. P. 913687.
- Saigne C., Legrand M. Measurements of methanesulphonic acid in Antarctic ice. *Nature*. 1987. Vol. 330 (6145). P. 240–242.
- Savoie D. L., Prospero J. M., Larsen R. J., Huang F., Izaguirre M. A., Huang T., Snowdon T. H., Custals L., Sanderson C. G. Nitrogen and sulfur species in Antarctic aerosols at Mawson, Palmer and Marsh (King George Island). *J. Atm. Chem.* 1993. Vol. 17. P. 95–122.
- Schmidt R. A., Gluns D. R. Sublimation of snow – the basics, Proceedings of the 1992 International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA. 1992. P. 11–17.
- Schmidt D. S., Schmidt R. A., Dent J. D. Electrostatic force in blowing snow. *Bound Layer Meteorol.* 1999. Vol. 93. P. 29–45.
- Schmidt R. A. Sublimation of wind-transported snow – a model. 1972. Research Paper RM-90, USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, CO, 80 pp.
- Seo S., Richter A., Blechschmidt A.-M., Bougoudis I., Burrows J. P. Spatial distribution of enhanced BrO and its relation to meteorological parameters in Arctic and Antarctic sea ice regions. *Atm. Chem. Phys.* 2020. Vol. 20 (20). P. 12285–12312.
- Shi G., Ma H., Hu Z., Chen Z., An C., Jiang S., Li Y., Ma T., Yu J., Wang D., Lu S., Sun B., and Hastings M. G. Brief communication: Spatial and temporal variations in surface snow chemistry along a traverse from coastal East Antarctica to the ice sheet summit (Dome A). *The Cryosphere*. 2021. Vol. 15. P. 1087–1095.
- Shibkov A. A., Zheltov M. A., Korolev A. A. Pulsed electromagnetic and acoustic emission accompanying fast crystallization of supercooled water droplets. *Vestn. Tambov. Gos. Univ., Ser. Estestv. Tekh. Nauki*. 2001. Vol. 6 (2). P. 162–169.
- Simpson W. R., Frieß U., Thomas J. L., Lampel J. and Platt U. Polar nighttime chemistry produces intense reactive bromine events. *Geophys. Res. Lett.* 2018. Vol. 45. P. 9987–9994.

