

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.4.345248>

УДК 551.462:504.054

Твердий органічний вуглець у донних відкладах Чорного моря як індикатор антропогенного впливу на морську геолого-екологічну систему

E-mail: nasedevg@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0003-2633-9291>;
volodyasea1990@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-8972-0754>;
fedoronch@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-4903-4928>

Received / Надійшла до редакції:
26.07.2025

Received in revised form /
Надійшла у ревізованій формі:
01.11.2025

Accepted / Прийнята:
11.12.2025

*Corresponding author /
Автор для кореспонденції:
Ye.I. Nasiedkin, nasedevg@ukr.net

Keywords: particulate organic carbon, Black Sea geoecosystem, geological-ecological subsystem of the seafloor sediments, anthropogenic impact marker.

Ключові слова: твердий органічний вуглець, геоекосистема Чорного моря, геолого-екологічна субсистема донних відкладів, маркер антропогенного впливу.

Є.І. Насєдкін^{1,2*}, В.О. Ємельянов^{1,2}, Н.О. Федорончук^{1,3}

¹Державна наукова установа “Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України”, Київ, Україна; ²Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна; ³Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, Одеса, Україна

Particulate organic carbon in the seafloor sediments of the Black Sea as an indicator of anthropogenic impact on the marine geological and ecological system

Ye.I. Nasiedkin^{1,2*}, V.O. Iemelianov^{1,2}, N.O. Fedoronchuk^{1,3}

¹State Scientific Institution “Center for Problems of Marine Geology, Geoecology and Sedimentary Ore Formation of the NAS of Ukraine”, Kyiv, Ukraine; ²Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; ³Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine

This publication presents the results of experimental studies of the quantitative and qualitative characteristics of particulate organic carbon including black carbon particles in the seafloor sediments of the Black Sea as an indicator of anthropogenic load on the marine geoecosystem, its intensity and possible sources.

The studies were conducted in the shelf areas and the continental slope of the Black Sea in the eastern, western and southwestern parts of the basin, namely in the exclusive economic zones (EEZs) of Romania and Georgia, and the littoral part of the shelf of Ukraine (Odesa region). The particulate organic carbon was isolated from samples of seafloor sediments in 2020–2024 as a by-product in laboratory studies of microplastics. Sampling at the shelf and continental slope was carried out during research cruises on the R/V “Mare Nigrum” within the framework of the DOORS H2020 International Project, using Van-Veen Grab and multicorer at sea depths of 30–1080 m. The upper layer of seafloor sediments with a thickness of 5 cm was tested (in some cases to study the vertical distribution of particles – with a thickness of 10 cm). In the littoral part of the northwestern shelf, an aqueous suspension from the wave formation zone was tested by filtration with a net having a pore size of 25 µm.

To isolate particulate organic carbon from the sediment, the method of density separation in a saturated solution of zinc chloride with a density of $\rho = 1.8 \text{ g/cm}^3$ was used. The study of the morphology of the particles was carried out using an optical microscope, and physicochemical identification was carried out using a Raman spectrometer. The black carbon particles are present in the upper layer of all studied areas of the Black Sea. Quantitative dominance of particulate organic carbon is observed off the coast of Georgia, where its content ranges roughly from 10% to 65% of the fraction <1 mm and of density $\rho < 1.8 \text{ g/cm}^3$. The highest concentration is recorded in the zone of terrigenous runoff of the Rioni and Khobi rivers. On the Romanian shelf, the amount of particulate organic carbon is much lower (about from 1% to 15% of the fraction <1 mm and of density $\rho < 1.8 \text{ g/cm}^3$), and on the littoral of the northwestern shelf of Ukraine the particulate organic carbon particles are distributed locally (about from 1% to 5% of the fraction <1 mm and of density $\rho < 1.8 \text{ g/cm}^3$). Such features are in general consistent with the intensity of the anthropogenic load on the geoecosystem of the Black Sea in these areas. Morphologically, spherical shapes prevail on the Georgian shelf, which may be due to their accidental release during transportation or the specifics of their genesis (combustion products, molten polymer particles, bitumen). The Romanian shelf and continental slope are characterized by sharply different particle sizes and the presence of pyroplastics – particles that morphologically correspond to the black carbon particles, but according to the results of Raman spectroscopy they are polymers that have undergone thermal action. Analysis of the vertical distribution of particulate organic carbon on the Georgian shelf showed a significant increase in the amount of particulate organic carbon in the surface layer (0–5 cm) compared to the subsurface layer (5–10 cm), which most likely reflects the period of intensification of human activity with the accumulation of the corresponding layer of sediments, although it can be caused by diagenetic accumulation processes. Identification of particulate organic carbon by Raman spectroscopy indicates that the isolated particles belong to coal, soot or bitumen, but laboratory experiments on the amount of soluble (bituminous) components showed their minimum amount in the composition of the isolated particles of particulate organic carbon.

The obtained results allow us to better understand the anthropogenic impact on the formation of the layers of the geological environment of the geoecosystem at the border with the aquatic ecological subsystem, as well as the influence of hydrological, geological and anthropogenic factors on the processes of the black carbon inflow into the Black Sea geo-ecosystem. The particulate organic carbon including black carbon particles can become one of the promising indicators of anthropogenic impact on the marine geoecosystem, the degree of its intensity and possible sources, and in addition, carry certain information on the historical and cultural direction of economic activity in the catchment areas.

Acknowledgement. This research was supported by the European Union Horizon 2020 DOORS project (Developing Optimal and Open Research Support for the Black Sea, No 101000518), and was conducted according to the thematic plans of the SSI “MariGeoEcoCenter of the NAS of Ukraine” and the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine.

© 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: Насєдкін Є.І., Ємельянов В.О., Федорончук Н.О. Твердий органічний вуглець у донних відкладах Чорного моря як індикатор антропогенного впливу на морську геолого-екологічну систему. *Геологічний журнал*. 2025. № 4 (393). С. 64–76. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.4.345248>

Citation: Nasiedkin Ye.I., Iemelianov V.O., Fedoronchuk N.O. 2025. Particulate organic carbon in the seafloor sediments of the Black Sea as an indicator of anthropogenic impact on the marine geological and ecological system. *Geologichnyi žurnal*, 4 (393), 64–76. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.4.345248>

1 Вступ

Донні відклади Чорного моря являють собою резервуар накопичення осадового матеріалу складного генезису, фізичного та хімічного складу та властивостей, об'єднаних в єдину середовищну геолого-екологічну субсистему нижнього рівня геоекосистеми Чорного моря. До складу останньої входять ще дві середовищні субсистеми нижнього рівня: субсистема, в якій основним природним середовищем є атмосферне повітря, означена нами терміном «аероекологічна субсистема», в той час як субсистема, в якій основним природним середовищем є вода, означена нами терміном «акваекологічна».

Геологічне середовище та його складові несуть в собі багато інформації, формуючи в обмеженому просторі та часі певні речовинні прошарки, особливості складу та властивості яких напряму залежать від природних та антропогенних факторів формування потоків речовини в межах певних просторових і часових блоків, що відповідають конкретним геологічним і навіть історичним періодам.

Як правило, дослідження впливу антропогенної діяльності на геолого-екологічну субсистему, а отже, і на геоекосистему Чорного моря в цілому стосуються відомих категорій полютантів. Наприклад, таких як нафтопродукти, важкі метали, пестициди та радіонукліди. В останні десятиліття увагу дослідників привертають такі забруднювачі, як пластики різного походження, складу та розміру (Hidalgo-Ruz et al., 2012; Galgani et al., 2023), зокрема встановлення їх кількісних характеристик та особливостей площадного розподілу. Крім того, в оприлюднених наукових працях з проблематики антропогенного впливу на геоекосистему Чорного моря розглядаються питання впливу взаємодії геолого-екологічної та акваекологічної субсистем геоекосистеми Чорного моря на концентрування забруднювачів у різних речовинно-генетичних типах геолого-екологічної субсистеми та їх окремих просторових складових.

Водночас важливо звертати увагу і на альтернативні маркери впливу діяльності людини на геолого-екологічну субсистему, інформації про які наразі недостатньо. Важливо також не ігнорувати можливість застосування таких маркерів для отримання додаткових, недосліджених факторів процесу взаємодії сфери техногенезу та природних геоекосистем та їх субсистем. Одним з таких маркерів можуть слугувати частинки

твердого органічного вуглецю чорного кольору, що містяться в прибережних і глибоководних морських відкладах. Важливість досліджень особливостей цих частинок в умовах кліматичних змін і встановлення реакції геоекосистеми Чорного моря на такі зміни полягає, в тому числі, у високій здатності твердого органічного вуглецю поглинати сонячну радіацію, в їх значному каталітичному впливі на геохімічні перетворення (Middelburg et al., 1999), а також у його важливій ролі в секвеструванні вуглецю у глобальному вуглецевому циклі (La Rowe et al., 2020). Наприклад, частинки твердого органічного вуглецю, крім інших властивостей, мають високу сорбційну здатність, що сприяє перенесенню дисперсної речовини різного походження як під час осадконакопичення, так і при діагенетичних перетвореннях у цілому сформованого геологічного середовища в процесі седиментогенезу. Наголосимо, що твердий органічний вуглець впливає не лише на геолого-екологічну субсистему. Зокрема, в результаті вивільнення газів при деградації частинок вуглецю відбувається певний вплив на речовину та процеси акваекологічної та аероекологічної субсистем геоекосистеми Чорного моря.

Роль частинок твердого органічного вуглецю, зокрема частинок чорного вуглецю, в геологічному середовищі геолого-екологічної субсистеми як індикатора антропогенного впливу на геоекосистему Чорного моря зумовлена різким підвищенням їх вмісту в морських донних відкладах у періоди індустріального розвитку (Chen et al., 2023).

Можливість використання чорного вуглецю в морських та озерних відкладах як доброго індикатора антропогенного навантаження та встановлення критичних змін в історії індустріального розвитку та господарської діяльності доведена в низці публікацій для густонаселених регіонів Східної, Південної та Південно-Східної Азії (Cong et al., 2013; Wang et al., 2014; Fang et al., 2018) та інших регіонів планети (Novakov et al., 2003; Lee et al., 2013; Wulandari et al., 2023).

Водночас сучасний інтерес світової наукової спільноти до досліджень твердого органічного вуглецю та чорного вуглецю в його складі в морських та океанічних геоекосистемах обумовлений і його значенням як важливого кліматичного агента через високу здатність поглинання сонячного випромінювання та регіональний розподіл (Ramanathan, Carmichael, 2008).

Особлива увага приділяється можливим джерелам надходження та шляхам транспортування цих частинок, обсягів надходження та балансу твердого органічного вуглецю у Світовий океан, частки в його складі чорного вуглецю, його ролі у секвеструванні (Sánchez-García et al., 2012) та геохімічних циклах вуглецю. Доведено, що переважними шляхами перенесення в морські басейни твердого органічного вуглецю, і чорного вуглецю в тому числі, є річковий стік та атмосферне перенесення (Jurado et al., 2008; Sánchez-García et al., 2012; Bao et al., 2017; Fang et al., 2018; Jones et al., 2019; Corrolla et al., 2022). Щодо можливих джерел надходження чорного вуглецю у складі твердого органічного вуглецю з геоекосистеми морів та океанів у сучасних публікаціях немає єдиної думки. Проте багато дослідників схиляються до того, що переважна більшість частинок чорного вуглецю надходить внаслідок спалення біомаси (Lamarque et al., 2010; Jaffé et al., 2013), в тому числі в результаті лісових пожеж з наступним атмосферним перенесенням і річковим стоком (Tranvik, 2018; Jones et al., 2020), спаленням викопного палива (Tiwari et al., 2020). У роботі (Seburnis et al., 2011) оцінено внесок спалення викопного палива на підставі ізотопних аналізів, а дослідженнями доведено переважання цього внеску над внеском унаслідок спалення біомаси (Lohmann et al., 2009; Briggs et al., 2016). Цікавою особливістю чорних вуглецевих частинок, вилучених з морських та океанічних донних відкладів, є переважання віку цих частинок на декілька тисяч років над віком решти твердого органічного вуглецю з тих самих відкладів і збільшення віку цих частинок від 4800 ± 620 ^{14}C -років на поверхні до 23000 ± 3000 ^{14}C -років на глибині (Corrolla et al., 2014; Corrolla et al., 2016).

У даній публікації представлені результати експериментальних досліджень частинок твердого органічного вуглецю, виділених з донних відкладів Чорного моря, як одного з перспективних показників антропогенного впливу на останню, в тому числі, ступеня інтенсивності цього впливу та можливих джерел власне частинок вуглецю.

Результати, отримані авторами, зокрема якісні та кількісні характеристики частинок твердого органічного вуглецю у складі геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми та особливості їх розподілу, сприяють кращому розумінню потенційної ролі та рівню впливу антропогенної складової у формуванні середовища геолого-екологічної субсистеми, особливо на границях з акваекологічною й аероекологічною субсистемами, а також впливу гідрологічних, геологічних та антропогенних факторів на процеси надходження частинок твердого органічного вуглецю у геоекосистемі Чорного моря тощо.

2 Матеріали та методи

Частинки твердого органічного вуглецю, зокрема чорного вуглецю, були виділені авторами з матриці донних відкладів Чорного моря протягом 2020–2024 рр. як супутній компонент при лабораторних дослідженнях мікропластику (Iemelianov et al., 2024; Iemelianov et al., 2025) в просторовому середовищі геолого-екологічної субсистеми окремих шельфових районів і континентального схилу геоекосистеми Чорного моря, її східної, західної та південно-західної частин, а саме у виключних економічних зонах (ВЕЗ) Румунії та Грузії, а також у межах літоральної частини шельфу України (Одеська область) (рис. 1).



Рис. 1. Райони досліджень частинок твердого органічного вуглецю, виділених з донних відкладів Чорного моря: 1 – ділянка західного шельфу та материкового схилу, ВЕЗ Румунії; 2 – ділянка східного шельфу, ВЕЗ Грузії; 3 – північно-західна літоральна ділянка, узбережжя України

Fig. 1. Areas of research of particulate organic carbon in the seafloor sediments of the Black Sea: 1 – the western shelf and continental slope area, Romania EEZ; 2 – the eastern shelf area, Georgia EEZ; 3 – the northwestern littoral area, coast of Ukraine

Райони досліджень відрізнялись специфічними фізико-географічними та гідрологічними умовами, ступенем та особливостями антропогенного навантаження, що зумовило строкатість та різноманітність отриманих результатів.

Частинки твердого органічного вуглецю були виділені зі зразків геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми геоекосистеми Чорного моря на підставі відповідності особливостей складної застосованої методики відбору та підготовки проб для виділення мікропластику методики, яка може бути використана для виділення з осаду легкої вуглистої речовини, в тому числі й твердого органічного вуглецю.

У дослідженнях частинок твердого органічного вуглецю, зокрема чорного вуглецю, широко застосовується метод термічного окислення (Gustafsson, Gschwend, 1998; Middelburg et al., 1999), проте використана нами лабораторна методика його виділення як супутнього компонента при відокремленні частинок штучних полімерів з матриці морських донних відкладів дозволила ефективно відокремити необхідні обсяги частинок твердого органічного вуглецю для подальшої ідентифікації та досліджень.

У східній та західній частинах Чорного моря відбір проб відбувався в 2023–2024 рр. у межах ВЕЗ Грузії та Румунії. Морські експедиційні роботи були виконані з борту НДС «Mare Nigrum» (Румунія) в рамках Міжнародного науково-дослідного проєкту DOORS H2020. Для пробовідбору в залежності від глибин моря застосовували два пробовідбірники – дночерпатель Van-Veen Grab з площею охоплення дна 35 × 40 см та мультикорер Mark II з чотирма тубами діаметром 10 см. Була відібрана речовина з верхнього 5-сантиметрового шару донних відкладів: у разі випробування мультикорером – з двох туб (площа поверхні осаду 157 см²), іноді через нестачу піднятого на борт матеріалу – з одної туби (площа поверхні осаду 78,5 см²), що документувалось для подальших розрахунків, а при застосуванні дночерпателя – з площі 15 × 15 см (площа поверхні осаду 225 см²).

У ВЕЗ Грузії пробовідбір здійснювався виключно в шельфовій зоні, нестабільній щодо тривалого осадконакопичення області геоекосистеми Чорного моря, в діапазоні глибин моря від 30 до 95 м. Зі станцій відбору проб, розташованих у прибережних частинах шельфу (рис. 2) в зоні розповсюдження підводних каньйонів і в умовах активних річкових виносів теригенної



Рис. 2. Розташування станцій відбору зразків у східній частині Чорного моря, ВЕЗ Грузії (рейс MN256, 2024)

Fig. 2. Location of sampling stations in the eastern Black Sea, Georgia EEZ (cruise MN256, 2024)

речовини, було відібрано дночерпателем і проаналізовано шість проб геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми. На одній станції додатково була відібрана та проаналізована проба донних відкладів з інтервалу 5–10 см нижче поверхні дна – границі між акваекологічною та геолого-екологічною субсистемами геоекосистеми Чорного моря.

У частині геоекосистеми Чорного моря, в зонах шельфу та континентального схилу в межах ВЕЗ Румунії, відбір зразків геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми здійснювався мультикорером та, з метою порівняння методологій пробовідбору, за допомогою Van-Veen Grab (Fedoronchuk et al., 2025). Досліджено 19 зразків з 16 станцій пробовідбору (рис. 3).

У північно-західній частині геоекосистеми Чорного моря відбір зразків середовища її геолого-екологічної субсистеми виконано в літоральних умовах біля узбережжя Одеської області (Україна), в межах хвилеприбійної зони пляжу м. Південне (рис. 4) влітку 2020 та 2021 рр. Методика відбору була обрана з урахуванням специфіки району та можливостей дослідників. Було відібрано два типи проб: 1)

зразки піщаного середовища відбиралися по субпаралельних профілях, розташованих у поперечному напрямку до простягання берегової смуги (три профілі по два зразки), практично до урізу води, тобто зони взаємодії трьох середовищних субсистем геоєкосистеми Чорного моря; 2) дрібнодисперсна зависла речовина відбиралася на границі повітряного, водного та геологічного середовищ, у так званій хвилеприбійній зоні. Фільтрування дрібнодисперсних частинок з практично водної суспензії відбувалося за допомогою фільтрувальної поліамідної тканини з розміром пор 25 мкм. Обсяг фільтрованої води в кожній пробі становив 15–17 л.

У лабораторних умовах ключовою операцією переданалітичної підготовки зразків геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми, яка дала можливість отримати частинки органічного вуглецю як його доволі специфічної сучасної компоненти, була процедура щільнісного розділення речовини проб поверхневих донних відкладів, що застосовується для виділення штучних полімерів (Hidalgo-Ruz et al., 2012; Galgani et al., 2023), а враховуючи характерну низьку густину твердого органічного вуглецю, придатна і для сепарації чорного вуглецю. Для виділення частинок вуглецю з матриці осаdkів було використано метод щільнісної сепарації в насиченому розчині солей високої густини.

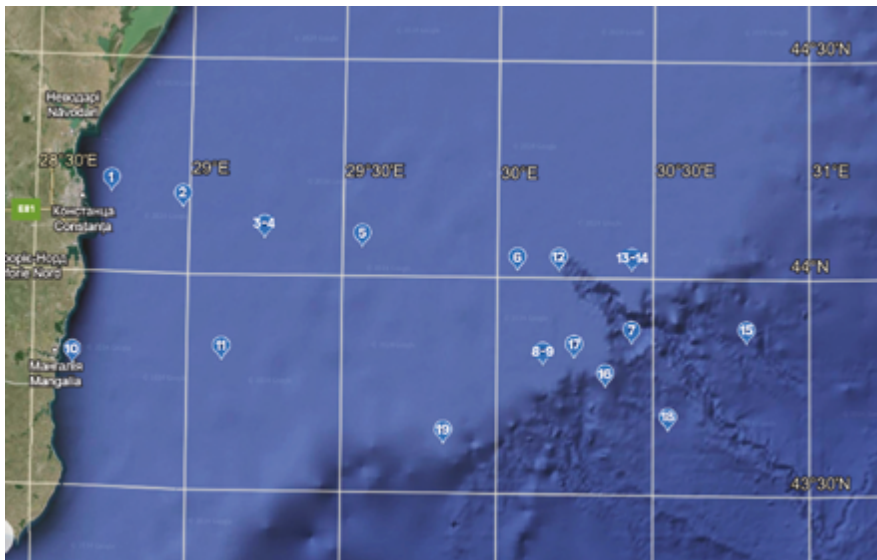


Рис. 3. Розташування станцій відбору зразків у західній частині Чорного моря, БЕЗ Румунії (рейс MN240, 2023)

Fig. 3. Location of sampling stations in the western Black Sea, Romania EEZ (cruise MN240, 2023)



Рис. 4. Розташування профілів відбору зразків середовища пляжної зони узбережжя північно-західного шельфу Чорного моря, Україна, Одеська область, пляж м. Південне (2020–2021 рр.)

Fig. 4. Location of sampling profiles on the coast of the north-western shelf of the Black Sea, Ukraine, Odesa region, beach of Pivdenne city (2020–2021)

У нашому випадку застосовувався розчин хлориду цинку зі щільністю $\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$. Після щільнісного розділення для мінімізації кількості природної органічної складової проведено відстоювання в концентрованому (35 %) розчині пероксиду водню та подальша фільтрація через поліамідну сітку з розміром комірки 36 мкм. Візуальне дослідження відсепарованих частинок зі щільністю $\rho < 1,8 \text{ г/см}^3$ виконано під монокулярним оптичним мікроскопом SIGETA MB-12 LCD.

Фізико-хімічна ідентифікація частинок проведена на раманівському спектрометрі. Дослідження виконано за допомогою однокаскадного спектрометра MDR-23, оснащеного охолоджуваним детектором CCD (Andor iDus 420, Великобританія) та мікроскопом «Micromed». Раманівські спектри збуджувалися випромінюванням твердотільних лазерів з довжинами хвиль 457, 532, 671 та 785 нм.

Частинки вуглецю сферичної форми додатково досліджувалися з метою виявлення в їх складі бітумів для з'ясування можливості генетичного зв'язку частинок з техногенним нафтовим забрудненням. Сферичні частинки концентрували в прозорих бюксах і заливали гексаном. Наявність бітумів мала визначатися розчиненням частинок, складених нафтопродуктами, та помутнінням і зміною кольору гексану. Вуглецеві або полімерні частинки мали зберегти свої первинні морфологічні властивості.

3 Результати

3.1 Розподіл частинок твердого органічного вуглецю в різних районах геоекосистеми Чорного моря

Кількість відсепарованої речовини мінерального, органічного та антропогенного походження в різних пробах геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми становила від 50 до 1500 од. і включала штучні полімери, різноманітні органічні фрагменти тваринного походження (панцирів, мушлей, кісток тощо) та рослин (кори, стебелів, листя, гілок тощо), пухкі мінеральні агрегати, а також суттєву кількість частинок твердого органічного вуглецю. Варто відмітити значне кількісне й якісне (розмірність, морфологічні типи, склад) коливання характеристик цієї речовини у досліджених пробах.

3.1.1 Шельф ВЕЗ Грузії

Досліджувана ділянка району геоекосистеми Чорного моря в межах геолого-екологічної субсистеми шельфу Грузії щодо рельєфу дна як границі між акваекологічною та геолого-екологічною субсистемами характеризується розвитком геоморфологічних форм з крутими схилами. В геоекологічних умовах вузького, зрізаного каньйонами шельфу відбуваються підводні зсуви значних масштабів і сходження каламутних потоків. Це спричиняє перенесення осадового матеріалу від шельфової частини простору геолого-екологічної субсистеми до її частини, розташованої у підніжжя континентального схилу. Значне розчленування досліджуваної ділянки геолого-екологічної субсистеми каньйонами зумовило складний характер процесів сучасної седиментації, які неоднаково реалізуються у межах різних фаціальних зон простору геолого-екологічної субсистеми: каньйонів, міжканьйонних районів і конусів виносу. Підвищені потужності знесених осадків зосереджені, зокрема, біля підніжжя Кавказького континентального схилу, в той час як найменші – приурочені до просторів осьових частин підводних долин і каньйонів.

У літологічному відношенні випробувані відклади являли собою переважно теригенні утворення з різноманітним гранулометричним складом поганого ступеня сортування (від пеліту до піску), невеликим вмістом органічної складової у вигляді черепашок молюсків, часто з градаційною турбідитною дрібношаруватою текстурою, зумовленою широким розповсюдженням турбідитних процесів у цій геоморфологічно складній частині шельфу геоекосистеми Чорного моря.

Кількість частинок твердого органічного вуглецю, зокрема чорного вуглецю, сягала приблизно від 10 до 65 % фракції $<1 \text{ мм}$ зі щільністю $\rho < 1,8 \text{ г/см}^3$. Найбільша кількість частинок чорного вуглецю спостерігалася у пробах зі станцій, розташованих у зоні теригенного зносу річок Ріоні та Хобі, неподалік від гирла р. Хобі, на північ від дельти р. Ріоні (рис. 5).

3.1.2 Шельф і континентальний схил ВЕЗ Румунії

Досліджувана ділянка району геоекосистеми Чорного моря в межах шельфу та континентального схилу ВЕЗ Румунії є зоною теригенного стоку р. Дунай, в якій відбувається перерозподіл осадового матеріалу шельфу під впливом потужних чорноморських течій, що відбивається у характерних рисах седиментаційних процесів.

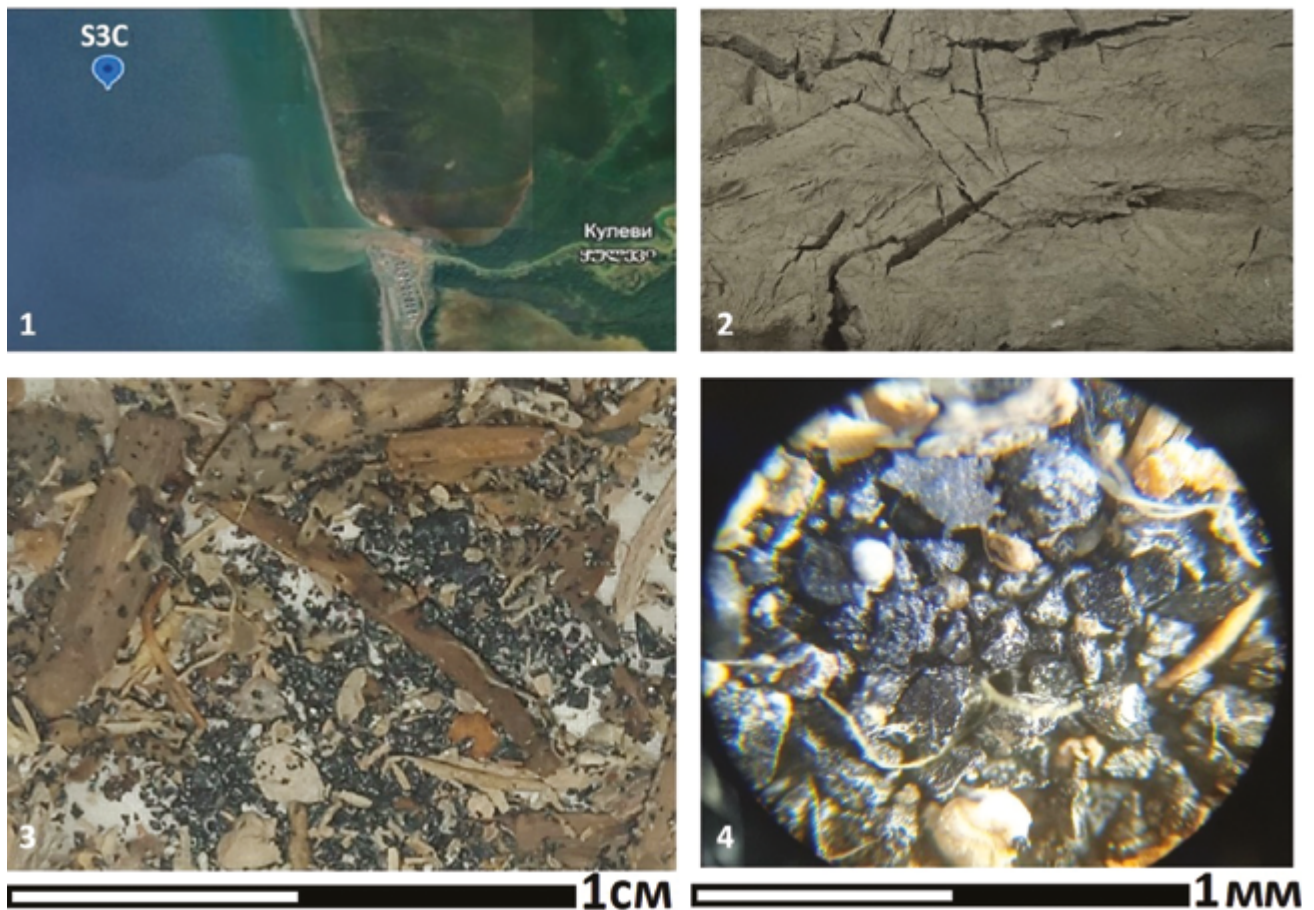


Рис. 5. Частинки твердого органічного вуглецю з донних відкладів зони теригенного виносу річок Ріоні та Хобі: 1 – розташування станції пробовідбору на шельфі та особливості берегової ділянки; 2 – суха проба; 3 – фракція зі щільністю $\rho < 1,8 \text{ г/см}^3$; 4 – чорні частинки твердого органічного вуглецю під мікроскопом

Fig. 5. Particulate organic carbon from seafloor sediments of the terrigenous discharge of the Rioni and Khobi rivers: 1 – location of the sampling station on the shelf and features of the coastal area; 2 – dry sample; 3 – fraction with a density $\rho < 1.8 \text{ g/cm}^3$; 4 – particulate organic carbon under a microscope

Особливості розташування станцій в межах цього району досліджень визначалися охопленням різних елементів рельєфу дна, тобто поверхні границі між середовищами геолого-екологічної та акваекологічної субсистем геоекосистеми Чорного моря, а саме в зонах шельфу та континентального схилу в діапазоні глибин моря від 25 до 1080 м.

Кількість частинок твердого органічного вуглецю в цьому районі була незначною в порівнянні з такою шельфу Грузії – від 1 до 15 % фракції $< 1 \text{ мм}$ зі щільністю менше ніж $1,8 \text{ г/см}^3$. Їх розподіл не мав певних геоморфологічних закономірностей. Так, підвищені концентрації спостерігалися у пробах, відібраних з геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми як у межах мілководного шельфу, так і на окраїні шельфу, на перетині з континентальним схилом. Типовими літологічними різновидами досліджених зразків геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми, з яких виділено

частинки твердого органічного вуглецю чорного кольору (чорного вуглецю), на мілководді були черепашки та мулисті черепашки, на глибинах понад 100 м – пелітові мули, а на глибинах понад 500 м – органогенно-теригенні колітофоридові мули.

3.1.3 Літоральна частина північно-західного шельфу на узбережжі України

Кількість частинок твердого органічного вуглецю в пробах геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми геоекосистеми Чорного моря з літоральної частини північно-західного шельфу була також незначною – від 1 до 5 % фракції $< 1 \text{ мм}$ зі щільністю $\rho < 1,8 \text{ г/см}^3$. Розподіл частинок чорного вуглецю не мав чітких особливостей. Їх підвищені концентрації спостерігалися у пробах, відібраних зі зворотних хвильових потоків. У пробах піщаних відкладів присутні частинки чорного вуглецю у незначній кількості (рис. 6).



Рис. 6. Пробовідбір зі зворотних хвильових потоків у межах пляжу м. Південне та частинки твердого органічного вуглецю у відсепарованій речовині зі щільністю $\rho < 1,8 \text{ г/см}^3$

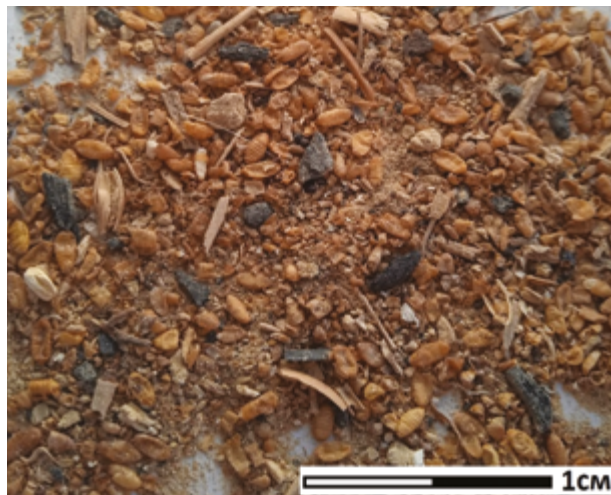


Fig. 6. Sampling from backwash on the beach of the city of Pivdenne and particulate organic carbon in the separated fraction with a density of $\rho < 1.8 \text{ g/cm}^3$

3.2 Ідентифікація твердого органічного вуглецю методом раманівської спектроскопії

У виділених частинках твердого органічного вуглецю проявлялися смуги з частотами 1354 см^{-1} та 1606 см^{-1} , які є характерними для різних алотропних форм вуглецю – вугілля, шунгіту, графіту тощо. При застосуванні збуджуючого випромінювання $\lambda = 532 \text{ нм}$ (рис. 7) у спектрах проявлялися смуги D (disordered) та G (graphitic), які відповідають раманівським спектрам вугілля, сажі або бітуму.

При ідентифікації маленьких фрагментів твердого органічного вуглецю при збудженні 532 нм не завжди вдавалося зареєструвати раманівські спектри через сильне розсіювання збуджуючого лазерного випромінювання, інтенсивність якого на порядки перевищує інтенсивність раманівського розсіювання. В окремих випадках вдавалося зареєструвати спектри, на яких чітко проявляються D- та G-смуги, які, найімовірніше, відповідають вугіллю, сажі або бітуму. При збудженні 457 нм проявлялися фони, інтенсивність яких також не дозволяє ідентифікувати досліджуваний матеріал.

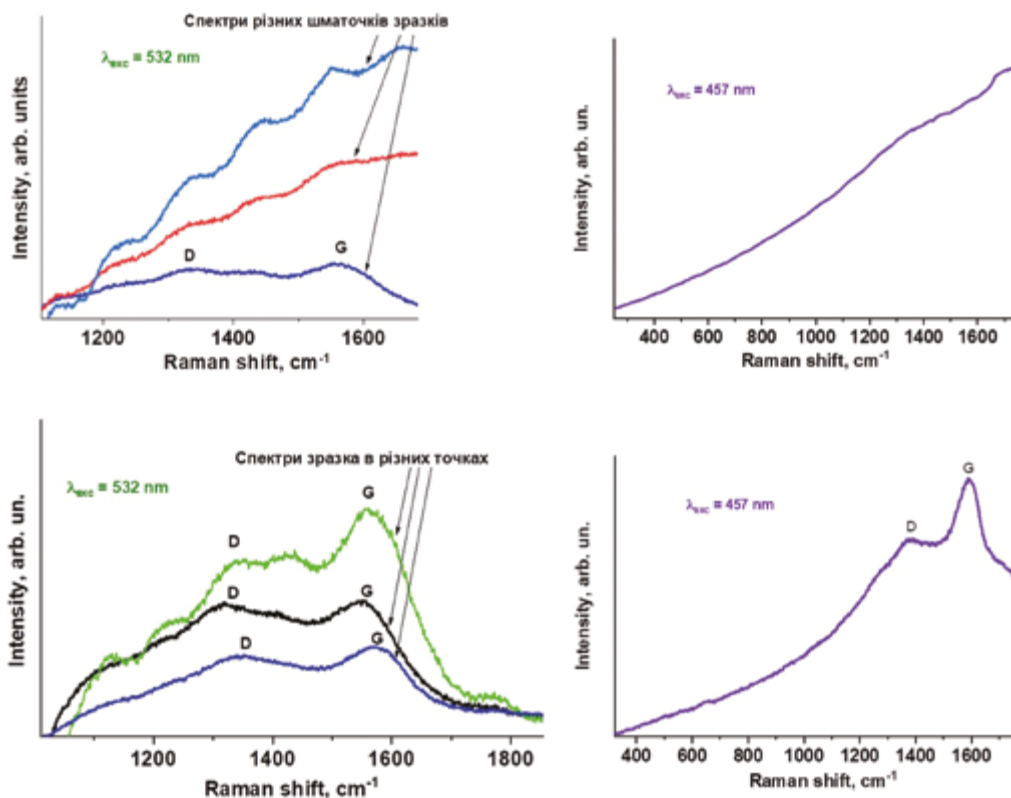


Рис. 7. Раманівські спектри (збудження 532 та 457 нм) частинок твердого органічного вуглецю з Грузинського сектору шельфової зони Чорного моря

Fig. 7. Raman spectra (excitation 532 and 457 nm) of the particulate organic carbon from the Georgian shelf sector of the Black Sea

При збудженні зразків твердого органічного вуглецю розміром понад 500 мкм хвилями $\lambda = 532$ та $\lambda = 457$ нм реєструвалися раманівські спектри, що відповідають вуглецевим матеріалам, у тому числі вугіллю, сажі, бітуму. Для представлених на рис. 7 зразків частинок чорного вуглецю частотні положення D- та G-смуг у різних точках відрізняються за неоднорідністю у різних частинах поверхні з різними співвідношеннями sp^2 та sp^3 гібридизації та аморфного вуглецю, що можна пояснити не лише особливостями генезису частинки, а і вторинними, вірогідно, біогенними процесами в морському середовищі.

3.3 Регіональні відмінності фізико-хімічного складу частинок твердого органічного вуглецю

У складі частинок твердого органічного вуглецю з румунського шельфу було зафіксовано незначну кількість так званих піропластиків – частинок, що за морфологією відповідали вуглецевим фрагментам, а за фізико-хімічним складом – штучним полімерам (рис. 8) (Iemelianov et al., 2024). Це, вірогідно, фрагменти похідних синтетичних полімерів (поліетилену, поліпропілену або їх комбінації), що зазнали інтенсивного температурного впливу (плавлення, горіння або сильне розм'якшення) та механічної деструкції (зокрема, ерозії хвилями та вітром), що робить їх різноманітними за формою та зовнішнім виглядом.

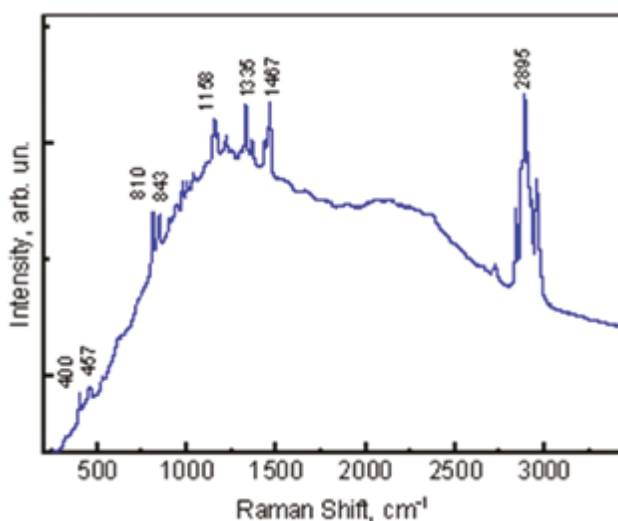


Рис. 8. Раманівський спектр частинки піропластику (шельф Чорного моря, БЕЗ Румунії)

Fig. 8. Raman spectrum of the pyroplastic particle (Black Sea shelf, Romania EEZ)

4 Обговорення

Проведені дослідження свідчать про наявність в геологічному середовищі геолого-екологічної субсистеми геоекосистеми Чорного моря дрібних частинок твердого органічного вуглецю, що, за відсутності в його складі ознак наявності природного вугілля, вказує на теригенний характер цих частинок.

4.1 Питання шляхів надходження та генезису частинок твердого органічного вуглецю

Враховуючи широке розповсюдження вуглецю у земній корі, його темноколірні алотропні модифікації так чи інакше потрапляють в морське геологічне середовище геолого-екологічної субсистеми переважно у вигляді графіту ($\rho = 2,16$ г/см³), викопного вугілля ($\rho = 0,92\text{--}1,7$ г/см³) та продуктів згоряння деревини чи викопних вуглецевмісних палив і паливних продуктів, у тому числі золи, сажі, деревного вугілля ($\rho < 1,5$ г/см³).

Застосована методика зі щільнішим розділенням ($\rho = 1,8$ г/см³) забезпечила виділення у складі частинок чорного вуглецю дрібних фрагментів вугілля або продуктів згоряння вуглецевої речовини вугілля, деревини, рідкого вуглеводневого палива, в тому числі палива для плавзасобів, а також частинок природного походження (зола з лісових пожеж у межах водозбору річок басейну геоекосистеми Чорного моря та його узбережжя), привнесених у водне середовище і в осад.

Зв'язок шляхів і джерел надходження частинок твердого органічного вуглецю з гідрологічними, геоморфологічними, соціальними, промисловими, аграрними та іншими факторами, що впливали і впливають на історію, функціонування, ресурси та розвиток геоекосистеми Чорного моря та, зокрема, її геолого-екологічної субсистеми, не викликає сумнівів. Цей вплив зафіксовано в особливостях розподілу частинок твердого органічного вуглецю в приграничному шарі геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми геоекосистеми Чорного моря з водним середовищем її акваекологічної субсистеми.

4.2 Особливості морфології та гранулометричного складу частинок твердого органічного вуглецю

Розмірність частинок твердого органічного вуглецю, відібраних з геологічного середовища літотальної зони геолого-екологічної субсистеми узбережжя м. Південне та шельфу Румунії (рис. 9),

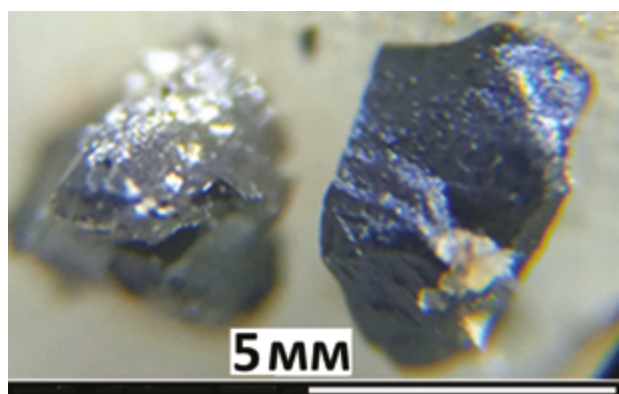
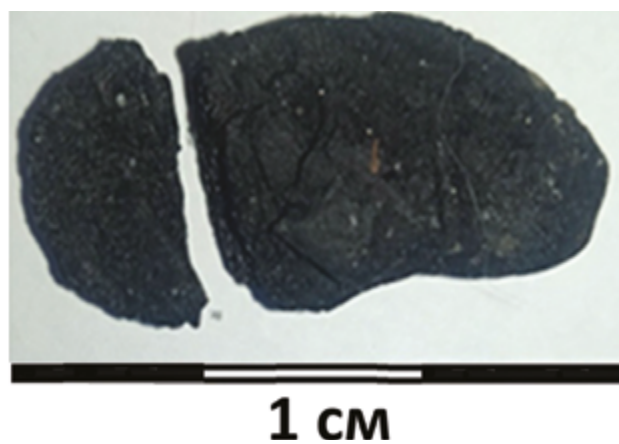


Рис. 9. Розміри окремих частинок твердого органічного вуглецю, виділених з проб шельфової зони Чорного моря в межах БЕЗ Румунії

Fig. 9. Sizes of individual particulate organic carbon particles on the Black Sea shelf, Romania EEZ

сягала значних величин порівняно з такою частинок, виділених з геологічного середовища шельфової зони геолого-екологічної субсистеми Грузії. При цьому вміст частинок твердого органічного вуглецю в пробі, відібраній на грузинському шельфі, багаторазово перевищував вміст частинок твердого органічного вуглецю, виділених з проб геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми інших районів геоекосистеми Чорного моря, зокрема з її північно-західної та західної частин.

Спостерігалася відмінність морфології частинок твердого органічного вуглецю з різних районів поверхневого шару геолого-екологічної субсистеми на границі із суміжною частиною авкаекологічної субсистеми геоекосистеми Чорного моря. Частинок твердого органічного вуглецю з шельфу Грузії, зокрема, відрізнялися переважанням сферичних форм, обумовлених обкатуванням при транспортуванні або особливостями генезису (рис. 10). Такі форми можуть бути обкатаними річками фрагментами продуктів горіння, сферулами, утвореними в повітряному середовищі внаслідок викидів зол при високотемпературних процесах, оплавленими частинками полімерів (піропластиками), дрібними краплями бітуму. На користь останнього припущення вказував максимальний вміст твердого органічного вуглецю у пробі зі станції, розташованої в морі неподалік від м. Поті, гирл річок Інгури та Хобі, біля яких знаходиться велике нафтоховище. Високий вміст таких частинок також може бути зумовлений забрудненням з перевалочної бази нафтопроводу Баку–Батумі, який з 1907 р. й досі експлуатується на узбережжі Грузії, що спричиняє помітні перевищення вмісту нафтопродуктів у прибережних водах. Проте результати наших лабораторних експериментів, проведених з метою виявлення у складі щільнісно виділеної твердої органічної речовини розчинних у гексані сполук (бітумів), свідчать про їх дуже незначну кількість та різке переважання твердого нерозчинного вуглецю сферичної форми.

У Грузинському секторі (станція S3B, поблизу дельти р. Інгури) проведено аналіз вертикального розподілу твердого органічного вуглецю у геологічному середовищі району геолого-екологічної субсистеми геоекосистеми Чорного моря з метою оцінки антропогенного впливу.

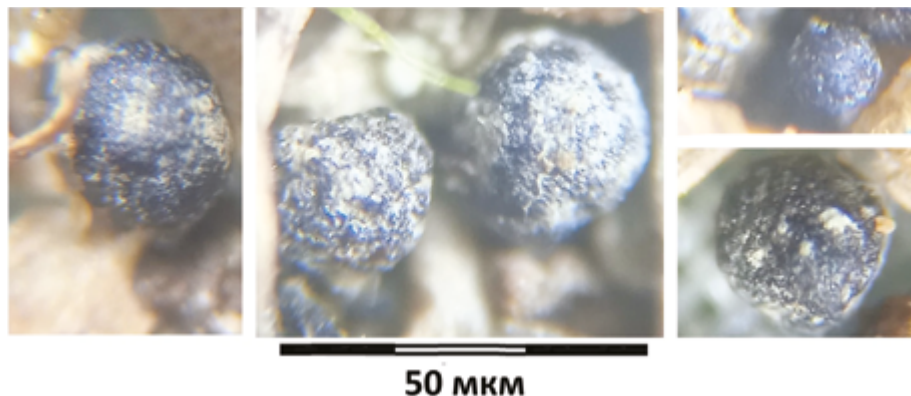


Рис. 10. Обкатані частинки твердого органічного вуглецю, східна частина шельфу Чорного моря, БЕЗ Грузії, на північ від гирла р. Ріоні (станція S3-2, MN256)

Fig. 10. Rounded particulate organic carbon particles, eastern Black Sea shelf, EEZ of Georgia, north of the Rioni River mouth (station S3-2, MN256)

Припускається, що при формуванні геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми в районі грузинського шельфу його приграничний з водним середовищем акваекологічної субсистеми шар має відповідати періоду активної людської господарської діяльності на, зокрема, суміжних суходільних територіях. Тому шари, що підстиляють шар, приграничний із водним середовищем акваекологічної субсистеми, повинні містити меншу кількість антропогенної складової. Якщо твердий органічний вуглець здебільшого є продуктом людської діяльності, а не похідною природних явищ (наприклад, пожеж), його вертикальний розподіл у шарах простору середовища геолого-екологічної субсистеми має суттєво відрізнятися.

Дійсно, аналіз зразків середовища геолого-екологічної субсистеми показав суттєве зменшення кількості твердого органічного вуглецю в шарі інтервалу (5–10 см) у порівнянні з приграничним шаром інтервалу (0–5 см), який мав безпосередній контакт із суміжним шаром водного середовища акваекологічної субсистеми. Не дивно, що у геологічному середовищі приграничного шару геолого-екологічної субсистеми відмічена значно більша кількість рослинних фрагментів. Це може бути наслідком як гідродинамічної нестабільності під час формування сучасного шару геологічного середовища 0–5 см та/або відповідних змін вмісту цієї складової геологічного середовища через її меншу щільність, так і діагенетичних процесів, властивих середовищу геолого-екологічної субсистеми.

Підвищення кількості частинок твердого органічного вуглецю в поверхневому шарі донних відкладів, найбільш вірогідно, пов'язано зі збільшенням антропогенного тиску на навколишнє середовище, що особливо яскраво проявляється в останні століття.

5 Висновки

Твердий органічний вуглець присутній в усіх зразках, відібраних з верхнього 5-сантиметрового шару геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми геоекосистеми Чорного моря (пляжів, шельфові ділянки, ділянки материкового схилу) з різними геоморфологічними особливостями.

Кількісне домінування твердого органічного вуглецю в геолого-екологічній субсистемі шельфової частини геоекосистеми Чорного моря відмічається біля Грузинського узбережжя, що може бути пов'язано з особливостями функціонування засобів

опалення в Грузії та значною щільністю приватної забудови, що межує з узбережжям чи знаходиться на берегах численних річок. Відносно незначна інерція водних потоків річок Ріоні, Інгури, Кодорі, Аджарісцкалі та Хобі при впадінні в Чорне море визначає інтенсивність масового випадіння чорного вуглецю в прибережній зоні.

Відносне різноманіття видів твердого органічного вуглецю (зокрема, наявність піропластиків) та їх широкий діапазон розмірів у середовищі шельфової геолого-екологічної субсистеми геоекосистеми Чорного моря в межах Румунського сектору, як і загальне інтенсивне забруднення західної частини геоекосистеми Чорного моря техногенною речовиною, спричинено переважно впливом стоку р. Дунай.

У північно-західній частині геолого-екологічної субсистеми Чорноморської геоекосистеми на поверхні пляжних зон твердий органічний вуглець має локальний характер розподілу, що, вірогідно, зумовлюється процесами антропогенної діяльності в межах узбережжя, а також акумулюючою функцією геолого-екологічної субсистеми, що динамічно проявляється на поверхні пляжних зон, зокрема у геоекосистемі Дніпро-Бузького лиману, який є резервуаром накопичення теригенної речовини, що приноситься зі стоком відповідних річок.

Виявлене суттєве збільшення вмісту частинок твердого органічного вуглецю у поверхневому шарі середовища геолого-екологічної субсистеми геоекосистеми Чорного моря, порівняно з таким підповерхневих шарів, свідчить про роль твердого органічного вуглецю як важливого індикатора антропогенного впливу на геоекосистему Чорного моря.

Ідентифікація генетичних типів вуглецевих частинок у складі середовища геолого-екологічної субсистеми геоекосистеми Чорного моря має ґрунтуватися на їхніх фізико-хімічних властивостях, морфології та щільності. Генетично такі частинки зазвичай пов'язані зі згорілим вугіллям чи/або деревиною, сажею, продуктами високотемпературних змін пластиків, природних бітумів, продуктами стирання протекторів автомобільної гуми тощо.

Частинки твердого органічного вуглецю можуть бути результатами як природних, так і антропогенних процесів, основні з яких – високотемпературний вплив на вуглецевмісні матеріали, руйнування горючих природних компонентів, перенесення їхніх фрагментів у геолого-екологічну субсистему геоекосистеми Чорного моря головним чином флювіальними та/або аеральними шляхами.

Частинки твердого органічного вуглецю можуть слугувати важливим маркером антропогенного впливу на морське середовище. Кількісні й якісні характеристики твердих вуглецевих частинок, а також особливості їх розподілу у підводному геологічному середовищі можуть нести певну, подекуди унікальну інформацію історико-культурного спрямування, в тому числі щодо важливих рис господарської діяльності людей, звичаїв і традицій, міграційних процесів людських спільнот, що мешкали в доісторичні й історичні часи на сучасних підводних і прибережних територіях Причорномор'я та сучасного шельфу Чорного

моря, а також у басейнах водозбору річок, що до сьогодні мають вплив на геолого-екологічні субсистеми геоекосистеми Чорного моря та, навпаки, знаходяться під впливом останньої.

Це дослідження проведено за тематичними планами Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України» та Інституту геологічних наук НАН України, а також було підтримано DOORS, проектом ЄС «Горизонт 2020», що фінансується в рамках Рамкової програми досліджень та інновацій згідно з грантовою угодою № 101000518.

У статті представлені результати досліджень частинок твердого органічного вуглецю, які було виділено зі зразків геологічного середовища різних частин геолого-екологічної субсистеми донних відкладів геоекосистеми Чорного моря, що сформувалися на різних морфоструктурах дна басейну.

Мета дослідження полягає у вивченні кількісних та якісних характеристик твердого органічного вуглецю, вилученого з донних відкладів Чорного моря як можливого індикатора антропогенного навантаження на морську геоекосистему. Дослідження проведено в шельфових районах і на континентальному схилі Чорного моря в східній, західній та південно-західній частинах басейну, а саме у виключних економічних зонах (ВЕЗ) Румунії та Грузії та літоральній частині шельфу України (Одеська область).

Відбір проб для вилучення частинок на шельфі та континентальному схилі виконано із застосуванням дночерпателя та мультикорера, а в хвиляприбійній зоні узбережжя – фільтруванням завислої речовини поліамідною тканиною з розміром пор 25 мкм.

Лабораторне виділення частинок твердого органічного вуглецю здійснено методом щільнісної сепарації, візуальне дослідження – методом оптичної мікроскопії, фізико-хімічна ідентифікація частинок – методом раманівської спектроскопії. Встановлено належність частинок твердого органічного вуглецю до вугілля, сажі або бітуму. Лабораторні експерименти щодо кількості розчинних (бітумінозних) компонентів показали їх мінімальну кількість у складі досліджених частинок.

Присутність вуглецевих частинок зафіксовано у донних відкладах усіх досліджених районів. Особливості регіонального розподілу таких частинок проявляються в різкому збільшенні їх кількості у складі геологічного середовища геолого-екологічної системи в районі східного шельфу поблизу гирл і дельт річок Грузії, в розмаїтості форм і розмірів частинок вуглецю, з ознаками поліпропілену, виділених з донних відкладів у районі ВЕЗ Румунії (що є, вірогідно, проявом впливу виносів р. Дунай), а також в їх локальному розповсюдженні у відкладах літоральної зони української частини північно-західного шельфу. Такі особливості узгоджуються із загальним ступенем антропогенного навантаження на геоекосистему Чорного моря в цілому та на певні частини її геолого-екологічної субсистеми.

Аналіз кількісного розподілу вуглецевих частинок показав суттєве збільшення їх кількості у приграничному з акватою субсистемою Чорного моря 5-сантиметровому шарі геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми порівняно з такою підстиляючих шарів, більш віддалених від означеної міжсубсистемної границі. Це, найімовірніше, є наслідком інтенсифікації людської діяльності у часовий період історії, впродовж якого і відбувалося накопичення збагаченого таким вуглецем шару геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми. При цьому не можна повністю відкидати можливість впливу на просторовий розподіл твердого органічного вуглецю у просторі зазначеної субсистеми характерних для неї певних діагенетичних процесів.

Частинки твердого вуглецю можуть слугувати одним з перспективних показників антропогенного впливу на Чорноморську геоекосистему та її геолого-екологічну субсистему, а також ступеня інтенсивності такого впливу, можливих джерел і шляхів надходження вуглецевих частинок та інших забруднювачів техногенного походження до геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми тощо. Зокрема, кількісні й якісні характеристики твердих вуглецевих частинок, а також особливості їх розподілу у підводному геологічному середовищі можуть нести певну, подекуди унікальну інформацію історико-культурного спрямування. Наприклад, щодо важливих рис господарської діяльності людей, які мешкали в доісторичні й історичні часи на сучасних підводних і прибережних територіях Причорномор'я та сучасного шельфу Чорного моря, звичаїв і традицій людських спільнот та особливостей міграційних процесів за їх участю, що відбувалися, в тому числі, в сучасних підводних і прибережних районах виявлення частинок твердого органічного вуглецю.

Список літератури / References

- Bao H., Niggemann J., Luo L., Dittmar T., Kao S.J. Aerosols as a source of dissolved black carbon to the ocean. *Nat. Commun.* 2017. Vol. 8. P. 510. <https://www.nature.com/articles/s41467-017-00437-3>
- Briggs N.L., Long C.M. Critical review of black carbon and elemental carbon source apportionment in Europe and the United States. *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 144. P. 409–427. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.002>
- Ceburnis D., Garbaras A., Szidat S., Rinaldi M., Fahrni S., Perron N., Wacker L., Leinert S., Remeikis V., Facchini M.C., Prevot A.S.H., Jennings S.G., Ramonet M., O'Dowd C.D. Quantification of the carbonaceous matter origin in submicron marine aerosol by ^{13}C and ^{14}C isotope analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011. Vol. 11 (16). P. 8593–8606. <https://doi.org/10.5194/acp-11-8593-2011>
- Chen B., Tiwari S., Liu K., Zou J. More Than Half of Emitted Black Carbon Is Missing in Marine Sediments. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. 9739. <https://doi.org/10.3390/su15129739>
- Cong Z., Kang S., Gao S., Zhang Y., Li Q., Kawamura K. Historical trends of atmospheric black carbon on Tibetan Plateau as reconstructed from a 150-year lake sediment record. *Environ. Sci. Technol.* 2013. Vol. 47. P. 2579–2586. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es3048202>
- Coppola A.I., Druffel E.R.M. Cycling of black carbon in the ocean. *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43. P. 4477–4482. <https://doi.org/10.1002/2016GL068574>
- Coppola A.I., Wagner S., Lennartz S.T., Seidel M., Ward N.D., Dittmar T., Santín C., Jones M.W. The black carbon cycle and its role in the Earth system. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2022. Vol. 3. P. 516–532. <https://www.nature.com/articles/s43017-022-00316-6>
- Coppola A.I., Ziolkowski L.A., Masiello C.A., Druffel E.R.M. Aged black carbon in marine sediments and sinking particles. *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 41. P. 2427–2433. <https://doi.org/10.1002/2013GL059068>
- Fang Y., Chen Y., Lin T., Hu L., Tian C., Luo Y., Yang X., Li J., Zhang G. Spatiotemporal Trends of Elemental Carbon and Char/Soot Ratios in Five Sediment Cores from Eastern China Marginal Seas: Indicators of Anthropogenic Activities and Transport Patterns. *Environ. Sci. Technol.* 2018. Vol. 52. P. 9704–9712. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.8b00033>

