Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Географічний факультет
Кафедра метеорології та кліматології

На правах рукопису

УДК _____

Метеорологічні умови формування емісії диметилсульфіду в атмосферне повітря з поверхні Чорного моря

Галузь знань 10 Природничі науки

Спеціальність 103 Науки про Землю

Освітня програма Метеорологія

Кваліфікаційна робота бакалавра
студента 4 курсу
освітнього рівня бакалавр
Шимкевича Костянтина Руслановича

Науковий керівник:
к. геогр. наук, завідувач лабораторії моніторингу атмосферного повітря відділу моніторингу атмосфери Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС та НАН України
Савенець Михайло Валерійович

Допустити до захисту:
Завідувач кафедри метеорології та кліматології, проф.Сергій СНІЖКО
«__»_____ 2025 р.

Київ – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП 3
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМАТИКА ВИВЧЕННЯ ДИМЕТИЛСУЛЬФІДУ В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ 5
1.1. Поняття диметилсульфіду, процеси його утворення 5
1.2. Роль диметилсульфіду в метеорології 6
1.3. Проблеми дослідження, визначення та параметризації у метеорологічних моделях 8
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 12
РОЗДІЛ 2. ПОЧАТКОВІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ 13
2.1. Реаналіз CAMS 13
2.2. Методика проведених обчислень 15
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 17
РОЗДІЛ 3. ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕМІСІЇ ДИМЕТИЛСУЛЬФІДУ ТА ЙОГО ЗВ’ЯЗОК З МЕТЕОРОЛОГІЧНИМИ ВЕЛИЧИНАМИ 18
3.1. Просторово-часові закономірності емісії диметилсульфіду 18
3.2. Метеорологічні чинники впливу на емісію ДМС 24
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3 29
ВИСНОВКИ 30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 33

ВСТУП

Диметилсульфід (ДМС) являє собою органічну сполуку, що має в собі атом сірки та дві метильні групи. ДМС утворюється природно, будучи при цьому продуктом розкладу органіки. Переважно ДМС виробляється морським фітопланктоном. Після вивільнення ДМС з поверхні океану чи моря в атмосферне повітря, сполука окислюється, що призводить до утворення сульфатних аерозолів. Таким чином, ДМС безпосередньо впливає на формування хмар, відбивальну здатність земної поверхні. ДМС має ключову роль у глобальному колообігу сірки в атмосфері. Його вплив на ключові кліматичні системи викликав значне зростання наукового інтересу до значень викиду диметилсульфіду та його зв'язок з метеорологічними величинами.

Актуальність теми. Диметилсульфід здавна пов'язують саме з морською біомасою. Численна кількість досліджень була пов'язана з емісією диметилсульфіду та різних видів водоростей [6; 30; 31]. Вплив диметилсульфіду на стан атмосфери вже досить активно досліджується. Зокрема найчастіше вивчається вплив викидів ДМС на процес утворення хмар та зміну радіаційного балансу Землі [4; 7; 8; 22].

Окремі дослідження встановили залежність потоків диметилсульфіду від кліматологічних чинників, таких як температури поверхні моря, швидкості вітру, потоків сонячної радіації. Також ці дані роботи показують і не прямих внесок метеопараметрів на емісію ДМС, зокрема через збільшення біологічної продуктивності морської біомаси, за рахунок підвищення температури [6; 13; 18]. Глобальна кліматологія ДСМ суттєво розвинулися та, незважаючи на ці досягнення, регіональні дослідження, особливо ті, що зосереджені на напівзакритих морях, таких як Чорне море, залишаються обмеженими. Зокрема дана проблематика на пряму не зустрічається серед тематики українських вчених, що підкреслює актуальність регіональних досліджень, включаючи басейн Чорного моря як унікальну та чутливу територію для вивчення кліматично зумовленої мінливості морських біогеохімічних викидів.

Об’єкт дослідження: потоки диметилсульфіду (ДМС) в атмосферу.

Предмет: варіативність та метеорологічні чинники формування потоків ДМС з морської поверхні.

Мета дослідження: встановлення просторово-часових закономірностей емісії ДСМ з поверхні Чорного моря залежно від метеорологічних умов.

Відповідно до мети було поставлено низку завдань:

1. Дослідити проблематику оцінки емісії ДМС та його ролі в атмосфері.
2. Розробити методологію кількісної оцінки емісії ДМС з поверхні Чорного моря.
3. Встановти просторово-часову варіативність ДМС в районі Чорного моря.
4. Дослідити залежність потоків ДМС від ключових метеорологічних параметрів.

Використано методи аналізу літературних джерел, статистичний, математичний, порівняльний, описовий, аналізу та синтезу, картографічний.

У дослідженні використано дані реаналізу Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), а саме: викидів диметилсульфіду в г/м²/день, температури поверхні моря та швидкості вітру на акваторії Чорного моря за період 2010 - 2019 років. Бакалаврська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаної літератури (36 найменувань).

РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМАТИКА ВИВЧЕННЯ ДИМЕТИЛСУЛЬФІДУ В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ

1.1. Поняття диметилсульфіду, процеси його утворення

Диметилсульфід (ДМС) являє собою органічну сполуку, що має в собі атом сірки та дві метильні групи ($(CH_3)_2S$). Це один з найпоширеніших та важливих природних сірковмісних газів в атмосфері Землі. З метеорологічної точки зору, він має вирішальне значення завдяки своїй невід'ємній ролі в атмосферній хімії, мікрофізиці хмар і механізмах зворотного зв'язку з кліматом.

З точки зору хімічних процесів, диметилсульфід утворюється за рахунок ферментивного розщеплення свого попередника - диметилсульфоніопропіонату. Він утворюється морським фітопланктоном, також можливе утворення деякими видами мікроводоростями або бактеріями [1; 19; 34]. Враховуючи біологічне походження диметилсульфіду, вчені неодноразово вивчали його зв'язок з різними типами морської біоти. У 80-их - 90-их роках минулого сторіччя, ряд вчених досліджували кореляцію між ДМС та хорофілом а (показником біомаси) [3; 17; 26]. Після утворення ДМС може зазнавати різних перетворень у морській воді. Окислення ДМС мікробними спільнотами може призвести до утворення нелетких продуктів, таких як диметилсульфоксид (ДМСО), які не впливають безпосередньо на рівень сірки в атмосфері. Баланс між мікробним споживанням і викидами значною мірою визначає чистий потік в системі «море-повітря». Рух повітря, спричинений вітром, а також різниця температур поверхні, моделюють швидкість, з якою ДМС вивільняється в атмосферу.

ДМС та продукти його окиснення є недовговічними видами (їх життя в атмосфері коливається від декількох годин до кількох діб [9]), через те їхній вплив на радіаційний баланс та температуру має відрізнятися між регіонами та в залежності від атмосферного переносу з джерел випромінювання. Так само місцевий потік цього

суто біогенного газу, що виділяється внаслідок екологічних взаємодій між організмами, є дуже динамічним і змінним з часом. Відтак недостатньо кількісно визначити щорічний потік викидів ДМС з глобального океану; скоріше необхідно вирішити його просторову та часову мінливість з відповідною роздільною здатністю, яка перевищує наші спроможності щодо відбору проб та вимірювань в польових умовах.

Сімо Р. [27] винайшов алгоритм, який дозволяє прогнозувати концентрації ДМС на поверхні океану за даними супутникового хлорофілу а та кліматологічної глибини змішаного шару. Моделі, подібні до розроблених Сімо, допомагають параметризувати ці потоки в глобальних моделюваннях. Серед них також [2; 8; 11].

Метеорологічні умови відіграють вирішальну роль у перенесенні ДМС з поверхні моря в атмосферу. Швидкість вітру є одним з головних чинників викидів ДМС, оскільки вона посилює турбулентний рух через межу системи “океан-атмосфера”. Крім того, температура поверхні моря, сонячна радіація та атмосферний тиск можуть моделювати біологічне утворення ДМС та його подальший потік.

1.2. Роль диметилсульфіду в метеорології

Внесок ДМС в відбиваючі властивості аерозолів і формування клімату є значним, особливо у віддалених океанічних регіонах. Дослідження Боппа та ін. [6] показали, що кліматичні фактори, такі як температура та тривалість сонячного сяйва, безпосередньо впливають на концентрацію ДМС, створюючи умови, через які кліматичні зміни можуть змінювати циркуляцію в системі “океан-атмосфера”.

Куросакі та ін. [18] продемонстрували, що рівні ДМС, зафіксовані в кернах льоду Гренландії, корелюють з історичними періодами відступу морського льоду, підтверджуючи історичну та сучасну важливість цієї сполуки в кліматичній системі. Аналогічно, Хаяшіда [13] підкреслили вплив біогеохімії морського льоду на

утворення ДМС, припустивши, що відступ морського льоду посилює біологічну активність, тим самим збільшуючи викиди ДМС.

У свіжому дослідженні Новак та інш. [22] вивчали одночасні викиди ДМС та метантіолу (MeSH) з океанічної поверхні та їхню роль у хімічному складі сірки в атмосфері. Їхні висновки наголошують на необхідності розглядати ДМС в ширшому контексті сірковмісних сполук, які взаємодіють в морських та атмосферних системах. Таку точку зору підтримують Чжоу та ін. [36], котрі розробили 20-річний набір даних щодо концентрації ДМС на морській поверхні, висвітлюючи її зміни в часі.

Диметилсульфід (ДМС) відіграє важливу роль в атмосферній хімії та хмарній мікрофізиці, оскільки він перетворюється на сульфатні аерозолі. Будучи найпоширенішою біогенною сірковмісною сполукою, яка потрапляє в атмосферу, переважно з морського фітопланктону, ДМС суттєво впливає на глобальний кругообіг сірки та кліматичні механізми регулювання [19].

Після потрапляння в атмосферу, ДМС піддається окисленню різними хімічними шляхами, переважно через взаємодію з гідроксильними радикалами (OH), нітратними радикалами (NO3) та озоном (O3). Ці реакції породжують проміжні та кінцеві продукти, як-от діоксид сірки (SO2), метансульфонова кислота (MSA) та сірчана кислота (H2SO4), що є попередниками аерозолів сульфатів не морського походження. Відносна пропорція цих продуктів залежить від режиму окислення, що визначається умовами в атмосфері: температурою, вологістю, сонячною радіацією.

Ці продукти окиснення, зокрема H_2SO_4, відіграють ключову роль в утворенні нових частинок та рості існуючих. Молекули сірчаної кислоти можуть збиратися, утворюючи нові нанорозмірні частинки, або ж конденсуватися на наявних аерозолях, збільшуючи їх масу і здатність бути ядрами конденсації хмар (CCN). Присутність аміаку та органічних сполук ще більше сприяє цим процесам [32].

Останні дослідження (наприклад, [15] демонструють, що, хоча ефективність перетворення ДМС на CCN є варіативною, регіони з високою біологічною активністю та сприятливими метеорологічними умовами можуть відчувати значне збільшення

аерозольного навантаження, яке безпосередньо пов'язане з морськими викидами ДМС.

Зростання кількості сульфатних аерозолів внаслідок окиснення ДМС призводить до збільшення CCN, що може сприяти формуванню хмар із більшою кількістю крапель, але меншим їх розміром. Такі хмари мають більшу відбивну здатність і довговічність, що сприяє охолоджуванню клімату [19; 28]. Цей механізм привернув увагу в кліматичному моделюванні як потенційний негативний зворотний зв'язок щодо глобального потепління, особливо в областях морських стратокумулятивних хмар.

Крім того, менші хмарні краплі мають менше шансів об'єднатися у дощові краплі, потенційно знижуючи ефективність опадів. Проте, цей зв'язок нелінійний та залежить від концентрації аерозолів в навколишньому середовищі, швидкості висхідних потоків і наявних метеорологічних умов.

Більше того, сульфатні аерозолі впливають на радіаційний баланс Землі як безпосередньо, розсіюючи сонячне випромінювання, так і опосередковано, через взаємодію з хмарами. Проте, новіші дослідження представляють більш детальну картину. Деякі з них вказують на розбіжності між просторовими та часовими кореляціями між концентраціями ДМС та властивостями хмар.

1.3. Проблеми дослідження, визначення та параметризації у метеорологічних моделях

В останні роки роль супутникових досліджень мають визначне значення (наприклад, роботи), а також дослідження із залученням процесу інтерполяції на основі машинної обробки [12].

Однією з ключових проблем у кліматичному та атмосферному моделюванні є недостатня кількість і нерівномірність спостережень DMS у світовому океані.

Загалом, викиди ДМС та його перетворення на сульфатні аерозолі залишаються життєво важливими для розуміння динаміки клімату. Постійне вдосконалення

супутникового дистанційного зондування, моделювання хімічного переносу та кліматичних симуляцій з високою роздільною здатністю надає нові можливості для покращення нашого розуміння механізмів, що пов'язують морські біогенні викиди з утворенням хмар та опадами.

Точне представлення взаємодії системи “ДМС-аерозоль-хмара” в чисельних моделях залишається складним завданням. Більш ранні моделі часто припускали фіксовані коефіцієнти перетворення між ДМС і сульфатом, але такий підхід нехтував роллю метеорологічної мінливості і процесу окислення. Більш сучасні моделі системи Землі включають динамічні викиди ДМС, хімічні шляхи та мікрофізику хмар.

Точному кількісному визначенню вмісту ДМС в океані та атмосфері перешкоджає декілька факторів. ДМС є дуже мінливою і реактивною речовиною з коротким часом життя в атмосфері (від кількох годин до доби), що вимагає виявлення в реальному часі або близькому до реального часу. Більшість даних отримують з вимірювань з суден, які пропонують обмежене просторове покриття і часто мають сезонний характер [19]. Відбір проб з повітря, хоча і корисний для вертикального профілювання, є дорогим і логістично складним.

Стаття Піно-Кортес та колег [23] акцентується на створенні новаторського підходу до обробки даних емісій морського походження з метою їх подальшого застосування в моделях атмосферної хімії. Основний акцент робиться на галогенованих вуглеводнях (зокрема $CHBr_3$, CH_2Br_2, CH_3I) та диметилсульфіді – ключових речовинах, які впливають на атмосферні процеси, особливо в морських та прибережних зонах.

Вперше було запропоновано універсальний методологічний підхід, що дає змогу інтегрувати дані з глобального набору CAMS-GLOB-OCE в атмосферні моделі регіонального рівня (наприклад, CMAQ або CAMx), беручи до уваги:

- просторову прив'язку (відображення на певній сітці),
- часове масштабування (агрегація щоденних даних),
- відповідність вимогам щодо форматів вхідних файлів моделей.

Розроблено автоматизований процес обробки вихідних даних CAMS, що робить їх придатними для безпосереднього використання у сценаріях моделювання якості повітря та атмосферного перенесення.

Дослідження включає не тільки технічну конвертацію даних, але й валідацію методу, в тому числі тестові прогони моделей на регіональному рівні (зокрема, на узбережжі Чилі), що демонструє покращення достовірності моделювання концентрацій та потоків ДМС і галогенованих сполук.

Чжоу та співавтори [36] презентують перший глобальний, щоденний, 1°×1° набір даних концентрацій та емісії ДМС за період 1998–2017 років, створений за допомогою ансамблю штучних нейронних мереж. Це перше щоденне глобальне поле ДМС, що охоплює десятиліття, і дає можливість вивчати короткотермінову динаміку та довготривалі тенденції.

Продукт значно точніше відтворює атмосферні маркери (MSA), що робить його цінним інструментом для моделей хімтранспорту та кліматичних досліджень.

Стаття Ванг [32] розглядає розробку оновленої глобальної кліматології концентрації диметилсульфіду у поверхневих шарах океану, використовуючи штучну нейронну мережу (ШНМ).

Власне, це вперше ШНМ застосовано для побудови глобальної кліматології ДМС.

Такий підхід сприяє покращенню розрахунків атмосферного навантаження сіркою, що критично важливо для процесів утворення хмар та радіаційного балансу.

Автори статті зводять міст між емпіричними даними та моделюванням кліматичних систем, підвищуючи надійність даних для хімічних моделей атмосфери та загальних оцінок зворотного зв'язку між океаном та атмосферою.

Стаття Edtbauer та співавторів [10] презентує новаторський, цілісний підхід до вимірювання морських біогенних летких сполук, таких як DMS, $DMSO_2$ та щойно відкритий метан сульфонамід (MSAM), безпосередньо в атмосфері над Аравійським морем.

Отримані результати поглиблюють розуміння новаторського впливу біогенних процесів на цикли сірки та азоту в прибережних і апвелінгових зонах.

MSAM, разом з ДМС і $DMSO_2$, відіграє важливу роль у процесах утворення нових аерозольних ядер, що може мати вагомий вплив на кліматичні показники та якість повітря в морських областях.

Остаточні дані мають потенціал для стимулювання включення MSAM у моделі морської хімічної динаміки та кліматичні симуляції.

Нещодавні досягнення в мас-спектрометрії реакції переносу протонів (PTR-MS) і мас-спектрометрії хімічної іонізації (CIMS) покращили чутливість виявлення, але гармонізація протоколів калібрування залишається проблематичною [32].

Дистанційне зондування ДМС залишається складним через перешкоди від водяної пари та відсутність спеціальних супутникових датчиків, хоча методи, що включають непрямі показники (наприклад, хлорофіл а та температуру поверхні моря), вдосконалюються [12].

Основне джерело невизначеності в кліматичних моделях пов'язане з параметризацією потоку ДМС з моря в повітря. Поширені схеми використовують об'ємні рівняння, які пов'язують поверхневі концентрації ДМС зі швидкістю вітру (наприклад, [21]). Однак ці підходи часто нехтують біологічною мінливістю та опором поверхневого мікрошару, які можуть моделювати фактичний потік.

Моделі, подібні до запропонованих [19], надають щомісячні кліматологічні дані, але не враховують високочастотну мінливість, наприклад, цвітіння фітопланктону. Динамічне поєднання з біогеохімічними моделями океану (наприклад, PISCES, BFM) пропонує шлях до більш точного представлення, але вимагає великих обчислювальних витрат і залежить від екологічної параметризації.

У статті [32] автори побудували карту концентрацій диметилсульфіду у світовому океані, використовуючи штучну нейронну мережу. Вони взяли близько 83 тисяч вимірювань ДМС з різних частин океану і поєднали їх з супутніми даними — такими як температура води, солоність, глибина змішування, кількість сонячного

світла, а також вміст поживних речовин (нітратів, фосфатів, силікатів). Також враховували місце (широту і довготу) і пору року. На основі цих даних нейромережа навчилась передбачати рівень ДМС у місцях, де безпосередніх вимірювань не було.

Покращення представлення ДМС в науці про атмосферу вимагає міждисциплінарного підходу:

-розгортання автономних морських платформ (наприклад, буїв Арго з сенсорами ДМС)

-розширення мереж спостережень у реальному часі в регіонах з недостатньою вибіркою

-інтеграція супутникових проксі (хлорофіл, SST) та методів асиміляції даних

-використання машинного навчання для прогнозування викидів у мінливих умовах навколишнього середовища

Міжнародна співпраця, така як Дослідження поверхні океану і нижніх шарів атмосфери (SOLAS), має вирішальне значення для координації цих зусиль. З точки зору політики, краще розуміння зворотного зв'язку хмар, пов'язаного з ДМС, може також сприяти обговоренню питань прояснення морських хмар та інших геоінженерних пропозицій.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Отже, розуміння ДМС в метеорології не обмежується визначенням його як джерела сірки. Воно також включає в себе аналіз чинників викидів, механізмів перенесення, шляхів окиснення та кінцевих кліматичних ефектів.

Основна проблема полягає в тому, що концентрація диметилсульфіду у світовому океані має складну сезонну й просторову змінність, яку важко точно врахувати через обмежені спостереження. Через це метеорологічні моделі часто використовують спрощені або застарілі значення розподілу ДМС, що знижує точність прогнозів утворення хмар і атмосферної сірки.

РОЗДІЛ 2. ПОЧАТКОВІ ДАНІ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Реаналіз CAMS

Європейський центр середньострокових прогнозів погоди (ECMWF) вже понад десять років займається прогнозами та аналізом складу атмосфери.

Реаналіз Служби моніторингу атмосфери Коперника (CAMS) – це найновіший глобальний набір даних повторного аналізу складу атмосфери, створений Європейським центром середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), що складається з тривимірних узгоджених у часі полів складу атмосфери, включаючи аерозолі та хімічні речовини.

Реаналіз CAMS – це набір даних, який можна використовувати для обчислення кліматологічних показників, вивчення тенденцій, оцінки моделей, порівняння інших повторних аналізів або служити граничними умовами для регіональних моделей за минулі періоди.

Дані про викиди базуються на даних спостережень за концентрацією DMS, опублікованих Ланою [19], формулах потоку, описаних Найтінгейлом [21], та метеорологічних даних, розрахованих Норвезьким метеорологічним інститутом з використанням моделі ECMWF-IFS версії Cy40r1.

Для ДМС у CAMS використовується спеціальний набір даних CAMS-GLOB-OCE. Він надає щоденні карти викидів із просторовою роздільною здатністю 0,5° на 0,5° і охоплює період з 2000 по 2022 рік. Кожен з файлів містить значення довготи, широти та викиди ДМС з поверхні океану в одиницях кг(ДМС)/м2/с. У комірках сітки, де немає даних або над суходолом, викиди дорівнюють нулю. У комірках сітки, що містять як водну, так і сухопутну поверхню, будь-яке ненульове значення потоку слід застосовувати лише до тієї частини комірки, яка покрита океаном.

Глобальний масив викидів CAMS-GLOB-OCE є стандартним вхідним полем для IFS (Integrated Forecasting System від ECMWF) у режимі реаналізу та прогнозів.

Викиди розраховуються на основі даних про стан океану та атмосфери (наприклад, температура води, вітер), отриманих з реаналізу ERA 5, і наукових формул, які описують, як ДМС переходить з водної поверхні в повітря.

Ці дані широко використовуються у прогнозах погоди та клімату, оскільки ДМС впливає на утворення хмар і може змінювати енергетичний баланс атмосфери. CAMS регулярно оновлює і перевіряє ці дані, тому вони є надійним джерелом для наукових досліджень і моделювання.

CAMS отримує дані ERA 5 у вигляді метеорологічних параметрів: температура поверхні моря, вітер, тиск, глибина перемішування тощо. Це забезпечує узгодженість моделі з атмосферними та хімічними параметрами, що дозволяє точніше моделювати процеси транспортування газу.

ERA 5 — це глобальний атмосферний реаналіз, створений Європейським центром середньострокових прогнозів погоди (ECMWF) в межах програми Copernicus. Він надає повну картину стану атмосфери, поверхні землі та океану з 1979 року по сьогодні, з високою просторовою (близько 30 км) і часовою (щогодинно) роздільністю.

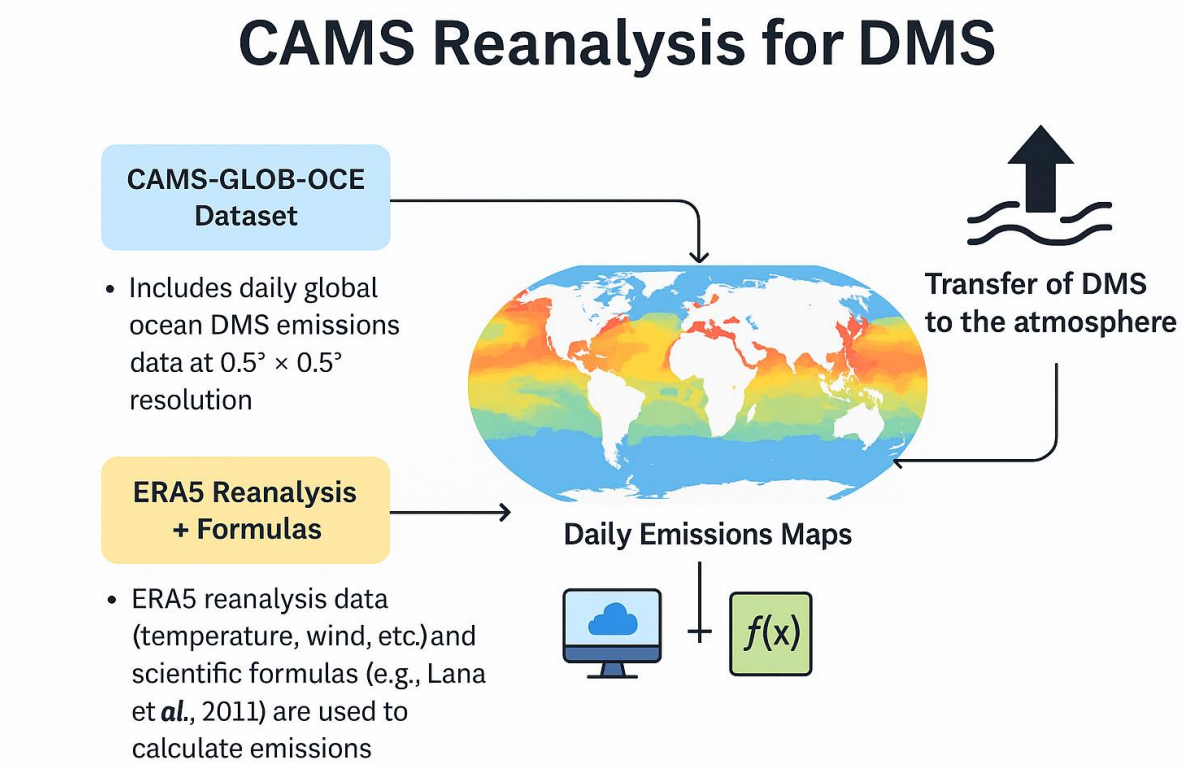


Рис. 2.1. Схема моделювання викидів ДМС в системі CAMS

Схема, представлена на рис. 2.1, ілюструє зв'язок між реаналізом ERA 5, обчисленням потоку диметилсульфіду в океані, створенням карт глобальних викидів в ансамблі CAMS-GLOB-OCE та їх подальшою інтеграцією з хімічною моделлю реаналізу CAMS для моделювання атмосферних процесів.

2.2. Методика проведених обчислень

Для дослідження було використано дані реаналізу Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS) з охопленням періоду з 2010 по 2019 рр. Обрано два ключових параметрів, за якими проведено оцінювання взаємозв'язку ДМС з метеорологічними величинами: швидкістю вітру та температурою поверхні моря. Дані емісії ДМС представлені у г/м^2/добу.

Набори даних у форматі NetCDF (розширення «.NC») було завантажено з CAMS для кожного окремого місяця. Обробка даних здійснювалася за допомогою терміналу cygwin (https://www.cygwin.com) із використанням програмного пакету CDO (Climate Data Operators, https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo). Зокрема, у CDO здійснено осереднення за певні періоди, обчислення кліматичної норми (середні багаторічні значення).

Перша частина результатів, що описує часовий та просторовий розподіл диметилсульфіду, візуалізована за допомогою програми PanoplyWin, версії 5.2.10 (https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/). Було побудовано карти середньої багаторічної емісії ДМС, середніх багаторічних значень ДМС для першого січня та першого липня.

Друга частина представлена картами середній багаторічних значень метеорологічних величин, а саме: швидкості вітру та температури поверхні моря. Параметр температури поверхні моря надходить від різних провайдерів, які по-різному обробляють дані спостережень. Кожен провайдер використовує дані з кількох різних джерел спостереження. Наприклад, супутники вимірюють температуру поверхні моря в шарі товщиною кілька мікрон у верхньому міліметровому шарі океану, плавучі буї вимірюють на глибині приблизно 0,2 – 1,5 м.

Третя частина результатів представляють аналіз трендів. Величина трендів обчислена для обраних точок (вузлів сітки реаналізу) на північному заході (45,5 N 31 E), центрі (43 N 33 E) та південному сході (42 N 38 E) акваторії Чорного моря із використанням Microsoft Excel. Обрання точок для обчислення трендів було здійснено на етапі після отримання результатів аналізу просторового розподілу.

Значення трендів представлені для кожного із місяців за багаторічний період (2010 – 2019 роки). За отриманими даними була побудована таблиця кореляції для трьох обраних точок.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Система CAMS у поєднанні з метеорологічним реаналізом ERA 5 забезпечує точне оцінювання щоденних викидів диметилсульфіду з поверхні океану. Розрахунки базуються на сучасних параметризаціях, які враховують погодні фактори, такі як температура води та швидкість вітру. Згенеровані дані про викиди інтегруються в атмосферну модель CAMS Reanalysis, де диметилсульфід відіграє ключову роль у формуванні аерозолів і хмарності. Це дозволяє детально моделювати вплив природних джерел ДМС на радіаційний баланс атмосфери та кліматичні процеси. Отже, система CAMS є потужним інструментом для дослідження взаємодії океану та хімічних процесів в атмосфері.

РОЗДІЛ 3. ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕМІСІЇ ДИМЕТИЛСУЛЬФІДУ ТА ЙОГО ЗВ'ЯЗОК З МЕТЕОРОЛОГІЧНИМИ ВЕЛИЧИНАМИ

3.1. Просторово-часові закономірності емісії диметилсульфіду

Викиди диметилсульфіду з океанічних просторів є ключовим природним процесом, що впливає на утворення аерозолів, хмар та, відповідно, на радіаційний баланс атмосферного шару. Цей показник характеризується значною просторовою та сезонною варіативністю, залежно від низки факторів, включаючи біологічну активність, температурний режим води, вітрові умови та інші параметри. Закономірності викидів ДМС у світовому океані добре досліджені, проте регіональні моря, зокрема Чорне, вивчені значно менше.

Представлені на рис. 3.1 середньорічні багаторічні значення викидів диметилсульфіду у Чорному морі вказують на виражену просторову неоднорідність розподілу викиду цієї сполуки в атмосферу. Найбільші сумарні річні показники зафіксовані у західній частині моря — особливо в акваторіях поблизу узбережжя Болгарії, Румунії та північно-західної Туреччини. Річний показник у цьому регіоні може перевищувати 0,20 г/м²/рік, тоді як у східних районах, зокрема поблизу Грузії, росії та східної Туреччини, річна емісія значно нижча — в межах 0,05 – 0,10 г/м²/рік.

Такий розподіл демонструє стабільну перевагу західного сектору моря у загальнорічному балансі викидів ДМС та може бути зумовлений взаємодією гідрологічних, біогеохімічних та кліматичних факторів, зокрема інтенсивною циркуляцією водних мас, високою первинною продукцією та впливом річкового стоку (зокрема з боку Дунаю).

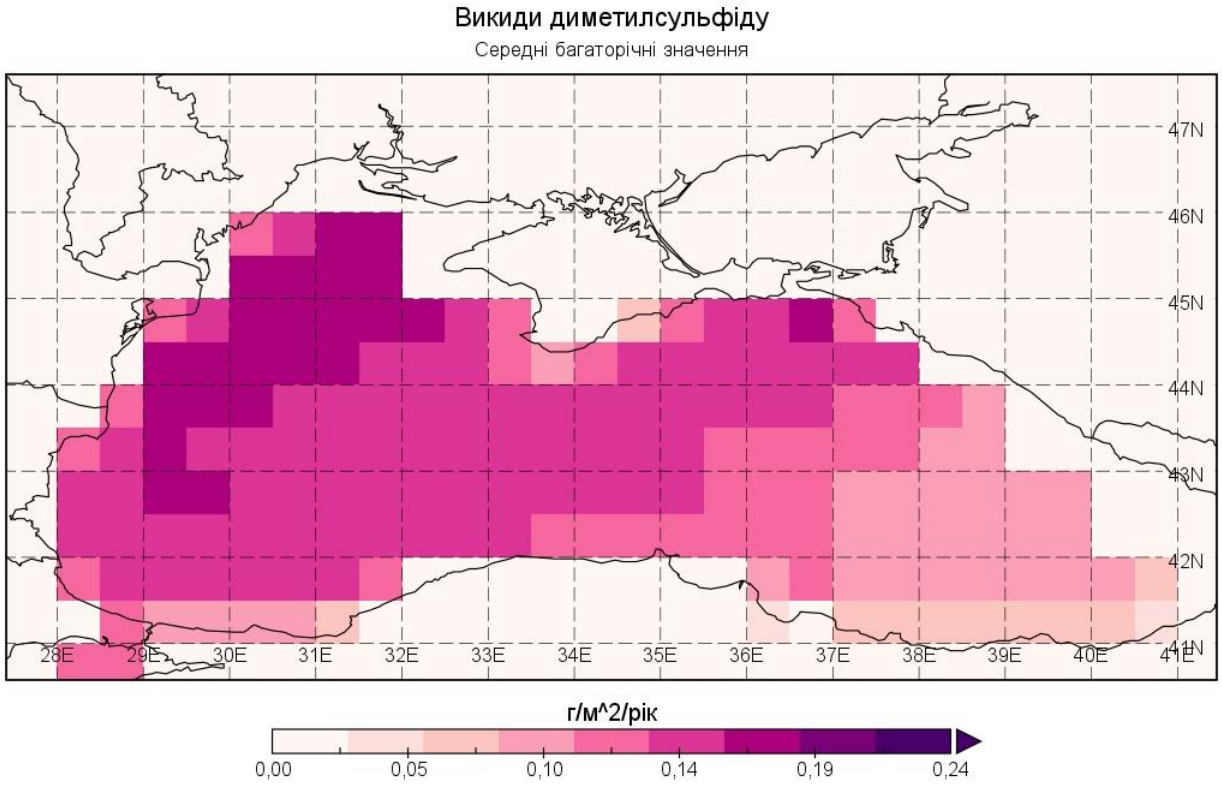


Рис. 3.1. Середні багаторічні значення викиду диметилсульфіду, г/м²/рік.

Щодо сезонної мінливості викидів ДМС, доцільно провести порівняльний аналіз карт за 1 липня (літній період) та 1 січня (зимовий період), які ілюструють характерні багаторічні середні флюкси у ці два протилежні сезони (рис. 3.2).

Влітку (див. рис. 3.2, б) спостерігається сезонний пік емісії ДМС. Це пов'язано з інтенсивним фітопланктонним цвітінням, високими температурами морської поверхні та активним вітровим перемішуванням, які разом створюють сприятливі умови для вивільнення ДМС з води в атмосферу. Найбільші значення викидів (понад 8E-10 г/м²/добу) також реєструються в західній частині моря, проте зона високої емісії розширюється, охоплюючи центральні та південні ділянки акваторії. Це свідчить про сезонне розширення зони активної емісії в теплу пору року.

Зовсім інша картина спостерігається в січні (див. рис. 3.2, а), коли фіксується сезонний мінімум викиду ДМС. Зниження температури води, скорочення світлового дня, зменшення біологічної активності (особливо фітопланктону) та зниження обміну

між водою та атмосферою призводять до суттєвого зниження викидів. Максимальні значення емісії в зимовий період (до ~1E-10 г/м²/добу) майже вдесятеро менші, ніж влітку, а географія високих значень звужується, зосереджуючись лише в окремих районах західного узбережжя.

Таким чином, аналіз сезонних карт підтверджує чітко виражену сезонну динаміку емісії ДМС у Чорному морі з домінуванням літніх показників. Водночас, просторовий центр активності зберігається протягом усього року, залишаючись у західній частині акваторії. Взимку емісія не лише слабша, але й більш локалізована. Влітку ж зона активного викиду розширюється на більшу частину моря, що вказує на потенційно більший кліматичний вплив ДМС у теплу пору року.

а) б)

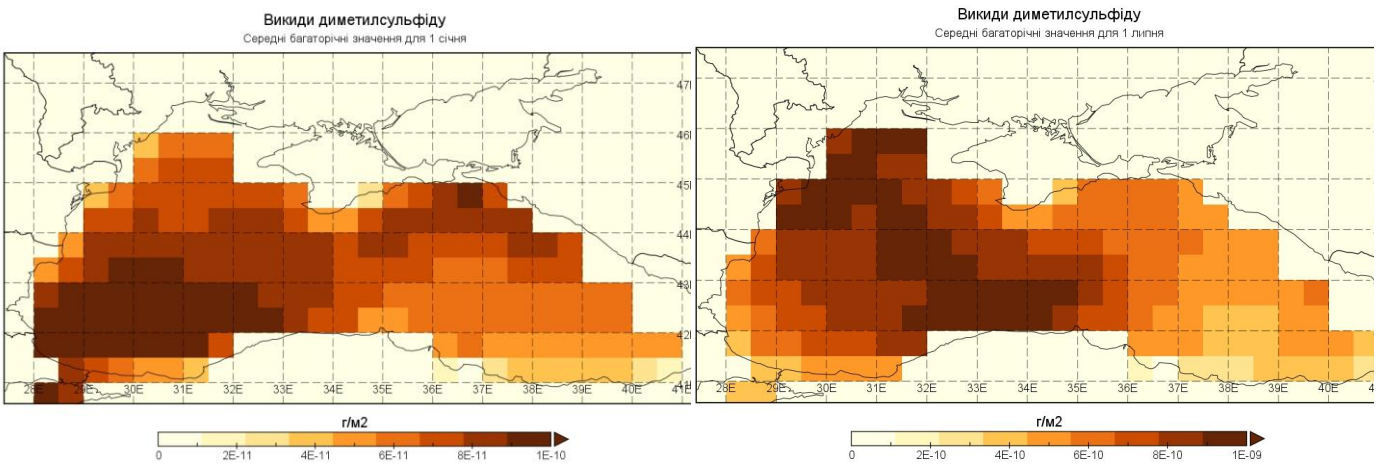


Рис. 3.2. Середні багаторічні значення викидів диметилсульфіду, г/м²/добу:
а) значення для 01 січня; б) значення для 01 липня

У даному дослідженні було також проаналізовано графіки, що відображають середньомісячні багаторічні значення емісії диметилсульфіду у трьох точках спостереження (рис. 3.3).

Аналіз показників емісії ДМС у точці №1 (рис. 3.3, а) показує виражену сезонну циклічність. У зимово-весняний період – з січня по квітень – фіксуються стабільно

низькі показники емісії. Протягом цього часу середні значення не перетинають позначку приблизно $2{,}0\times10^{-8}$ г/м²/добу.

У травні емісія починає повільно збільшуватись, і цей процес триває до кінця червня – початку липня, коли досягається максимальний рівень. Пік фіксується на позначці понад $1{,}4\times10^{-7}$ г/м²/добу. Це вказує на значну активізацію процесів формування або вивільнення ДМС у літній сезон.

Після досягнення піку, у другій половині літа (серпень) та на початку осені (вересень), спостерігається зниження емісій, але рівень залишається вищим, ніж на початку року. І лише в жовтні-грудні емісія повертається до початкових значень, близьких до зимово-весняного періоду.

Графік для точки №2 (рис. 3.3, б) демонструє аналогічну сезонну картину. У січні-квітні значення емісії залишаються низькими. У травні емісія різко зростає, досягаючи максимуму у червні-липні. Варто відзначити, що за рівнем пікової емісії цей пункт майже не поступається точці №1 – значення перевищує $1{,}4\times10^{-7}$ г/м²/добу.

У період з серпня по вересень спостерігається поступове зниження показників. Однак характер цієї динаміки є більш розмитим, порівнюючи з точкою №1 – емісія зменшується повільніше, з наявністю короткочасних сплесків. З жовтня до грудня емісія знову повертається до рівня, близького до початку року.

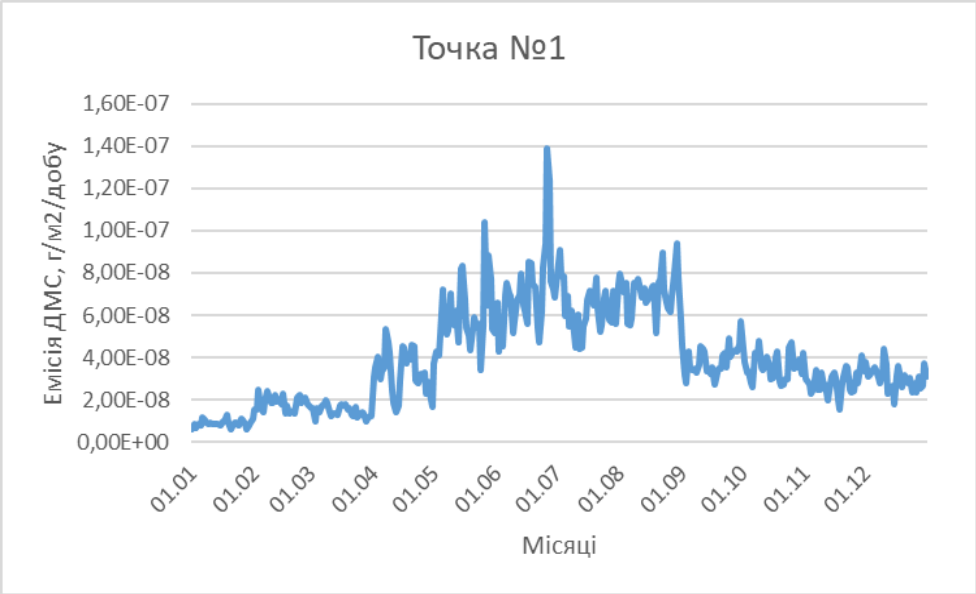
Сезонні коливання в точці №3 також чітко простежуються, проте певні деталі відрізняються. Взимку та на початку весни рівень емісії залишається стабільно низьким. Починаючи з травня, емісія різко зростає, досягаючи максимуму у червні – на рівні понад $1{,}3\times10^{-7}$ г/м²/добу. Це значення дещо нижче за показники точок №1 та №2, але різниця не є суттєвою.

З серпня по жовтень емісія поступово знижується, однак на графіку видно, що рівень коливань залишається вищим порівняно з іншими пунктами. Це може свідчити про те, що в районі цього пункту існують додаткові або нестабільні джерела утворення ДМС. У листопаді та грудні емісія повертається до базових значень, типових для зимового періоду.

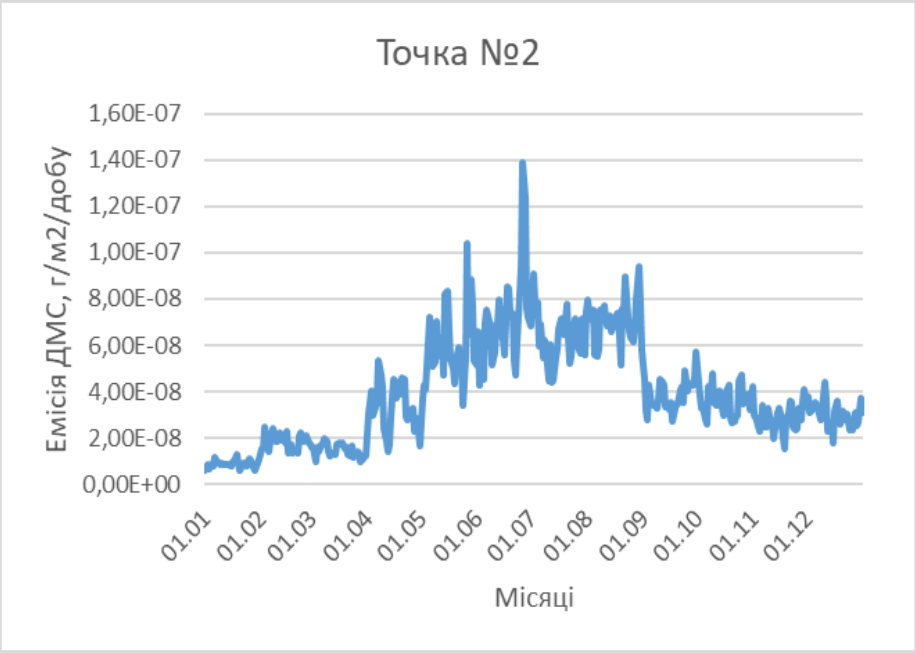
Усі три графіки демонструють подібну динаміку, характерну для сезонного типу варіацій. У зимовий та весняний періоди (з січня по квітень) рівень емісії ДМС є стабільно низьким. Починаючи з травня, рівень викидів стрімко зростає та досягає піку у червні-липні. Це свідчить про вплив підвищення температури, біологічної активності водоростей, фітопланктону або мікроорганізмів, що сприяють виділенню ДМС.

Після піку у другій половині літа та на початку осені відзначається зниження рівня емісії, яке триває до зими. Незважаючи на це, характер зниження та інтенсивність флуктуацій у трьох пунктах дещо різняться. Наприклад, у пункті №3 фіксуються дещо вищі значення в осінній період і більше короткочасних коливань, тоді як у точці №1 динаміка є найбільш рівномірною.

а)



б)



в)

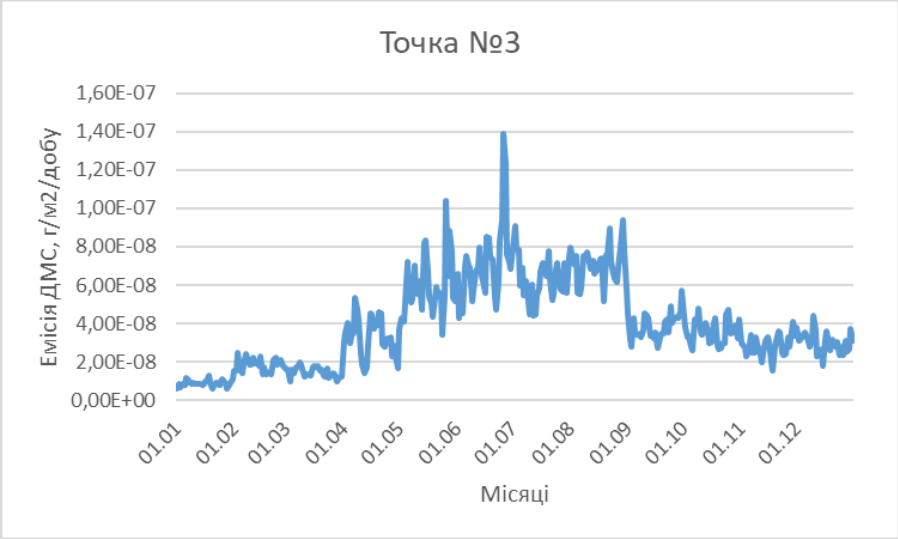


Рис. 3.3. Середньомісячні багаторічні значення емісії диметилсульфіду: а) для точки №1; б) для точки №2; в) для точки №3

3.2. Метеорологічні чинники впливу на емісію ДМС

У ході дослідження було побудовано графіки, що ілюструють взаємозв’язок між емісією диметилсульфіду, температурою поверхні моря та швидкості вітру у трьох різних точках спостереження. Емісія ДМС представлена у вигляді кількості речовини, що вивільняється з поверхні моря в атмосферу (у г/м²/добу), температура — у градусах Цельсія, швидкість вітру - у метрах за секунду. На кожному графіку також відображено лінію лінійного тренду з відповідним рівнянням та коефіцієнтом детермінації (R^2), який свідчить про рівень кореляції між змінними.

Рівняння прямої тренду для точки № 1 (рис. 3.4, а) виглядає так:

$$y = -2E\text{-}08x + 1E\text{-}05,$$

а коефіцієнт детермінації становить $R^2 = 0{,}006$.

Це означає, що з кожним градусом Цельсія підвищення температури емісія ДМС знижується на $2 \cdot 10^{-8}$ г/м²/добу, що є мізерною зміною. Низьке значення R^2 вказує на відсутність помітного лінійного зв'язку між температурою морської поверхні та виділенням ДМС у цій точці — лише 0,6% коливань емісії можна пояснити змінами температури.

Для другої точки (рис. 3.4, б) рівняння тренду таке:

$$y = -0{,}0000000x + 0{,}0000127,$$

а коефіцієнт детермінації: $R^2 = 0{,}0000007$.

Цей результат свідчить майже про цілковиту відсутність залежності. Температурні зміни не мають помітного впливу на емісію ДМС, про що свідчить як майже нульовий нахил лінії тренду, так і надзвичайно низьке значення R^2.