- 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.
- Suslick K. S., 1989. Chemical effects of Ultrasound. *Scientific American*. Vol. 260 (2). Pp. 80–86.
- Tham Y. J., Sarnela N., Iyer S., Li Q., Angot H., Quéléver L. L. J., Beck I., Laurila T., Beck L. J., Boyer M., Carmona-García J., Borrego-Sánchez A., Roca-Sanjuán D., Peräkylä O., Thakur R. C., He Xu-Cheng, Zha Q., Howard D., Blomquist B., Archer S. D., Bariteau L., Posman K., Hueber J., Helmig D., Jacobi H.-W., Junninen H., Kulmala M., Mahajan A. S., Massling A., Skov H., Sipilä M., Francisco J. S., Schmale J., Jokinen T., Saiz-Lopez A., 2023. Widespread detection of chlorine oxyacids in the Arctic atmosphere. *Nat Commun*. Vol. 14. Pp. 1769.
- Thorpe A., Mason B., 1966. The evaporation of ice spheres and ice crystals. *British J. Appl. Phys.* Vol. 17. Pp. 541–548.
- Tinsley B. A., Liu W., Rohrbaugh R. P., Kirkland M. W. 1998. South pole electric field responses to overhead ionospheric convection. *J. Geophys. Res.* Vol. 103 (D20). Pp. 26137–26146.
- Tkachenko E. Y., Kozachkov S. G., 2012. Possible contribution of triboelectricity to snow–air interactions, *Env. Chemistry*. Vol. 9 (2). Pp. 109–115.
- Tkachenko E. Y., 2017. Possible role of electric forces in bromine activation during polar boundary layer ozone depletion and aerosol formation events. *Atm. Res.* Vol. 196. Pp. 1–7.
- Tkachenko K., Jacobi H.-W., 2024. Electrical charging of snow and ice in polar regions and the potential impact on atmospheric chemistry. *Environ. Sci. Atmos.* Vol. 4. Pp. 144–163.
- Vallelonga P., Maffezzoli N., Moy A. D., Curran M. A. J., Vance T. R., Edwards R., Hughes G., Barker E., Spreen G., Saiz-Lopez A., Corella J. P., Cuevas C. A., Spolaor A., 2017. Sea-ice-related halogen enrichment at Law Dome, coastal East Antarctica. *Clim. Past*. Vol. 13. Pp. 171–184.
- Wagenbach D., Ducroz F., Mulvaney R., Keck L., Minikin A., Legrand M., Hall J. S., Wolff E. W., 1998. Sea-salt aerosol in coastal Antarctic regions. *J. Geophys. Res.* Vol. 103. Pp. 10961–10974.
- Winski D. A., Osterberg E. C., Kreutz K. J., Ferris D. G., Cole-Dai J., Thundercloud Z., Huang J., Alexander B., Jaeglé L., Kennedy J. A., Larrick C., Kahle E. C., Steig E. J., Jones T. R., 2021. Seasonally resolved Holocene sea ice variability inferred from South Pole ice core chemistry. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 48. Pp. e2020GL091602.
- Wishart E. R. 1970. Electrification of Antarctic Drifting Snow, in *Proceedings Int. Symposium Antarctic Glaciological Exploration*, IASH Publ. № 86, Hanover, USA. 316.
- Wu Z., Shao X., Zhu B. Wang L., Lu B., Trabelsi T., Francisco J. S. & Zeng X. 2022. Spectroscopic characterization of two peroxy radicals during the O₂-oxidation of the methylthio radical. *Commun Chem*. Vol. 17. № 5(1). Pp. 19–27.
- Yair Y., Reuveni Y., Katz Sh., Price C., Yaniv R., 2019. Strong electric fields observed during snow storms on Mt. Hermon, Israel. *Atmos. Res.* Vol. 215. P. 208–213.
- 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.
- Suslick K. S. Chemical effects of Ultrasound. *Scientific American*. 1989. Vol. 260 (2). P. 80–86.
- Tham Y. J., Sarnela N., Iyer S., Li Q., Angot H., Quéléver L. L. J., Beck I., Laurila T., Beck L. J., Boyer M., Carmona-García J., Borrego-Sánchez A., Roca-Sanjuán D., Peräkylä O., Thakur R. C., He Xu-Cheng, Zha Q., Howard D., Blomquist B., Archer S. D., Bariteau L., Posman K., Hueber J., Helmig D., Jacobi H.-W., Junninen H., Kulmala M., Mahajan A. S., Massling A., Skov H., Sipilä M., Francisco J. S., Schmale J., Jokinen T., Saiz-Lopez A. Widespread detection of chlorine oxyacids in the Arctic atmosphere. *Nat. Commun*. 2023. Vol. 14. P. 1769.
- Thorpe A., Mason B. The evaporation of ice spheres and ice crystals. *British Journal of Applied Physics*. 1966. Vol. 17. P. 541–548.
- Tinsley B. A., Liu W., Rohrbaugh R. P., Kirkland M. W. South pole electric field responses to overhead ionospheric convection. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103 (D20). P. 26137–26146.
- Tkachenko E. Y., Kozachkov S. G. Possible contribution of triboelectricity to snow–air interactions, *Env. Chemistry*. 2012. Vol. 9 (2). P. 109–115.
- Tkachenko E. Y. Possible role of electric forces in bromine activation during polar boundary layer ozone depletion and aerosol formation events. *Atm. Res.* 2017. Vol. 196. P. 1–7.
- Tkachenko K., Jacobi H.-W. Electrical charging of snow and ice in polar regions and the potential impact on atmospheric chemistry. *Environ. Sci. Atmos.* 2024. Vol. 4. P. 144–163.
- Vallelonga P., Maffezzoli N., Moy A. D., Curran M. A. J., Vance T. R., Edwards R., Hughes G., Barker E., Spreen G., Saiz-Lopez A., Corella J. P., Cuevas C. A., Spolaor A. Sea-ice-related halogen enrichment at Law Dome, coastal East Antarctica. *Clim. Past*. 2017. Vol. 13. P. 171–184.
- Wagenbach D., Ducroz F., Mulvaney R., Keck L., Minikin A., Legrand M., Hall J. S., Wolff E. W., Sea-salt aerosol in coastal Antarctic regions. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 10961–10974.
- Winski D. A., Osterberg E. C., Kreutz K. J., Ferris D. G., Cole-Dai J., Thundercloud Z., Huang J., Alexander B., Jaeglé L., Kennedy J. A., Larrick C., Kahle E. C., Steig E. J., Jones T. R., Seasonally resolved Holocene sea ice variability inferred from South Pole ice core chemistry. *Geophys. Res. Lett.* 2021. Vol. 48. P. e2020GL091602.
- Wishart E. R. Electrification of Antarctic Drifting Snow, in *Proceedings Int. Symposium Antarctic Glaciological Exploration*, 1970. IASH Publ N86, Hanover, NH: USA, 316.
- Wu Z., Shao X., Zhu B. Wang L., Lu B., Trabelsi T., Francisco J. S. & Zeng X. Spectroscopic characterization of two peroxy radicals during the O₂-oxidation of the methylthio radical. *Commun Chem*. 2022. Vol.17. № 5(1). P. 19–27.
- Yair Y., Reuveni Y., Katz Sh., Price C., Yaniv R. Strong electric fields observed during snow storms on Mt. Hermon, Israel. *Atmos. Res.* 2019. Vol. 215. P. 208–213.

Yan J., Zhang M., Jung J., Lin Q., Zhao S., Xu S., Chen L., 2020. Influence on the conversion of DMS to MSA and SO₄ in the Southern Ocean, Antarctica. *Atm. Env.* Vol. 233. Pp. 117611.

Yamashita M., Fenn J. B., 1984. Electrospray ion source, another variation of free jet theme. *J. Phys. Chem.* Vol. 88. Pp. 4451–4459.

Yan J., Zhang M., Jung J., Lin Q., Zhao S., Xu S., Chen L. Influence on the conversion of DMS to MSA and SO₄ in the Southern Ocean, Antarctica. *Atm. Env.* 2020. Vol. 233. P. 117611.

Yamashita M., Fenn J. B. Electrospray ion source, another variation of free jet theme. *J. Phys. Chem.* 1984. Vol. 88. P. 4451–4459.

Manuscript received March 15, 2025;
revision accepted May 21, 2025.

Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна