

# **ГЕОГРАФІЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЛОБАЛЬНОГО ГІДРОЛОГІЧНОГО ЦИКЛУ**

DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.1.8>

УДК: 551.510.42

**Крайник С.В.<sup>1,2</sup>, Савенець М.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка

<sup>2</sup> Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України

## **ЗМІНА АЕРОЗОЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ В АТМОСФЕРІ ВНАСЛІДОК НАДХОДЖЕННЯ ПИЛУ З ОСУШЕНИХ ДІЛЯНОК КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА**

*У статті представлено закономірності зміни аерозольних параметрів в атмосферному повітрі внаслідок надходження пилу з осушених ділянок Каховського водосховища та підтверджено формування нового джерела аерозольного забруднення. Дослідження проведено із використанням даних аерозольної оптичної товщі (АОТ), експоненти Ангстрема й масової частки аерозолі супутникового приладу Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) супутника Terra за підтримки знімками підстильної поверхні супутника LandSat. Встановлено зростання АОТ над водосховищем, що призвело до менш інтенсивної зміни (-15%) показників восени порівняно із регіональним фоновим зменшенням на 50%. Виявлено зростання масової частки аерозолі над осушеними ділянками Каховського водосховища щонайменше вдвічі. Ідентифіковано зміни експоненти Ангстрема, що свідчить про перерозподіл переважаючого розміру аерозольних часток у атмосферному повітрі. Наголошено на необхідності подальшого моніторингу емісії пилу в атмосферу та модифікації інвентаризації викидів від природних джерел для цілей моделювання атмосферних процесів.*

**Ключові слова:** аерозоль, оптична товща, експонента Ангстрема, супутникове зондування, MODIS

**Вступ.** Одним із найжахливіших наслідків російського вторгнення на територію України для природних екосистем став підрив дамби Каховської гідроелектростанції (ГЕС) у ніч на 6 червня 2023 р. Внаслідок підриву було затоплено значні площі нижче за течією р. Дніпро, знищено природні екосистеми, сільськогосподарські угіддя, зазнали втрат біорізноманіття регіону, стає загрозливою ситуація із безпекою става-охолоджувача Запорізької АЕС, і проблеми з доступом місцевого населення до питної води [1,12].

Поряд із найбільш масштабними наслідками підриву дамби Каховської ГЕС, які зараз активно досліджуються та оцінюються, існують й інші менш очевидні малодосліджені зміни локального характеру, що потенційно можуть справляти довготривалі негативні ефекти. Такими локальними змінами є надходження пилу із осушених ділянок Каховського водосховища у атмосферне повітря. Незважаючи на локальність прояву цього процесу, додаткове джерело аерозолі може характеризуватися постійним активним надходженням, спричиняючи погіршення якості атмосферного повітря на регіональному та локальному рівні із усіма побічними негативними ефектами. Серед таких ефектів, у першу чергу, варто відзначити негативний вплив пилу на здоров'я населення [9], формування пилових бурь [3], осадження надлишкової маси аерозольних часток на рослинний покрив та ґрунт [17], інтенсифікацію прямих і непрямих аерозольних ефектів в регіоні з усіма потенційними наслідками впливу на метеорологічні процеси [14]; а також появу нового неврахованого джерела викидів, що зумовить невизначеності у інвентаризаціях [11] і, як наслідок, точності чисельного моделювання перенесення забруднюючих речовин, та багато інших.

Встановлення особливостей надходження пилу з території Каховського водосховища технічно є досить складним завданням. Очевидно, що станції наземного моніторингу поблизу відсутні; найближчі ж розташовані у великих промислових містах, де виокремити наслідки надходження пилу зовні вкрай важко від того забруднення, що формується у таких містах від викидів промисловості та автотранспорту. Експедиційні дослідження наразі не можуть відбутися через близькість до окупованих територій і

ISSN:2306-5680 Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2024. № 1 (71)

постійні обстріли, та й загалом не є пріоритетними у порівнянні із першочерговими завданнями з оцінки наслідків підриву дамби. Уточнення інвентаризацій викидів пилу й чисельне моделювання потребує попередніх кількісних оцінок, які наразі взагалі відсутні. За таких умов, супутникові дані залишаються єдиним джерелом інформації про зміни вмісту аерозолі над територією Каховського водосховища.

Супутниковий моніторинг відіграє провідну роль у встановленні особливостей забруднення атмосферного повітря віддалених районів, у тому числі і надходження пилу з пустельних територій [6]. Найбільш вживаними для цілей моніторингу пустельного пилу стали супутники, оснащені приладами The Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) [4,15], Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [5,8], Spinning Enhanced Visible and Infrared instrument (SEVIRI) [7,16], та Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) [2,18]. З урахуванням можливостей цих сенсорів по визначенню аерозольних параметрів, їх використання для осушеної території Каховського водосховища потенційно дозволить виявити факт появи додаткового джерела аерозольного забруднення.

Тому, **метою даної статті** є встановлення закономірностей зміни аерозольних параметрів в атмосферному повітрі на основі даних супутникового зондування як індикатора зміни інтенсивності надходження пилу з осушених ділянок Каховського водосховища.

**Матеріали та методи дослідження.** У дослідженнях використано супутникові знімки LandSat, для проведення якісного аналізу зміни підстильної поверхні, та дані супутникового приладу Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) супутника Terra EOS AM-1, для кількісної оцінки аерозольних параметрів в атмосферному повітрі. Загальний період досліджень складає 182 доби та охоплює з 2 травня по 31 жовтня 2023 року. Такий період дозволяє встановити типові характеристики локального та регіонального аерозольного забруднення атмосфери до підриву дамби Каховського водосховища, а також виявити типові зміни аерозольних параметрів за різного стану підстильної поверхні в процесі осушення та покриття окремих ділянок рослинним покривом. З метою встановлення особливостей зміни аерозольних параметрів загальний період досліджень був для зручності поділений на 6 частин: (1) до підриву дамби Каховської ГЕС – з 2 травня по 5 червня 2023 р., відносно якого проводилася оцінка змін; (2) з 6 червня до 30 червня 2023 р.; (3) липень 2023 р.; (4) серпень 2023 р.; (5) вересень 2023 р.; (6) жовтень 2023 р.

Супутникові знімки LandSat отримано із використанням платформи Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>) шляхом реалізації виконання скриптів на мові програмування Javascript з метою комбінування зображень за різні періоди часу задля візуалізації стану підстильної поверхні над територією Каховського водосховища. Використано супутниковий продукт USGS Landsat 9 другого рівня обробки (Level 2) з набору 2 (Collection 2, Tier 1).

Для аналізу аерозольних параметрів обрано супутниковий прилад MODIS та його продукти другого рівня (Level 2) з просторовою роздільною здатністю 1 км [13], завантажених із системи NASA's Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS) (<https://search.earthdata.nasa.gov/search/>). Дослідження проведені для трьох аерозольних параметрів: скоригованої аерозольної оптичної товщі (AOT), експоненти Ангстрема, та масової частки аерозолі у стовпі атмосфери.

AOT є ключовим параметром, який отримується за даними супутникових спостережень аерозолі. Усі інші показники обчислюються на його основі. AOT є безрозмірним показником, який опосередковане вказує на інтенсивність послаблення сонячного випромінювання аерозольними частинками при його проходженні через атмосферу. Фактично, супутниковий прилад вимірює не аерозоль, а інтенсивність ( $I_{\text{вимір}}$ ) послабленого в атмосфері потоку сонячного випромінювання на визначеній довжині хвилі ( $\lambda$ ), що надійшов на сенсор від Землі:

$$I_{\text{вимір}}(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\tau(\lambda) \cdot m} \quad (1)$$

де  $I_0$  – інтенсивність потоку сонячного випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$  на верхній межі атмосфери;  $m$  – оптична довжина шляху, яка обернено пропорційна косинусу

зенітного кута сонця,  $\tau(\lambda)$  – загальна оптична товща. Формула (1) є загальновідомим законом Бугера – Ламберта – Бера.

Із формули (1) ми чітко бачимо, що інтенсивність потоку сонячного випромінювання після проходження через атмосферу залежить від загальної оптичної товщі  $\tau(\lambda)$ , яка нас і цікавить для отримання АОТ. Виразити  $\tau(\lambda)$  можливо у логарифмічній формі як:

$$\tau(\lambda) = \frac{1}{m} \cdot \ln \frac{I_0(\lambda)}{I_{\text{вимір}}(\lambda)} \quad (2)$$

Можна було б вважати формулу (2) кінцевою, якби послаблення сонячного випромінювання в атмосфері відбувалося лише за рахунок аерозольних частинок. Проте, на послаблення впливають також водяна пара, озон, інші газові складові (діоксид азоту, метан, діоксид вуглецю, та ін.), а також відбувається Релеєвське розсіювання на молекулах в атмосферному повітрі. Тому, для знаходження частки АОТ у загальній  $\tau(\lambda)$ , потрібно виділити вплив інших компонент, зокрема Релеєвської оптичної товщі  $\tau_R(\lambda)$ , оптичної товщі, яка відображає поглинання водяною парою ( $\tau_{H_2O}(\lambda)$ ), озоном  $\tau_{O_3}(\lambda)$ , та іншими газовими складовими ( $\tau_{\text{інш}}(\lambda)$ ):

$$\tau_{\text{АОТ}}(\lambda) = \tau(\lambda) - \tau_R(\lambda) - \tau_{H_2O}(\lambda) - \tau_{O_3}(\lambda) - \tau_{\text{інш}}(\lambda) \quad (3)$$

де  $\tau_{\text{АОТ}}(\lambda)$  – аерозольна оптична товща для довжини хвилі  $\lambda$ .

Як бачимо із формул 1-3, чим більша АОТ, тим інтенсивніше послаблюється сонячне випромінювання в атмосфері. Таким чином, АОТ опосередковано є характеристикою вмісту аерозолу в атмосферному повітрі.

Усі інші параметри за даними супутникових спостережень, що тим чи іншим чином характеризують аерозолі в атмосфері, обчислюються на основі АОТ. Серед таких параметрів є експонента Ангстрема, яка опосередковано вказує на переважаючий розмір аерозольних часток над територією [10]. Експонента Ангстрема ( $\alpha$ ) є похідною АОТ ( $\tau_{\text{АОТ}}$ ) з логарифмом довжини хвилі, яка може бути розрахована за формулою (4) на основі кількох довжин хвиль ( $\lambda$ ):

$$\alpha = - \frac{d \ln \tau_{\text{АОТ}}}{d \ln \lambda} \quad (4)$$

Чим вище значення експоненти Ангстрема, тим дрібніші аерозольні частки у повітрі. Цей показник також є безрозмірним з типовим діапазоном розкиду значень експоненти Ангстрема від 0 до 2.

Обраний для дослідження третій показник – масова частка аерозолу у стовпі атмосфери – вже є похідним продуктом аналізу даних у центрах прийняття супутникової інформації, і часто він не надається у вихідних супутникових файлах. У випадку MODIS масова частка аерозолу входить до переліку доступних супутникових продуктів. Через неможливість точного визначення висоти розташування аерозолу при супутниковому зондуванні, масова частка аерозолу приводиться до одиничної поверхні (площею  $\text{см}^2$ ) атмосферного стовпа, тому одиницями вимірювання вмісту аерозолу є  $10^{-6} \text{ г/см}^2$ .

Супутникові дані MODIS завантажуються у форматах HDF4, а загальна кількість пікселів для обробки щоденно складає кілька мільйонів значень. Тому, обробка та обчислення проведені у дослідженнях були повністю автоматизовані із використанням мови програмування Python та реалізацією ряду batch-скриптів. Переформатування проходило у два етапи: (1) із використанням бібліотеки GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) здійснено експорт необхідних наборів даних із наявних у файлах; (2) із використанням бібліотеки numpy у Python проведено обчислення на даних з експортованих масивів.

Додатковою проблемою для проведення розрахунків є відмінність щоденного покриття території супутником Terra, тому пікселі по різному «вкладаються» на одну й ту ж територію. Це перешкоджає їх правильному кількісному порівнянню, і, як наслідок, постає проблема перерахунку даних у регулярну сітку координат. Просторова роздільна здатність MODIS для продуктів аерозольного вмісту складає 1 км. Для проведення обчислень дані перераховані (осереднення пікселів у заданих просторових межах) у

регулярну сітку координат із кроком  $0.2^{\circ}$  за широтою та довготою для області, що покриває територію від  $32.52^{\circ}$  сх.д. до  $35.72^{\circ}$  сх.д. та від  $46.34^{\circ}$  пн.ш. до  $47.94^{\circ}$  пн.ш. Прямокутну область обрано таким чином, щоб охопити територію колишнього Каховського водосховища як основної для досліджень, територію Олешківських пісків як еталонної ділянки постійної емісії аерозолів, та частину території півдня України з метою порівняння змін аерозольних параметрів. Область досліджень із вузлами заданої регулярної сітки координат представлено на рис. 1.

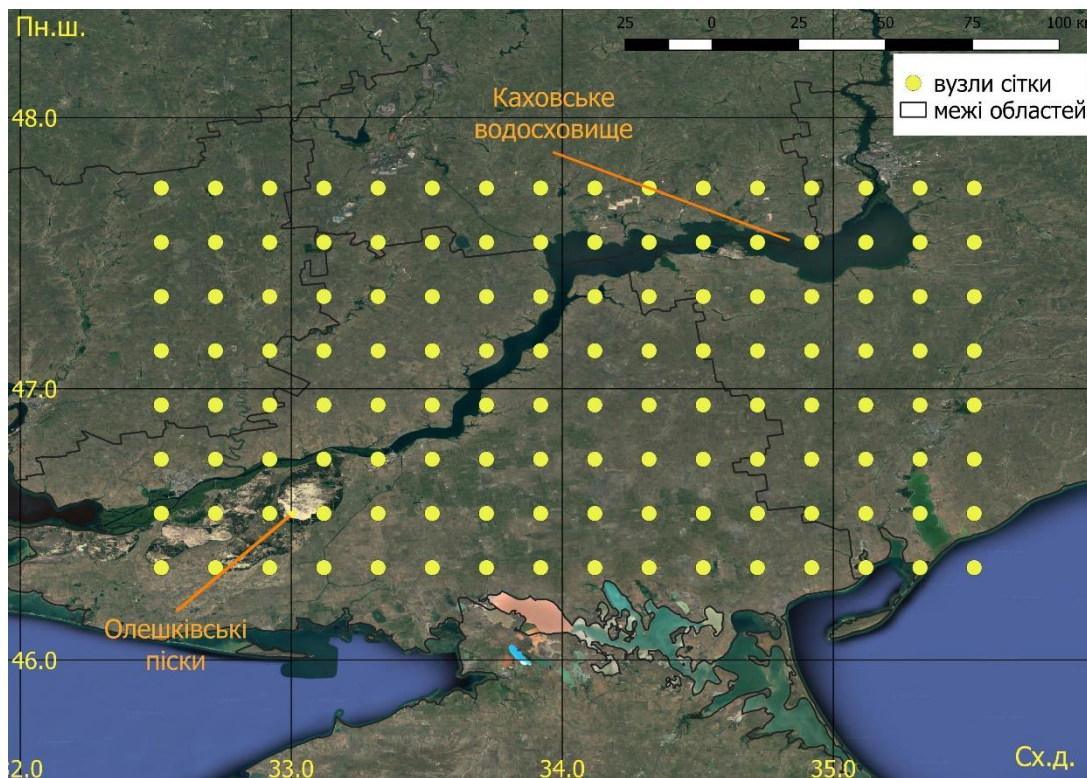


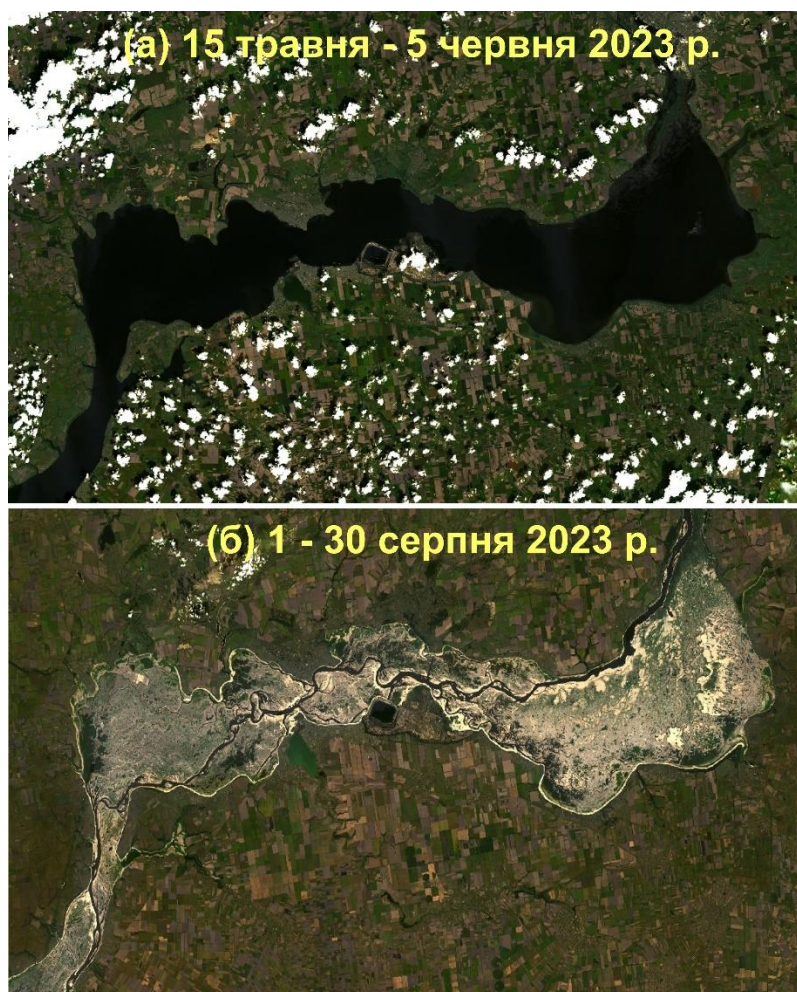
Рис.1. Досліджувана територія із вузлами заданої регулярної сітки

**Виклад основного матеріалу.** Каховське водосховище займало площу  $2155 \text{ км}^2$ , після осушення якого більша частина території стала покритою мулом, піском та рослинністю (рис. 2). Загалом, найбільші за площею піщані ділянки спостерігаються у східній частині водосховища та вздовж русла р. Дніпро. Саме ці ділянки потенційно набувають особливостей нового джерела аерозольного забруднення, що можуть впливати на якість атмосферного повітря прилеглих міст. У західній частині осушеного водосховища спостерігаємо меншу площу чітко виражених піщаних територій і більшу кількість мулистих ділянок. Проте, за умов бездощової погоди такі території також можуть ставати осередками підняття аерозолу вітром. Станом на серпень 2023 р. (рис. 2б) у західній, південно-східній та північній частинах водосховища вже чітко простежувалися ділянки із рослинністю, що, звичайно, може стати ключовим фактором стримування вітрового підняття пилу з поверхні. Таким чином, осушена територія Каховського водосховища наразі складається із численних піщаних ділянок, емісія аерозолу з якого потенційно може формувати єдиний шлейф забрудненого повітря, що переноситиметься за напрямком вітру.

Дослідження аерозольних параметрів за даними супутникового зондування на таких відносно короткострокових часових масштабах характеризується деякими складнощами. У першу чергу, територія досліджень перебуває під впливом численних антропогенних джерел викидів, у тому числі від Запоріжжя, Кривого Рогу, Нікополя, Марганця, Енергодара; а також від кількох значних природних джерел, зокрема Олешківських пісків й піщаних територій півдня Херсонської області навколо Сивашу. Кожне з цих джерел впливає на кількість аерозолу над досліджуваним районом і у конкретний момент часу



атмосферне перенесення від цих джерел може на порядок переважати вплив локальної емісії над осушеними ділянками Каховського водосховища. По-друге, вміст та поведінка аерозолі в атмосферному повітрі визначається метеорологічними умовами у конкретний момент часу. Наприклад, дощ здатен вимивати аерозоль із атмосфери через процеси вологого осадження, і у такому разі часто стає неможливим виявлення наслідку емісії аерозолі з джерел викидів. Зазвичай, при збільшенні тривалості досліджуваного періоду ці фактори нівелюються і забруднення атмосферного повітря над джерелами викидів набувають чітких обрисів. На часових масштабах у кілька десятків років під час кліматичного аналізу короткострокові різноспрямовані впливи стають незначущими. Проте, досліджуваний період близько півроку є занадто коротким, а тому усі згадані фактори вносять суттєві похибки у статистичні параметри. Тому, для чіткого відокремлення наслідків осушення Каховського водосховища, у кожній точці зміни оцінювалися відносно періоду до підризу дамби, а аналіз отриманих відносних показників у часі здійснено порівнюючи між собою зміни сусідніх районів. Тільки за таких умов стало можливим окреслити наслідки осушення Каховського водосховища для аерозольного забруднення території.



**Рис.2** Супутникові знімки Landsat території Каховського водосховища, скомбіновані за безхмарні дні за період до підризу дамби 15.05.-05.06.2023 р. (а) та за період 01.08-30.08.2023 р. (б)

Загалом для досліджуваної території АОТ варіює в межах від 0.05 до 0.45, з вищими значеннями у червні – липні та нижчими у вересні – жовтні, що відображає сезонну зміну показника. До підризу дамби середній АОТ над водосховищем складав від 0.13 до 0.18, проте у випадку перенесення забруднення із прилеглих міст міг перевищувати 0.3. Над Олешківськими пісками середній АОТ складав 0.23.

Після підриву дамби у перші два тижні зміни АОТ, які б сигналізували про посилення емісії аерозолі, не спостерігалися. У липні, залежно від території, АОТ змінився в межах  $\pm 15\%$  від значень періоду до підриву дамби (рис. 3). При цьому зростання АОТ було характерним для районів вздовж русла р. Дніпро і на північ від водосховища, тоді як у відносно чистих районах АОТ почав зменшуватися. Проте, надійно пов'язати зростання АОТ у липні над водосховищем як причину осушення не виявляється можливим через подібність такої динаміки аерозолі над значними площами.

Вперше, окреслення нових осередків емісії аерозолі стало проявлятися у серпні 2023 р. (рис. 3). У той час як спостерігалось регіональне зменшення АОТ в середньому на 20-50%, над осушеними ділянками Каховського водосховища АОТ продовжував зростати до 10% відносно періоду до підриву дамби. Два чітких осередки окреслилися над західною та східною частинами водосховища, при цьому з більшою емісією аерозолі саме у східній частині. Для порівняння, над Олешківськими пісками теж окреслився осередок менш інтенсивного зменшення АОТ (-15% у порівнянні із -50% сусідніх територій). Таким чином, саме у серпні 2023 р. локальна емісія аерозолі над Каховським водосховищем перевищила показники Олешківських пісків.

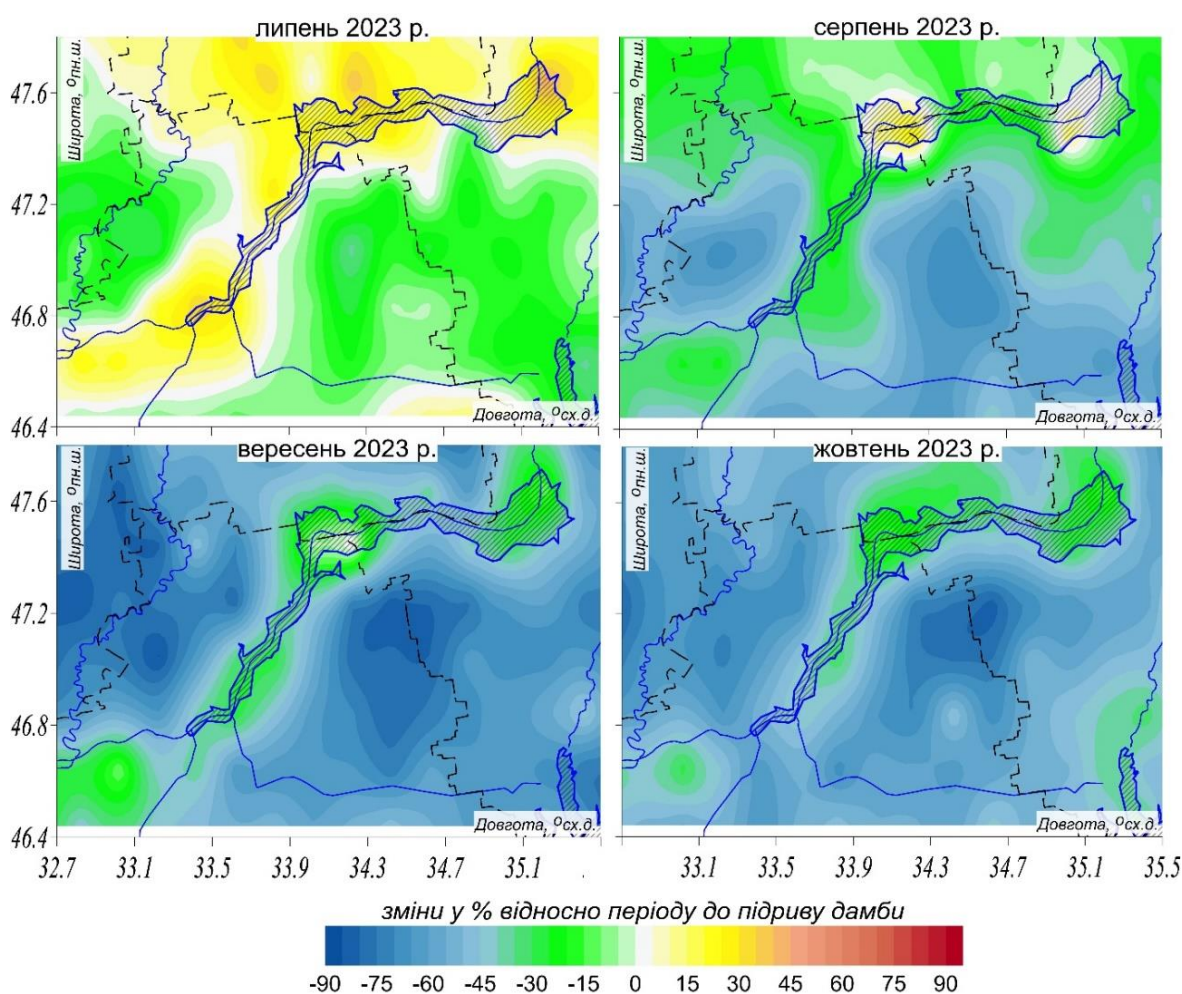


Рис.3 Зміна АОТ (у % від періоду до підриву дамби) над досліджуваною територією

Восени АОТ продовжував зменшуватися відносно періоду з травня – початку червня. У окремих районах, ступінь зменшення АОТ досягав -80%. На відміну від фонового зменшення АОТ, над піщаними територіями Каховського водосховища та Олешківських пісків подібне сезонне зменшення досягло лише -20%, що відображає інтенсивніше надходження пилу над цими районами.

Отримані результати за даними супутникових спостережень за АОТ показують масштабність змін, які спричинило знищення водосховища. Величезна осушена територія

перетворилася на постійне джерело надходження пилу, за інтенсивністю подібне до Олешківських пісків, яке являє собою найбільшу пустелю Європи.

Встановити зміну розміру часток аерозолі виявилось складнішим завданням, і спостережувані зміни експоненти Ангстрема не є такими очевидними. Незважаючи на це, мають місце ознаки, що підтверджують зміну переважаючої фракції аерозолі над піщаними ділянками Каховського водосховища.

Загалом, для аерозолів над територією Каховського водосховища до підриву дамби були характерні дві переважаючі фракції: з повторюваністю 30-45% випадків переважаючими були великодисперсні частки (експонента Ангстрема від 0 до 0.5), а у 43-60% випадків переважали аерозольні частки маленького розміру (експонента Ангстрема в межах 1.5-2.0). Проміжні фракції аерозолі, що описуються експонентою Ангстрема від 0.5 до 1.5 спостерігалися у порівняно мало випадків. Над Олешківськими пісками, які слугують нам за еталон емісії аерозолі з піщаних територій, експонента Ангстрема розподілена більш рівномірно. Так, повторюваність потрапляння в діапазон від 0 до 0.5 складав 20% випадків, від 0.5 до 1.0 – 40%, від 1.0 до 1.5 – 15%, і від 1.5 до 2.0 – 25%. Тобто, найбільш поширеною фракцією аерозолі були навіть не великодисперсні частки, а дещо менші розміри. Бімодальність розподілу часток над Каховським водосховищем зумовлена викидами від прилеглих міст, що й формували часту повторюваність великодисперсної фракції; поряд із дрібними часточками, які є типовими для фонових територій з водними поверхнями.

Після підриву дамби Каховської ГЕС, над осушеною територією значно зросла повторюваність появи переважаючої великодисперсної фракції (експоненти Ангстрема в діапазоні 0-0.5), спостерігаючись на 20-25% частіше до кінця літа у порівнянні із періодом до руйнування (рис. 4г). У той же час, стрімко впала число випадків із переважаючою дрібнодисперсною фракцією, досягаючи -37% до кінця серпня відносно періоду до підриву дамби. Над територією Олешківських пісків спостережувані зміни подібні за тенденцією, проте менш інтенсивні (рис. 4в). З одного боку, встановлені зміни логічно узгоджуються із фізичними процесами додаткового надходження пилу над осушеними ділянками. З іншого боку, подібні результати, навіть з більшою інтенсивністю, отримані над усією територією лівобережжя Херсонської області (рис. 4б). Це унеможлиблює формування надійних висновків щодо наслідків осушення, так як може мати місце регіональний фактор, виокремити який за даними лише супутникового зондування неможливо. Значною мірою від встановлених тенденцій відрізняється лише правобережжя Херсонської області.

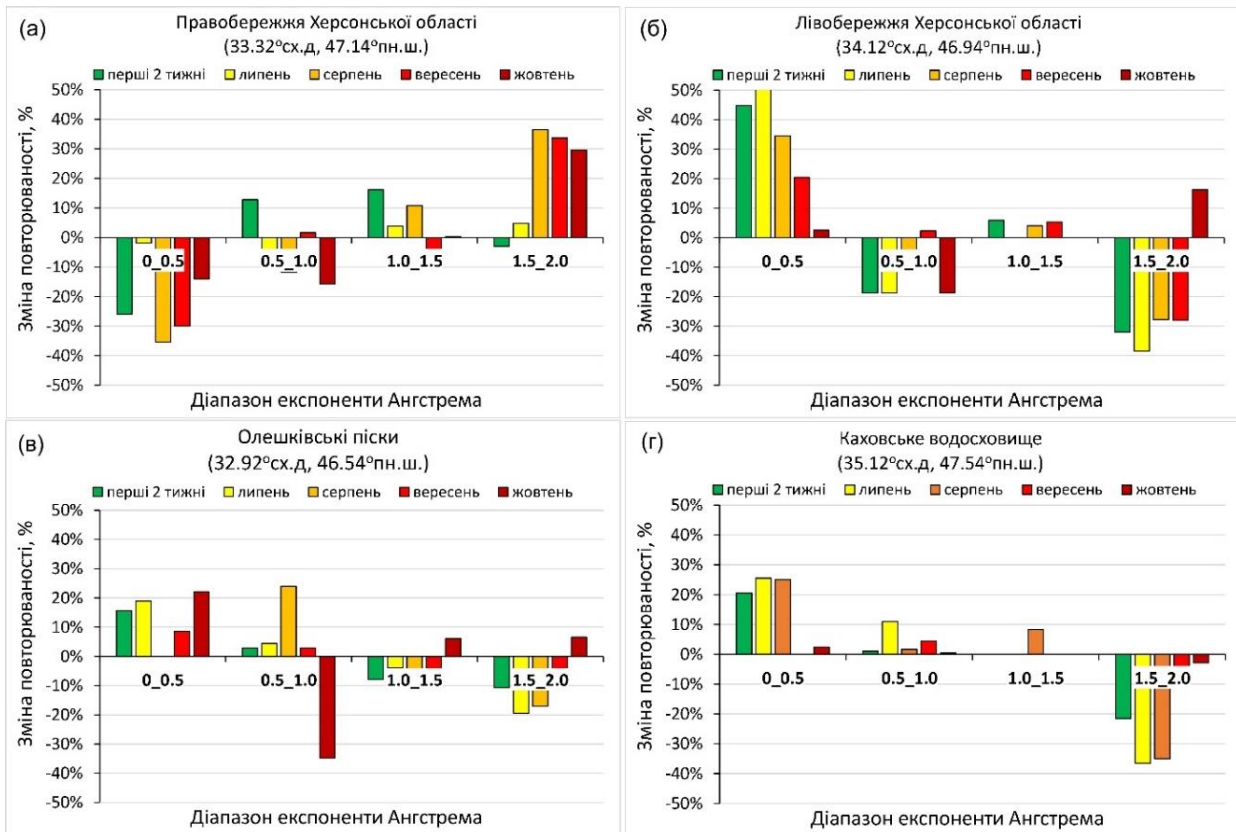
Проте, дві ознаки зміни експоненти Ангстрема над територією осушеного Каховського водосховища дозволяють підтвердити наслідки зміни у переважаючих розмірах часток. Перша ознака є зростання повторюваності випадків із експонентою Ангстрема в межах 0.5-1.0 та наближення цієї повторюваності до типової для атмосферного повітря над Олешківськими пісками. Другою ознакою є продовження тенденції до зменшення повторюваності випадків переважаючої дрібнодисперсної фракції до -5% у жовтні, тоді як над іншими територіями спостерігалось зростання на 15-30% (над Олешківськими пісками до 8%) (рис. 4).

Незважаючи на експериментальність отримання показника масової частки аерозолі, його зміни дозволяють чітко простежити наслідки осушення Каховського водосховища. У загальному стовпі атмосферного повітря до підриву дамби, середній вміст масової частки аерозолі складав від  $4 \times 10^{-6}$  г/см<sup>2</sup> фонового вмісту до  $16 \times 10^{-6}$  г/см<sup>2</sup> над районами із його емісією (рис. 5). Характерною особливістю було також те, що масова частка аерозолі над Каховським водосховищем не мала локальних мінімумів і складала близько  $10 \times 10^{-6}$  г/см<sup>2</sup>, переважно внаслідок впливу прилеглих промислових міст. Після підриву дамби, масова частка аерозолі почала зростати і у серпні перевищила  $20 \times 10^{-6}$  г/см<sup>2</sup>, формуючи два осередки над східною і західною ділянками осушеного Каховського водосховища. Саме ці осередки стали локальними максимумами вмісту аерозолі над територією досліджень, щонайменше вдвічі перевищивши вміст над Олешківськими пісками.

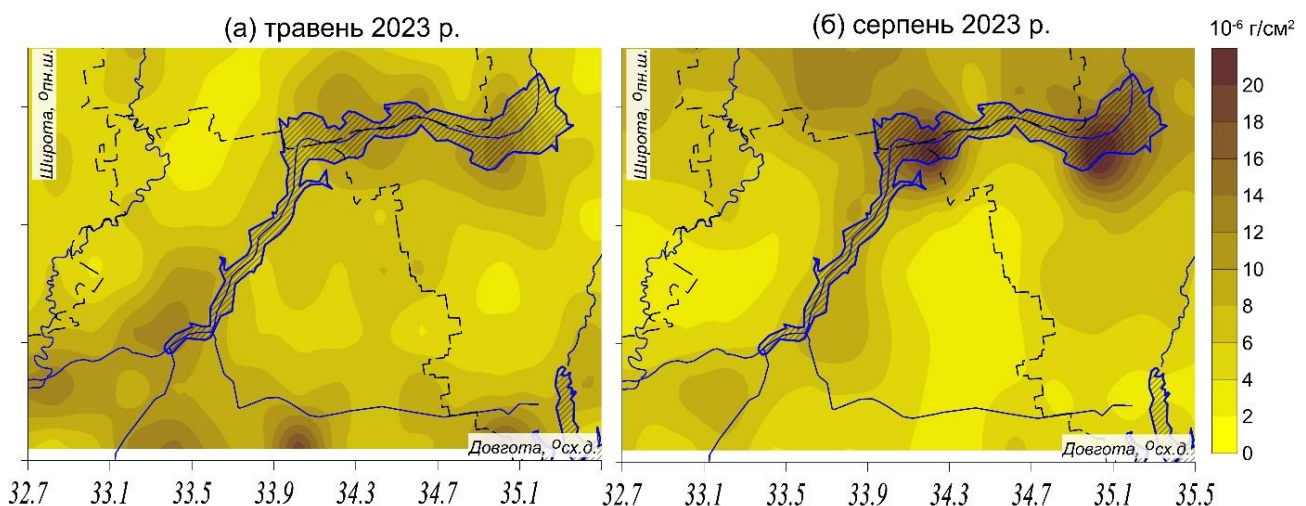
Результати дослідження показали, що підриг дамби Каховського водосховища і його подальше зникнення призвело до появи нового джерела надходження пилу в атмосферне повітря. З першого погляду, ці наслідки не вважаються настільки



катастрофічними та такими, що потребують негайної уваги. Проте, у довготривалій перспективі аерозольне забруднення в районі Каховського водосховища може мати значні негативні наслідки для здоров'я населення і розвитку рослинності, осаджуючись на поверхні прилеглих територій. Більш того, неврахування зміни підстильної поверхні та додаткового надходження великодисперсних часток пилу в атмосферу може призвести до появи похибок при моделюванні атмосферних процесів над регіоном.



**Рис.4** Зміна повторюваності (у % від періоду до підриву дамби) появи експоненти Ангстрема певного діапазону у обраних точках



**Рис.5** Масова частка аерозолі у вертикальному стовпі атмосферного повітря

Як і для багатьох інших надзвичайних подій, що відбулися в Україні після повномасштабного вторгнення, знищення водосховища може бути використане



науковцями як, на жаль, реальний «експеримент». Наразі ми спостерігаємо швидку еволюцію з формування нового джерела природної емісії аерозолі, кількісні показники якого можуть бути екстрапольовані на дослідження процесів опустелювання, чи наслідків осушення озер в інших районах. Супутникова інформація показала свою здатність відображати кількісні зміни, нехай навіть на рівні індикативних показників аерозольного вмісту. Проведені дослідження показали необхідність більш детального вивчення наслідків знищення Каховського водосховища для атмосферного повітря, так як ще далеко не всі негативні наслідки наразі можна встановити та припустити.

**Висновки.** На основі даних супутникового зондування Terra EOS AM-1 приладом MODIS у роботі вперше встановлені закономірності зміни кількісних характеристик аерозолі в атмосферному повітрі над осушеними ділянками Каховського водосховища та підтверджено появу нового джерела аерозольного забруднення в регіоні. Виявлено чіткі зміни у динаміці АОТ, масовій частці аерозолі та, меншою мірою, у експоненті Ангстрема. Загалом, окреслилися два осередки підняття пилу у західній та східній частинах території осушеного Каховського водосховища. Додаткова емісія аерозолі вплинула на збільшення показника АОТ. Як наслідок, під час сезонного регіонального фонового зменшення АОТ над півднем України, що досягало 50% від показників до підриву дамби, над Каховським водосховищем АОТ зменшився лише на 15%. Виявлені осередки та закономірності для АОТ також типові і для масової частки аерозолі. У той час як фонові показники в регіоні не змінилися, кількість аерозолі над Каховським водосховищем зросла щонайменше вдвічі з  $10 \times 10^{-6}$  г/см<sup>2</sup> до більше  $20 \times 10^{-6}$  г/см<sup>2</sup>. Експонента Ангстрема зазнала очікуваних змін: повторюваність випадків переважаючої великодисперсної фракції зросла, тоді як дрібнодисперсної зменшилася. Проте, через подібні тенденції на усьому лівобережжі Херсонської області, наразі неможливо впевнитися у визначальній ролі осушення. У той же час дві ознаки зміни експоненти Ангстрема вказують на зміну у розподілі аерозольних часток за розміром після підриву дамби. По-перше, зросла повторюваність випадків із експонентою Ангстрема в межах 0.5-1.0, що стало наближатися до показників над Олешківськими пісками. По-друге, зменшення повторюваності випадків переважаючої дрібнодисперсної фракції спостерігалось у жовтні, на відміну від інших територій.

Отримані результати підтверджують формування нового джерела аерозольного забруднення, що у довгостроковій перспективі матиме негативні наслідки для здоров'я населення й рослинності у регіоні. З метеорологічної точки зору, осушене Каховське водосховище потребує постійного моніторингу для ідентифікації пилових бурь. Подальші дослідження потребують особливої уваги на вивченні аерозольних ефектів в атмосфері, уточненні інвентаризацій викидів від природних джерел та баз даних підстильної поверхні з метою уточнення вхідних даних для моделювання атмосферних процесів.

#### Список літератури

1. Коментарі членів Робочої групи НАН України з аналізу наслідків руйнування греблі Каховської ГЕС. Національна академія наук України. Електронний ресурс: режим доступу: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=10359> (Дата звернення: 21.01.2024).

2. Aditi, K., Singh, A., Banerjee, T. Retrieval uncertainty and consistency of Suomi-NPP VIIRS Deep Blue and Dark Target aerosol products under diverse aerosol loading scenarios over South Asia. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 331: 121913. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121913>

3. Aili, A., Xu, H., Kasim, T., Abulikemu, A. Origin and Transport Pathway of Dust Storm and Its Contribution to Particulate Air Pollution in Northeast Edge of Taklimakan Desert, China. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12:113. <https://doi.org/10.3390/atmos12010113>

4. Alper P., Ganor, E. Sahara mineral dust measurements from TOMS: Comparison to surface observations over the Middle East for the extreme dust storm, March 14-17, 1998. *Journal of Geophysical Research*. 2001. Vol. 106, No. D16. P. 18.275-18.286.

5. Baddock, M. C., Bullard, J.E., Bryant, R.G. Dust source identification using MODIS: A comparison of techniques applied to the Lake Eyre Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113, Is. 7. P. 1511-1528. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.03.002>

6. Baddock M.C., Bryant, R. G., Acosta, M.D., Gill, T.E. Understanding dust sources through remote sensing: Making a case for CubeSats. *Journal of Arid Environments*. 2021. Vol. 184:104335. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104335>

7. Banks, J.R., Brindley, H.E. Evaluation of MSG-SEVIRI mineral dust retrieval products over North Africa and the Middle East. *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 128. P. 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.07.017>
8. Cho, H., Nasiri, S. L., Yang, P., Laszlo, I., Zhao, X. Detection of Optically Thin Mineral Dust Aerosol Layers over the Ocean Using MODIS. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2013. Vol. 30. P. 896–916. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00079.1>
9. Contini, D., Lin, Y.-H., Hänninen, O., Viana, M. Contribution of Aerosol Sources to Health Impacts. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12:730. <https://doi.org/10.3390/atmos12060730>
10. Eck, T. F., Holben B. N., Reid, J.S., et al. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 31333-31350. <https://doi.org/10.1029/1999JD900923>
11. Kok, J. F., Adebisi, A. A., Albani, S., et al. Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust. *Atmos. Chem. Phys.* 2021. Vol. 21. P. 8169–8193. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021>
12. Laid to waste. Ukrainian scientists are tallying the grave environmental consequences of the Kakhovka Dam disaster. Science. URL: <https://www.science.org/content/article/ukrainian-scientists-tally-grave-environmental-consequences-kakhovka-dam-disaster> (Last accessed: 21.01.2024)
13. Levy, R., Hsu, C., et al. MODIS Atmosphere L2 Aerosol Product. NASA MODIS Adaptive Processing System. Goddard Space Flight Center, USA. 2015. [http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD04\\_L2.061](http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD04_L2.061)
14. Parajuli, S. P., Jin, Q., Francis, D. Editorial: Atmospheric dust: How it affects climate, environment and life on Earth? *Front. Environ. Sci.* 2022. Vol. 10:1058052 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1058052>
15. Prospero J. M. Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: Impact of African dust on the environment of the southeastern United States. *PNAS*. 1999. Vol. 96, No. 7. P. 3396-3403. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.7.3396>
16. Romano, F., Ricciardelli, E., Cimini, D., Di Paola, F., Viggiano, M. Dust Detection and Optical Depth Retrieval Using MSG-SEVIRI Data. *Atmosphere*. 2013, Vol. 4. P. 35-47. <https://doi.org/10.3390/atmos4010035>
17. Wang, X., Cai, D., Li, D., Lou, J., Zheng, Y., Hu S., Liu, F. Dust deposition and its significance to soil nutrients in the Otindag Desert, China. *Journal of Arid Environments*. 2021. Vol. 194, 104612. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104612>
18. Zhang, H., Ciren, P., Kondragunta, Sh., Laszlo, I. Evaluation of VIIRS dust detection algorithms over land. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2018. Vol. 12, Is. 4: 042609. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.042609>

## References

1. Komentari chleniv Robochoyi grupy NAN Ukrainy z analizu naslidkivruinuvannia grebli Kahovskoyi GES. Natsionalna Akademiya Nauk Ukrainy [“Comments from the members of the Working Group of the National Academy of Sciences of Ukraine on the analysis of the consequences of the destruction of the dam of the Kakhovka Hydroelectric Power Station. National Academy of Sciences of Ukraine.]. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=10359> (Accessed: 21.01.2024).
2. Aditi, K., Singh, A., Banerjee, T. Retrieval uncertainty and consistency of Suomi-NPP VIIRS Deep Blue and Dark Target aerosol products under diverse aerosol loading scenarios over South Asia. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 331: 121913. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121913>
3. Aili, A., Xu, H., Kasim, T., Abulikemu, A. Origin and Transport Pathway of Dust Storm and Its Contribution to Particulate Air Pollution in Northeast Edge of Taklimakan Desert, China. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12:113. <https://doi.org/10.3390/atmos12010113>
4. Alper P., Ganor, E. Sahara mineral dust measurements from TOMS: Comparison to surface observations over the Middle East for the extreme dust storm, March 14-17, 1998. *Journal of Geophysical Research*. 2001. Vol. 106, No. D16. P. 18.275-18.286.
5. Baddock, M. C., Bullard, J.E., Bryant, R.G. Dust source identification using MODIS: A comparison of techniques applied to the Lake Eyre Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113, Is. 7. P. 1511-1528. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.03.002>
6. Baddock M.C., Bryant, R. G., Acosta, M.D., Gill, T.E. Understanding dust sources through remote sensing: Making a case for CubeSats. *Journal of Arid Environments*. 2021. Vol. 184:104335. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104335>
7. Banks, J.R., Brindley, H.E. Evaluation of MSG-SEVIRI mineral dust retrieval products over North Africa and the Middle East. *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 128. P. 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.07.017>

8. Cho, H., Nasiri, S. L., Yang, P., Laszlo, I., Zhao, X. Detection of Optically Thin Mineral Dust Aerosol Layers over the Ocean Using MODIS. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2013. Vol. 30. P. 896–916. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00079.1>
9. Contini, D., Lin, Y.-H., Hänninen, O., Viana, M. Contribution of Aerosol Sources to Health Impacts. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12:730. <https://doi.org/10.3390/atmos12060730>
10. Eck, T. F., Holben B. N., Reid, J.S., et al. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 31333-31350. <https://doi.org/10.1029/1999JD900923>
11. Kok, J. F., Adebiji, A. A., Albani, S., et al. Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust. *Atmos. Chem. Phys.* 2021. Vol. 21. P. 8169–8193. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021>
12. Laid to waste. Ukrainian scientists are tallying the grave environmental consequences of the Kakhovka Dam disaster. *Science*. URL: <https://www.science.org/content/article/ukrainian-scientists-tally-grave-environmental-consequences-kakhovka-dam-disaster> (Last accessed: 21.01.2024)
13. Levy, R., Hsu, C., et al. MODIS Atmosphere L2 Aerosol Product. NASA MODIS Adaptive Processing System. Goddard Space Flight Center, USA. 2015. [http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD04\\_L2.061](http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD04_L2.061)
14. Parajuli, S. P., Jin, Q., Francis, D. Editorial: Atmospheric dust: How it affects climate, environment and life on Earth? *Front. Environ. Sci.* 2022. Vol. 10:1058052 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1058052>
15. Prospero J. M. Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: Impact of African dust on the environment of the southeastern United States. *PNAS*. 1999. Vol. 96, No. 7. P. 3396-3403. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.7.3396>
16. Romano, F., Ricciardelli, E., Cimini, D., Di Paola, F., Viggiano, M. Dust Detection and Optical Depth Retrieval Using MSG-SEVIRI Data. *Atmosphere*. 2013, Vol. 4. P. 35-47. <https://doi.org/10.3390/atmos4010035>
17. Wang, X., Cai, D., Li, D., Lou, J., Zheng, Y., Hu S., Liu, F. Dust deposition and its significance to soil nutrients in the Otindag Desert, China. *Journal of Arid Environments*. 2021. Vol. 194, 104612. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104612>
18. Zhang, H., Ciren, P., Kondragunta, Sh., Laszlo, I. Evaluation of VIIRS dust detection algorithms over land. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2018. Vol. 12, Is. 4: 042609. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.042609>

#### **Changes in atmospheric aerosol parameters due to the dust emission from the drained areas of the Kakhovka Reservoir**

**Krainyk S.V., Savenets M.V.**

*The article presents main changes in atmospheric aerosol parameters due to the dust emission from the drained areas of the Kakhovka Reservoir and confirms the formation of a new source of aerosol pollution. The research was conducted using data on aerosol optical depth (AOD), Angstrom exponent, and aerosol mass fraction from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) satellite instrument with support from LandSat satellite underlay surface images. An increase in AOD over the reservoir was established, resulting in a less pronounced change (-15%) during the fall compared to the regional background decrease of 50%. An increase in the aerosol mass fraction over the drained areas of the Kakhovka Reservoir was identified to be at least twice as much. Changes in the Angstrom exponent were identified, indicating a redistribution of the predominant size of aerosol particles in the atmospheric air. The frequency of cases with a predominance of the coarse fraction increased, while that of the fine fraction decreased. However, due to similar trends across the entire left bank of the Kherson region, it is currently impossible to be certain about the defining role of drying. At the same time, two indicators of changes in the Angstrom exponent suggest a shift in the size distribution of aerosol particles after the dam breach: an increased frequency of cases with an Angstrom exponent within 0.5-1.0, approaching the values over the Oleshky Sands; and a decrease in the frequency of cases with a predominance of the fine particles in October, unlike other territories. We emphasized the need for further monitoring of dust emissions into the atmosphere and modifications to emission inventories from natural sources for numerical atmospheric modeling purposes.*

**Key words:** aerosol, optical depth, Angstrom exponent, remote sensing, MODIS.

**Надійшла до редколегії 01.02.2024**