- Fedoronchuk N., Nasiedkin Y., Kukovska T. Practical evaluation of the effectiveness of different samplers for microplastic analysis in seafloor sediments. *18th International Scientific Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment Monitoring*. 2025. Vol. 2025. P. 1–5. DOI: [10.3997/2214-4609.2025510220](https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510220)
- Galgani F., Ruiz Orejon Sanchez Pastor L., Ronchi F., Talleg K., Fischer E., Matiddi M., Anastasopoulou A., Andresmaa E., Angiolillo M., Bakker Paiva M., Booth A.M., Buhhalko N., Cadiou B., Claro F., Consoli P., Darmon G., Deudero S., Fleet D., Fortibuoni T., Fossi M.C., Gago J., Gerigny O., Giorgetti A., Gonzalez Fernandez D., Guse N., Haseler M., Ioakeimidis C., Kammann U., Kühn S., Lacroix C., Lips I., Loza A.L., Molina Jack M.E., Noren K., Papadoyannakis M., Pragnell-Raasch H., Rindorf A., Ruiz M., Setälä O., Schulz M., Schultze M., Silvestri C., Soederberg L., Stoica E., Storr-Paulsen M., Strand J., Valente T., Van Franeker J.A., Van Loon W., Vighi M., Vinci M., Vlachogianni T., Volckaert A., Weiel S., Wenneker B., Werner S., Zeri C., Zorzo P., Hanke G. Guidance on the monitoring of marine litter in European seas. Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2023. <https://doi.org/10.2760/59137>, JRC133594.
- Gustafsson O., Gschwend Ph.M. The Flux of Black Carbon to Surface Sediments on the New England Continental Shelf. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1998. Vol. 62, iss. 3. P. 465–472. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00370-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00370-0)
- Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C., Thiel M. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46 (6). P. 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>
- Iemelianov V., Nasiedkin Y., Kukovska T., Koshliakova T., Fedoronchuk N., Shuraiev I., Yukhymchuk V. Exploring the microplastics distribution in the bottom sediments of the western Black Sea. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 2024. Vol. 4 (107). P. 104–113. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.107.13>
- Iemelianov V.O., Nasiedkin Y.I., Kukovska T.S., Fedoronchuk N.O., Dovbysh S.M. Microplastics in the geological-ecological subsystem of the coastal part of the geocosystem of the Georgian Shelf. *Mineral resources of Ukraine*. 2025. Vol. 2. P. 89–94. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.2.89-94>
- Jaffé R., Ding Y., Niggemann J., Vähätalo A.V., Stubbins A., Spencer R.G.M., Campbell J., Dittmar T. Global charcoal mobilization from soils via dissolution and riverine transport to the oceans. *Science*. 2013. Vol. 340. P. 345–347. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1231476>
- Jones M.W., Coppola A.I., Santín C., Dittmar T., Jaffé R., Doerr S.H., Quine T.A. Fires prime terrestrial organic carbon for riverine export to the global oceans. *Nat Commun*. 2020. Vol. 11. P. 2791. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16576-z>
- Jones M.W., De Aragão L.E.O.C., Dittmar T., De Rezende C.E., Almeida M.G., Johnson B.T., Marques J.S.J., Niggemann J., Rangel T.P., Quine T.A. Environmental controls on the riverine export of dissolved black carbon. *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2019. Vol. 33. P. 849–874. <https://doi.org/10.1029/2018GB006140>
- Jurado E., Dachs J., Duarte C.M., Simó R. Atmospheric deposition of organic and black carbon to the global oceans. *Atmos. Environ*. 2008. Vol. 42. P. 7931–7939. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.029>
- Lamarque J.F., Bond T.C., Eyring V., Granier C., Heil A., Klimont Z., Lee D., Liousse C., Mieville A., Owen B.M., Schultz G., Shindell D., Smith S.J., Stehfest E., Van Aardenne J., Cooper O.R., Kainuma M., Mahowald N., Mc Connell J.R., Naik V., Riahi K., and Vuuren D.P. Historical (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: Methodology and application. *Atmos. Chem. Phys*. 2010. Vol. 10. P. 7017–7039. <https://acp.copernicus.org/articles/10/7017/2010/>
- La Rowe D.E., Arndt S., Bradley J.A., Estes E.R., Hoarfrost A., Lang S.Q., Lloyd K.G., Mahmoudi N., Orsi W.D., Shah Walter S.R., Steen A.D., Zhao R. The fate of organic carbon in marine sediments – New insights from recent data and analysis. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 204. 103146. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2020.103146>
- Lee Y.H., Lamarque J.F., Flanner M.G., Jiao C., Shindell D.T., Bernsten T., Bisiaux M.M., Cao J., Collins W.J., Curran M., Edwards R., Faluvegi G., Ghan S., Horowitz L.W., McConnell J.R., Ming J., Myhre G., Nagashima T., Naik V., Rumbold S.T., Skeie R.B., Sudo K., Takemura T., Thevenon F., Xu B., Yoon J.H. Evaluation of preindustrial to present-day black carbon and its albedo forcing from Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP). *Atmos. Chem. Phys*. 2013. Vol. 13. P. 2607–2634. <https://acp.copernicus.org/articles/13/2607/2013/>
- Lohmann R., Bollinger K., Cantwell M., Feichter J., Fischer-Bruns I., Zabel M. Fluxes of soot black carbon to South Atlantic sediments. *Global Biogeochem. Cycles*. 2009. Vol. 23. GB1015. <https://doi.org/10.1029/2008GB003253>
- Middelburg J.J., Nieuwenhuize J., Breugel P. Black carbon in marine sediments. *Marine Chemistry*. 1999. Vol. 65, iss. 3–4. P. 245–252. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(99\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(99)00005-5)
- Novakov T., Ramanathan V., Hansen J.E., Kirchstetter T.W., Sato M., Sinton J.E., Sathaye J.A. Large historical changes of fossil-fuel black carbon aerosols. *Geophys. Res. Lett*. 2003. Vol. 30. P. 1324. <https://doi.org/10.1029/2002GL016345>
- Ramanathan V., Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nat. Geosci*. 2008. Vol. 1. P. 221–227. <https://www.nature.com/articles/ngeo156>
- Sánchez-García L., Cato I., Gustafsson Ö. The sequestration sink of soot black carbon in the Northern European Shelf sediments. *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2012. Vol. 26. GB1001. <https://doi.org/10.1029/2010GB003956>
- Tiwari S., Kun L., Chen B. Spatial variability of sedimentary carbon in South Yellow Sea, China: Impact of anthropogenic emission and long-range transportation. *Environ. Sci. Pollut. Res*. 2020. Vol. 27. P. 23812–23823. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-08686-4>
- Tranvik L.J. New light on black carbon. *Nat. Geosci*. 2018. Vol. 11. P. 547–548. <https://www.nature.com/articles/s41561-018-0181-x>
- Wang R., Tao S., Shen H., Huang Y., Chen H., Balkanski Y., Boucher O., Ciais P., Shen G., Li W., Zhang Y., Chen Y., Lin N., Su S., Li B., Liu J., Liu W. Trend in global black carbon emissions from 1960 to 2007. *Environ. Sci. Technol*. 2014. Vol. 48. P. 6780–6787. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es5021422>
- Wulandari I., Katz S., Kelly R.P., Robinson R.S., & Lohmann R. Sedimentary accumulation of black carbon on the East Coast of the United States. *Geophys. Res. Lett*. 2023. Vol. 50. e2022GL101509. <https://doi.org/10.1029/2022GL101509>