

Важкі метали в донних відкладах лиману Сасик

*Ігор Шураєв*¹

к. геол. н., учений секретар, наук. співроб. відділу проблем геології моря та осадового рудоутворення

¹ Державної наукової установи «Центр проблем морської геології,

геоекології та осадового рудоутворення НАН України,

вул. Олеся Гончара, 55-б, м. Київ, 01601, Україна,

e-mail: igorshuraev91@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6289-8632>;

*Тетяна Кулага*¹

мол. наук. співроб. відділу проблем геології моря та осадового рудоутворення,

e-mail: tatianakulaha@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0575-631X>;

*Олександр Паришев*¹

к. геол. н., ст. наук. співроб. відділу проблем геології моря та осадового рудоутворення,

e-mail: paryshev1974@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1318-9650>

У статті наведено результати дослідження донних відкладів лиману Сасик. Експедиційні роботи з відбором зразків провели автори роботи у 2018-2019 рр., за мережею 31 станції. Для відібраних зразків виконано первинний літологічний опис. За його результатами встановлено, що донні відклади водойми представлені переважно чорними мулами, в'язкими, часто з домішкою раковинного детриту. За допомогою геохімічного спектрально-емісійного аналізу визначено валовий вміст важких металів у цих відкладах. Відповідно до отриманих результатів, з'ясовано, що в системі донних відкладів лиману Сасик серед важких металів I класу небезпечності встановлено Pb; серед важких металів II класу небезпечності – Ni, Cu, Cr, Mo; серед важких металів III класу небезпечності виявлені V, Mn та Ba. Для оцінки рівня забруднення цими металами донних відкладів водойми, авторами систематизовано матеріали щодо вмісту цих металів на прилеглих територіях, щодо кларкових значень цих елементів та гранично допустимих концентрацій для ґрунтів. Таким чином, серед усіх досліджених зразків перевищення вмісту Pb над усіма вище зазначеними порівняльними характеристиками встановлено в 19 зразках, Ni – в 10, Cr – в 12, V – у 6 та Cu – в 21. Mn, Mo та Ba значно менш поширені в системі донних відкладів лиману Сасик, їхні підвищені концентрації зустрічаються, лише в поодиноких точках, до того ж інформації щодо їх вмісту на суміжних територіях недостатньо. Також на основі побудов карт поширення металів (з використанням геоінформаційних систем Mapinfo, QGIS, Global Mapper та Surfer) та аналізу мезотополінементів, встановлені закономірності поширення металів у системі донних відкладів водойми та зроблені припущення щодо можливих джерел їх надходження. За результатами вивчення цих матеріалів вдалося з'ясувати, що максимальні концентрації металів спостерігаються при наближенні до основних населених пунктів території, отже, ймовірно, вони пов'язані саме зі стоками цих сіл. Крім того, розподіл Cr та Ni донними відкладами лиману, найімовірніше, контролюється основними напрямками циркуляції води у водоймі. На основі аналізу мезотополінементів, авторами також зроблено припущення щодо можливості міграції цих металів до донних відкладів лиману завдяки геодинаміці тектонічних блоків.

Ключові слова: лиман Сасик, геоекосистема, донні відклади, важкі метали, статистичний аналіз, закономірності поширення металів, антропогенне навантаження, забруднення, лінеаменти тектоніка.

Як цитувати: Шураєв Ігор. Важкі метали в донних відкладах лиману Сасик / Ігор Шураєв, Тетяна Кулага, Олександр Паришев // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2023. – Вип. 58. – С. 386-399. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-29>

In cites: Shuraiev Ihor, Kulaha Tetiana, Paryshev Oleksander (2023). Heavy metals in the bottom sediments of the Sasyk estuary. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (58), 386-399. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-29> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. За даними [1] забруднення довкілля важкими металами відбувається внаслідок їхньої міграції від різноманітних джерел. У разі надходження важких металів до водойм вони розподіляються між водою, донними відкладами та біотою з можливістю взаємного переходу. Вода у водоймах відіграє роль сполучної ланки в ланцюзі міграції речовин до донних відкладів і організмів, що в ній мешкають. Важкі метали можуть міститися у воді в складі різних хімічних сполук, водорозчинній формі чи у вигляді суспензій. Зазвичай основна частина забруднюючих елементів концентрується саме в донних відкладах через їх значну акумулятивну здатність, особливо коли йдеться, як у випадку з лиманами, саме про мулисті відклади. Однак, концентрацій-

на рівновага між водою і донними відкладами може зміщуватися в той чи інший бік. Одними з найважливіших чинників, що впливають на цей процес, є мінералізація та значення рН води водойми.

Ситуацію, що склалася на лимані Сасик сьогодні називають екологічною катастрофою. У другій половині XX ст. було прийняте рішення відділити лиман від моря греблею. Це потрібно було для повного опріснення водойми з метою використання води лиману для зрошення земель. Будівництво каналу тривало протягом 1975-1981 рр. Ідея опріснення лиману з метою використання його вод для зрошування земель виявилася невдалою та нерентабельною, а також згубно вплинула на стан екосистеми самого лиману. Сасик не

вдалось опріснити повністю через гіперсолоність його донних відкладів, вода лиману виявилася непридатною для іригації та будь якого побутового використання. Результатом є зміна умов та враження всіх складових геоекосистеми лиману, яке, слід зазначити, значне настільки, що дозволяє прослідкувати катастрофічно негативний його вплив на здоров'я жителів прибережних громад цієї території. Лікувальні грязі лиману наразі втратили всі свої цінні властивості, береги лиману зазнають абразії, з водами каналу Дунай-Сасик до лиману надходить значна кількість небезпечних сполук та речовин, зокрема, важких металів. Деякі сучасні дослідження вказують на факт підвищеної дитячої смертності та захворюваності на території прилеглих районів [2].