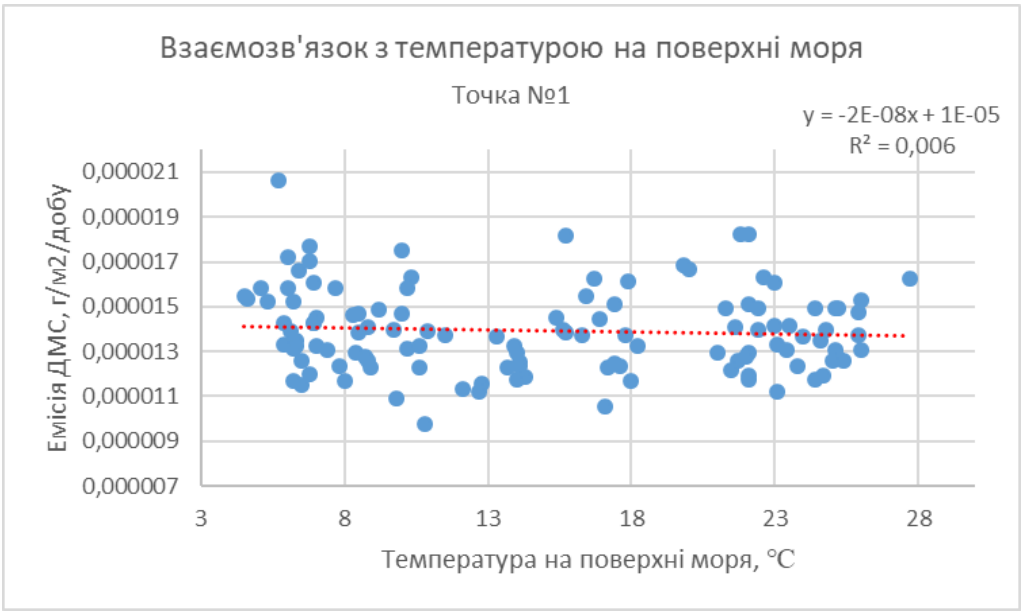
У третій точці (рис. 3.4, в) рівняння тренду має вигляд:

$$y = -1E\text{-}08x + 8E\text{-}06,$$

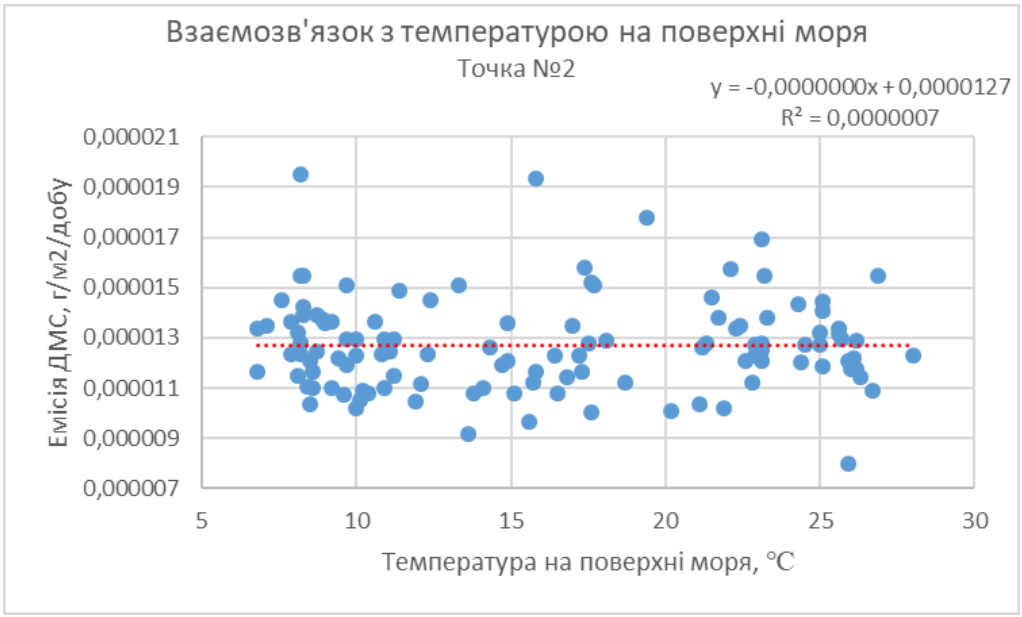
а коефіцієнт детермінації — $R^2 = 0{,}0032$.

Як і у попередніх випадках, спостерігаємо слабкий негативний зв’язок, але кореляція залишається дуже низькою. Тобто температура також не є визначальним фактором виділення ДМС у цьому місці.

а)


Взаємозв'язок з температурою на поверхні моря
Точка №1
y = -2E-08x + 1E-05
R² = 0,006
Емісія ДМС, г/м2/добу
0,000021
0,000019
0,000017
0,000015
0,000013
0,000011
0,000009
0,000007
3
8
13
18
23
28
Температура на поверхні моря, °C

б)


Взаємозв'язок з температурою на поверхні моря
Точка №2
y = -0,0000000x + 0,0000127
R² = 0,0000007
Емісія ДМС, г/м2/добу
0,000021
0,000019
0,000017
0,000015
0,000013
0,000011
0,000009
0,000007
5
10
15
20
25
30
Температура на поверхні моря, °C

в)

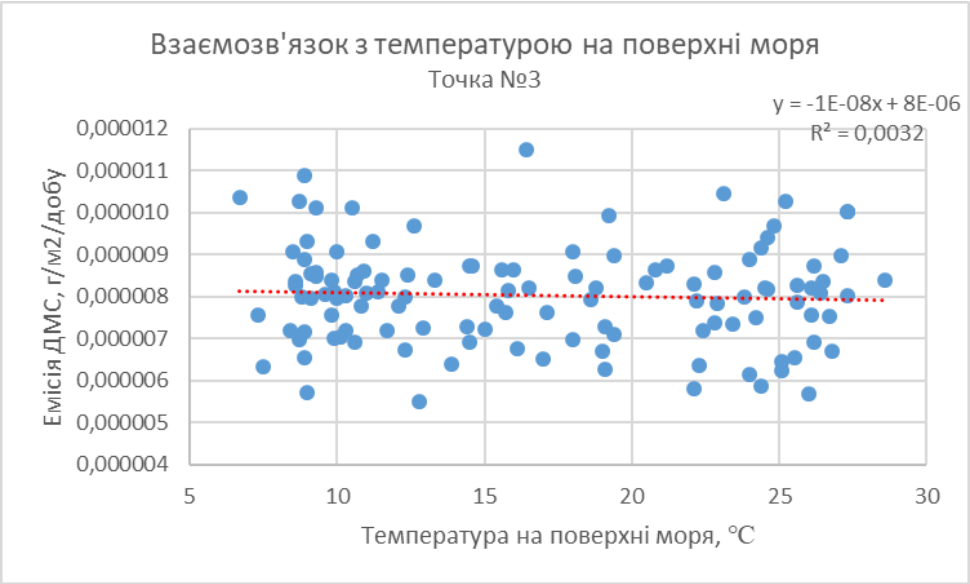
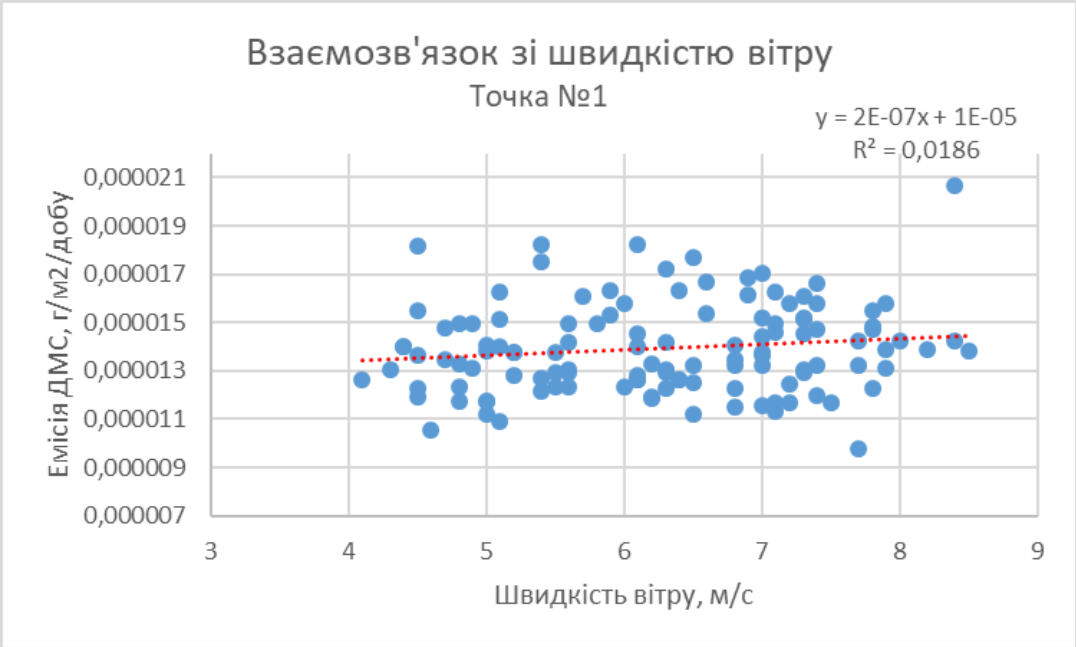
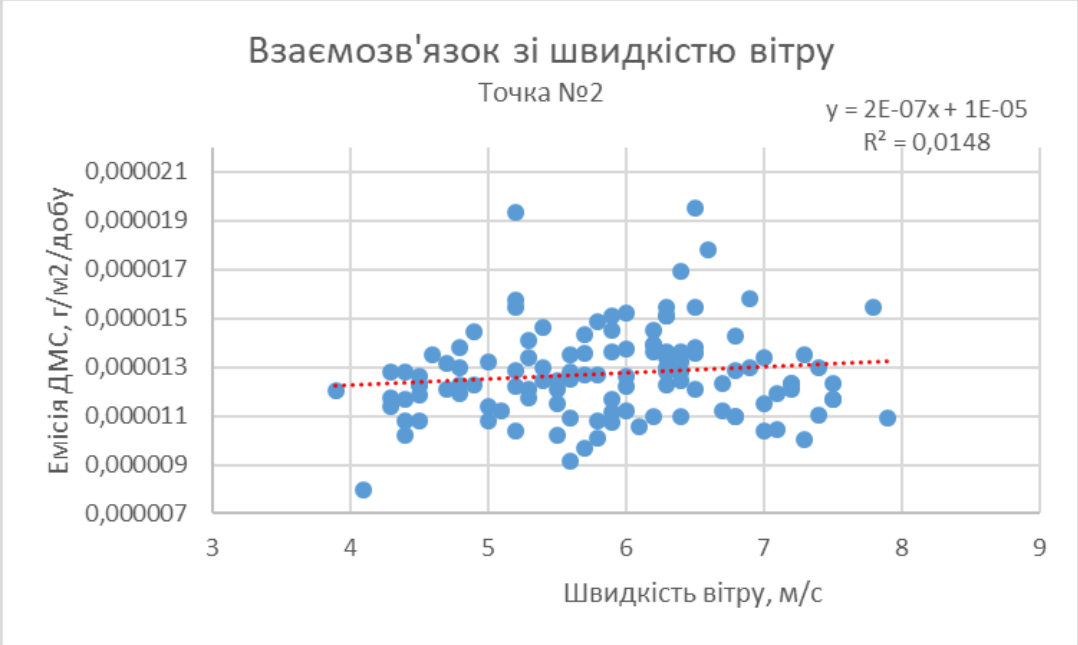


Рис. 3.4. Взаємозв’язок емісії диметилсульфіду з температурою поверхні моря: а) точка №1; б) точка №2; в) точка №3

У жодній з трьох точок не було виявлено значимого лінійного зв’язку між температурою води та викидами ДМС. В усіх випадках коефіцієнти детермінації менше 1%, що означає, що температура пояснює дуже невелику частину змін у викидах цієї сполуки. Таким чином, можна зробити висновок, що температура не є основним фактором, що впливає на виділення ДМС у досліджених областях.

Також у жодній із трьох точок не було виявлено статистично значущого зв’язку між швидкістю вітру та емісією ДМС (рис. 3.5). Усі значення коефіцієнта детермінації були менші за 0,02, тобто пояснювали менше 2% варіацій емісії. Це вказує на відсутність лінійної кореляції між цими параметрами.


Взаємозв'язок зі швидкістю вітру
Точка №1
y = 2E-07x + 1E-05
R² = 0,0186
Емісія ДМС, г/м2/добу
0,000021
0,000019
0,000017
0,000015
0,000013
0,000011
0,000009
0,000007
3
4
5
6
7
8
9
Швидкість вітру, м/с


Взаємозв'язок зі швидкістю вітру
Точка №2
y = 2E-07x + 1E-05
R² = 0,0148
Емісія ДМС, г/м2/добу
0,000021
0,000019
0,000017
0,000015
0,000013
0,000011
0,000009
0,000007
3
4
5
6
7
8
9
Швидкість вітру, м/с

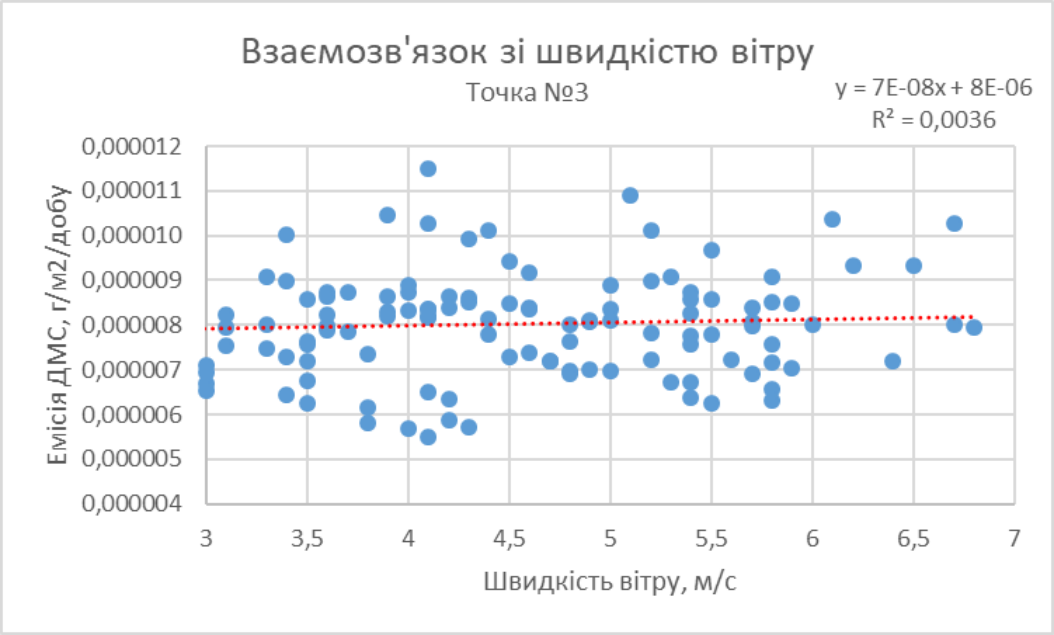


Рис. 3.5. Взаємозв’язок емісії диметилсульфіду зі швидкістю вітру:
а) точка №1; б) точка №2; в) точка №3

З точки зору фізики очікувалося, що швидкість вітру може мати певний вплив на інтенсивність емісії ДМС за рахунок:

- збільшення турбулентності на межі вода-повітря;
- активізації газообміну;
- механічного розпилу поверхневого шару.

Проте результати показали, що навіть за наявності цих механізмів, швидкість вітру не є достатнім або вирішальним фактором емісії, принаймні, в умовах спостережень у вибраних точках.

Низька кореляція емісії ДМС як з температурою, так і зі швидкістю вітру може бути обумовлена низкою факторів.

Біологічна природа походження ДМС. Диметилсульфід утворюється в результаті метаболізму фітопланктону та розкладання органічних речовин. Основні процеси його продукування залежать від рівня біологічної активності у воді, зокрема, від видового складу та кількості фітопланктону, а також від процесів фотосинтезу.

Мультифакторний характер процесів. На виділення ДМС впливають не тільки температура та вітер, але й інші важливі фактори, як-от: інсоляція (рівень сонячного опромінення), солоність, вміст поживних речовин, глибина змішаного шару, біологічна різноманітність, наявність бактерій-споживачів ДМС та інше.

Обмеженість у просторі та часі. Дослідження охоплює лише три точки, ймовірно, в межах однієї акваторії або сезону. Це може не відображати загальні закономірності, властиві іншим регіонам або іншим кліматичним умовам.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Загальний огляд просторово-часових тенденцій емісії диметилсульфіду у Чорному морі вказує на виразну сезонну мінливість та неоднорідний просторовий розподіл цього явища. Найбільш значні щорічні викиди фіксуються у західному секторі моря, що пояснюється взаємодією біогеохімічних, гідрологічних та кліматичних факторів, наприклад, підвищеною продуктивністю вод і впливом річок.

Влітку область активної емісії помітно розширюється, поширюючись на центральні та південні частини акваторії, тоді як взимку викиди значно зменшуються і стають більш локалізованими. Разом з тим, у трьох досліджуваних точках не було виявлено значущого взаємозв'язку між емісією ДМС та головними метеорологічними характеристиками – температурою поверхні води та швидкістю вітру, що вказує на їхній другорядний вплив у порівнянні з біологічними процесами. Ключовим чинником емісії, вірогідно, є біологічна активність, зокрема фітопланктонні процеси, фотосинтез та розклад органічних речовин.

Отже, емісія ДМС у Чорному морі характеризується багатофакторністю, з домінуючим впливом сезонних біологічних процесів на тлі стійкого просторового центру активності у західній частині акваторії.

ВИСНОВКИ

У роботі було встановлено просторово-часові закономірності емісії диметилсульфіду з поверхні Чорного моря залежно від метеорологічних умов, а саме швидкості вітру та температури поверхні моря.

Відповідно до мети було виконано низку завдань:

1. Досліджено проблематику оцінки емісії ДМС та його ролі в атмосфері.

На теперішній час дослідження диметилсульфіду (ДМС) перебувають у стані фрагментарності через відсутність системного підходу. Щоб мати повну картину, потрібно одночасно аналізувати кліматичні показники, океанографічні процеси і біологічні дані, такі як продуктивність фітопланктону, видовий склад та мікробіологічна активність. Більшість наявних досліджень зосереджені на загальному балансі емісії ДМС, спираючись переважно на дані супутників або математичне моделювання. Регіональні особливості цього процесу вивчені набагато менше. Особливо гостро відчувається брак досліджень у Чорноморському басейні. Емісія ДМС в цьому регіоні майже не досліджена, хоча екологічна система тут дуже чутлива, а циркуляція води – складна.

У зв'язку з цим, застосування штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, виглядає надзвичайно перспективним. Моделі, побудовані на основі ШІ, можуть враховувати складні нелінійні взаємодії між біологічними, фізико-хімічними та метеорологічними параметрами. Це дозволяє створити прогнозні системи нового покоління, які не обмежуються лінійними зв'язками. Вони здатні виявляти приховані залежності та адаптуватися до змін у часі та просторі. Подальша розробка регіональних баз даних, з включенням біотичних та гідрофізичних індикаторів, разом з алгоритмами глибинного навчання, відкриває нові можливості для точної оцінки емісії ДМС та її впливу на атмосферу і клімат.

2. Встановлено просторово-часову варіативність ДМС в районі Чорного моря

На прикладі Чорного моря виявлено, що емісія ДМС має чітко виражену сезонну динаміку з найбільшими значеннями в літній період, коли активізуються біологічні процеси — зокрема, фітопланктонне цвітіння, фотосинтез та розпад органічної речовини. Просторовий аналіз засвідчив, що основна зона активної емісії постійно зберігається в західній частині моря, що, ймовірно, пов'язано з впливом річкового стоку (зокрема Дунаю), підвищеною продуктивністю вод та особливостями циркуляції. У літній період ця зона розширюється на центральні та південні ділянки акваторії, тоді як узимку зменшується як за інтенсивністю, так і за площею.

3. Досліджено залежність потоків ДМС від ключових метеорологічних параметрів.

Аналіз трьох окремих точок в межах акваторії підтвердив сезонність емісії, однак при цьому не було виявлено статистично значущого взаємозв’язку між емісією ДМС та основними метеорологічними змінними — температурою поверхні води та швидкістю вітру. Низькі значення коефіцієнтів детермінації (<1 – 2%) вказують на відсутність лінійної залежності між цими величинами, що дозволяє зробити висновок про другорядну роль метеофакторів у регулюванні емісії в умовах досліджуваного регіону. Така слабка кореляція може бути зумовлена біологічною природою походження ДМС, мультифакторністю процесів газообміну, а також специфікою локальних умов.

Диметилсульфід виникає внаслідок метаболізму фітопланктону та розкладання органічних матеріалів. Основні механізми його формування залежать від інтенсивності біологічних процесів у воді, зокрема, від видового складу та щільності фітопланктону, а також від активності фотосинтезу.

Також важливо зазначити, що на виділення ДМС впливають не тільки температура та вітер, але й інші значущі фактори, такі як: сонячна радіація, солоність, вміст поживних речовин, глибина перемішаного шару, біорізноманіття, присутність бактерій, що споживають ДМС та інше.

Ці фактори можуть пояснювати низький зв’язок між емісією ДМС та температурою поверхні моря й швидкості вітру, які досліджувались у даній роботі.

Узагальнюючи результати дослідження, можна стверджувати, що емісія диметилсульфіду є складним багатоетапним процесом, що формується під впливом біогеохімічних, гідрофізичних та, меншою мірою, метеорологічних чинників. Сезонна біологічна активність фітопланктону є основним регулятором інтенсивності викидів, тоді як просторовий розподіл визначається особливостями гідрологічної будови моря. Подальші дослідження повинні враховувати міждисциплінарний підхід з використанням супутникових даних, in situ-спостережень і високоточної атмосферної параметризації для глибшого розуміння ролі ДМС у регіональних і глобальних кліматичних процесах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abbatt, J. P. D. et al. Overview paper. New insights into aerosol and climate in the Arctic. Atmos. Chem. Phys. 2019. Vol. 19. P. 2527–2560. https://doi.org/10.5194/acp-19-2527-2019.
2. Ah-Hyun K., Yum S., Lee H. et al. Polar Cooling Effect. Atmosphere. 2018. DOI: 10.3390/atmos9100384
3. Andreae, M. O. and Barnard, W. R. The marine chemistry of dimethylsulfide. Mar. Chem. 1984. Vol. 14. P. 267–279. https://doi.org/10.1016/0304-4203(84)90047-1.
4. Bates, T. S., Charlson, R. J., and Gammon, R. H. Evidence for the climatic role of marine biogenic sulphur. Nature. 1987. Vol. 329, P. 319–321. https://doi.org/10.1038/329319a0.
5. Bhatti Y., Revell L., Schuddeboom A. et al. The sensitivity of Southern Ocean atmospheric dimethyl sulfide to modelled sources and emissions. 2023. DOI: 10.5194/egusphere-2023-868
6. Bopp, L., Aumont, O., Belviso, S. Potential impact of climate change on marine dimethyl sulfide emissions. Tellus B. 2003. Vol. 55. P. 11–22.
7. Carslaw, K. S. et al. Large contribution of natural aerosols to uncertainty in indirect forcing. Nature. 2013. Vol. 503. P. 67–71. https://doi.org/10.1038/nature12674.
8. Choi, Yu-Na & Lee, Sang & Moon, Jae-Hong. Estimation of marine dimethyl sulfide emissions from East Asian seas and their impact on natural direct radiative forcing. Atmospheric Environment. 2019. Vol. 222. DOI: 117165.10.1016/j.atmosenv.2019.117165.
9. Clarke, A. D., et al. Particle nucleation in the tropical boundary layer and its coupling to marine sulfur sources. Science. 1998. Vol. 282. P. 89–92.
10. Edtbauer A., Stönner C., Pfannerstill E. et al. A new marine biogenic emission. Atmospheric Chemistry and Physics. 2020. DOI: 10.5194/acp-20-6081-2020.

11. Erickson III D. J., Ghan S. J., Penner J. E. Global ocean-to-atmosphere dimethyl sulfide flux. Journal of Geophysical Research. 1990. DOI: 10.1029/JD095iD06p07543.
12. Galí, M., Levasseur, M., Devred, E., Simó, R., and Babin, M. Sea-surface dimethylsulfide (DMS) concentration from satellite data at global and regional scales. Biogeosciences. 2018. Vol. 15. P. 3497–3519. https://doi.org/10.5194/bg-15-3497-2018.
13. Hayashida H., Steiner N., Monahan A. et al. Implications of sea-ice biogeochemistry. Biogeosciences. 2017. DOI: 10.5194/bg-14-3129-2017.
14. Hulswar S., Simó R., Galí M. et al. Third revision of the global surface seawater dimethyl sulfide climatology (DMS-Rev3). Earth System Science Data, 2022. DOI: 10.5194/essd-14-2963-2022.
15. Jin-Wei Wu, Feng Xu, Shi-Bo Yan, Gao-Bin Xu. Effect of anticyclonic eddies on the production and emission of marine dimethylsulfide in the northern South China Sea. Global and Planetary Change. 2025. P. 252. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2025.104883.
16. Joge S., Mahajan A., Hulswar S. et al. Dimethyl sulfide (DMS) climatologies, fluxes, and trends. Biogeosciences. 2024. DOI: 10.5194/bg-21-4439-2024.
17. Kettle, A. J. et al. A global database of sea surface dimethylsulfide (DMS) measurements and a procedure to predict sea surface DMS as a function of latitude, longitude, and month. Global Biogeochem. Cy. 1999. Vol. 13. P. 399–444. https://doi.org/10.1029/1999GB900004.
18. Kurosaki Y., Matoba S., Iizuka Y., Fujita K., Shimada R. Increased oceanic dimethyl sulfide emissions in areas of sea ice retreat inferred from a Greenland ice core. Communications Earth & Environment. 2022. Vol. 3. 327. DOI: 10.1038/s43247-022-00661-w.
19. Lana A., et al. An updated climatology of surface dimethlysulfide concentrations. Global Biogeochemical Cycles. 2011. DOI: 10.1029/2010GB003850.

20. Lennartz S., Krysztofiak Tong G., Marandino C. et al. Modelling marine emissions and atmospheric distributions of halocarbons. Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. DOI: 10.5194/acp-15-11753-2015.
21. Nightingale, P. D., Malin, G., Law, C. S., Watson, A. J., et al. In situ evaluation of air-sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers. Global Biogeochem. Cy. 2000. Vol. 14. P. 373–387.
22. Novak, G. A., Kilgour, D. B., Jernigan, C. M., Vermeuel, M. P., and Bertram, T. H. Oceanic emissions of dimethyl sulfide and methanethiol and their contribution to sulfur dioxide production in the marine atmosphere. Atmos. Chem. Phys. 2022. Vol. 22. P. 6309–6325. https://doi.org/10.5194/acp-22-6309-2022.
23. Pino-Cortés E., Campos K., Taboada F. et al. New processing methodology to incorporate marine halocarbons and dimethyl sulfide (DMS) emissions. Atmospheric Chemistry and Physics. 2023. DOI: 10.1007/s11869-022-01301-0.
24. Shelley R. U., Baker A. R., Thomas M. et al. Aerosol trace element solubility. EGUsphere. 2024. DOI: 10.5194/egusphere-2024-2667.
25. Shenoy D. M., Joseph S., Kumar M. D., George M. D. Control and interannual variability of dimethyl sulfide. Journal of Geophysical Research. 2002. DOI: 10.1029/2001JD000371.
26. Simó, R. and Pedrós-Alió, C. Short-term variability in the open ocean cycle of dimethylsulfide. Global Biogeochem. Cy. 1999. Vol. 13. P. 1173–1181.
27. Simó, R., and J. Dachs. Global ocean emission of dimethylsulfide predicted from biogeophysical data. Global Biogeochem. Cycles. 2002. Vol. 16(4). P. 1078. DOI:10.1029/2001GB001829.
28. Twomey, S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. J. Atmos. Sci. U.S. Environmental Protection Agency. 1997. Vol. 34:1149–52. DOI:10.1175/1520-0469(1977)034.
29. Vettikkat L., Sinha V., Datta S., Kumar A., Hakkim H., Yadav P., Sinha B. Significant emissions of dimethyl sulfide and monoterpenes by big-leaf mahogany trees.

Atmospheric Chemistry and Physics. 2020. Vol. 20. P. 375-389. DOI: 10.5194/acp-20-375-2020.

30. Vogt, M., Vallina, S. M., Buitenhuis, E. T., Bopp, L., and Le Quéré, C. Simulating dimethylsulphide seasonality with the Dynamic Green Ocean Model PlankTOM5. J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. https://doi.org/10.1029/2009JC005529.
31. Wang, S., Elliott, S., Maltrud, M., and Cameron-Smith, P. Influence of explicit Phaeocystis parameterizations on the global distribution of marine dimethyl sulfide. J. Geophys. Res.-Biogeo. 2015. Vol. 120. P. 2158–2177.
32. Wang, W.-L., Song, G., Primeau, F., Saltzman, E. S., Bell, T. G., and Moore, J. K. Global ocean dimethyl sulfide climatology estimated from observations and an artificial neural network. Biogeosciences. 2020. Vol. 17. P. 5335–5354. https://doi.org/10.5194/bg-17-5335-2020.
33. Yan S., Xu G.-B., Zhang H.-H. et al. Factors Controlling DMS Emission. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2024. DOI: 10.1029/2024JC020886.
34. Yang, G., Song, Y., Zhang, H., Li, C., and Wu, G.: Seasonal variation and biogeochemical cycling of dimethylsulfide (DMS) and dimethylsulfoniopropionate (DMSP) in the Yellow Sea and Bohai Sea, J. Geophys. Res.-Oceans, 2014. Vol. 119. P. 8897–8915. https://doi.org/10.1002/2014JC010373.
35. Zhang Y., Gao M., Sun X. et al. The Isotopic Characteristics, Sources, and Formation Pathways. Sustainability. 2024. DOI: 10.3390/su16208733.
36. Zhou S., Chen Y., Huang S. et al. A 20-year global sea surface dimethyl sulfide dataset. Earth System Science Data. 2024. DOI: 10.5194/essd-16-4267-2024.