Незважаючи на таку складну ситуацію цей лиман сьогодні залишається недостатньо вивченим. Особливо відчутним є дефіцит наукових даних щодо стану та особливостей донних відкладів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Лиман Сасик являє собою унікальну геоекосистему, що включає в себе відповідні субсистеми – субсистему донних відкладів, аквасубсистему та аеросубсистему, які існують в умовах взаємного впливу [3]. Як було зазначено вище, кожна з них сьогодні вражена та знаходиться в практично критичному стані.

Найбільш дослідженою на сьогодні є аквасубсистема лиману. Для цієї складової описані гідрологічні, гідрохімічні особливості (гідрологічний режим, особливості циркуляції води, мінералізація, температура, солоність та ін.) [4, 5], наведені характеристики біорізноманіття [5, 6] та описані особливості екологічного стану води лиману (вміст важких металів і їх перевищення за різними нормами) [5].

Відносно геологічної складової існує обмежена кількість даних. Зокрема, існують деякі матеріали, що наводять особливості геологічної та тектонічної будови території, на якій знаходиться лиман [7, 8], морфологічну характеристику його берегів [9], особливості його донних відкладів і пересипу [10, 11]. Відповідно до цих досліджень, відомо, що у верхній частині залягають рідкі супісчані мули незначної потужності з домішкою рослинних решток, які в нижній частині переходять у суглинисті мули з потужністю від 0,7 до 7 м. Піщане тіло пересипу має потужність від 2,4 до 5 м, а в місцях древніх прорв ще більшу. Складене воно переважно пісками кварцовими, сірими, дрібнозернистими, сипучими. В основі – потужна товща мулів зеленувато-сірих, важких, з прошарками піску до 15 см, із численними черепашками моллюсків: *Cardium edule*, *Ostrea edulis*, *Bittium reticulatum*, *Chione gallina*, *Nassarius reticulatus*, *Cerituum reticulatum*, *Paphia discrepeus*, *Hydrobia*

ventrosa, *Rissoa membranaces sp.*, *R. Parva*, *Retusa truncutula*, *Mytilus galloprovincialis*, *Dreissena polymorpha*, *Littoglyphus naticoidus*, *Loripes Lacteus*, *Abra ovata*, *Spisula*, *Subtruncata*, *Corbula mediterranea* [11]. За даними [8] мінералогічно в донних відкладах лиману переважає кварц (загальний відсотковий вміст якого коливається від 89 до 98 %). Калієво польові шпати містяться в кількості від 4 до 13 %. Всюди присутній халцедон, кальцит, трапляється мусковіт, біотит та глауконіт. Вміст раковинного детриту коливається в межах від 1,3 до 11 %. У важкій фракції знайдені: гранат, ільменіт, лейкоксен, циркон, турмалін, рутил-анатаз. Середній вміст солей у порових водах лиману – 46 г/л. Основою хімічного складу порових вод є хлорид натрію та хлористий магній, спостерігається підвищений вміст сульфатів кальцію та магнію [8].

Є також деякі роботи, які освітлюють особливості досліджень закономірностей поширення важких металів у донних відкладах лиманів Причорномор'я, прилеглої частини Чорноморського басейну, а також вмісту важких металів у донних відкладах р. Дунай [12, 13, 14, 15, 16, 17].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Наразі, що стосується лиману Сасик, існує низка досліджень, які сконцентровані на вивченні якості його води, однак результатів щодо екологічного стану донних відкладів критично недостатньо. Що сьогодні є актуальним, адже всі три підсистеми геоекосистеми лиману за своєю природою є відкритими системами, тобто геоекосистема донних відкладів постійно обмінюється речовинами та енергією безпосередньо з аквасубсистемою і в меншій мірі з аеросубсистемою. Основою цього обміну та взаємодії однозначно є саме геоекосистема донних відкладів, адже вона має найбільш виражені акумулятивні властивості і є основним індикатором екологічного стану лиману загалом.

Формулювання цілей статті. Власне, тому метою даної статті є дослідження літологічних особливостей донних відкладів лиману Сасик та встановлення закономірностей поширення важких металів у цих відкладах.

Відповідно, для досягнення цієї мети необхідно було виконати наступні завдання:

- провести польові дослідження на території лиману Сасик, відібрати зразки донних відкладів;
- визначити літологічні особливості відкладів та валовий вміст важких металів у їх пробах, також виконати статистичний аналіз отриманих значень щодо вмісту важких металів;
- для встановлення закономірностей просторового поширення металів у відкладах побудувати карти їх розповсюдження;

- проаналізувати існуючі дані щодо вмісту важких металів у донних відкладах суміжних акваторій;
- визначити можливі джерела надходження цих металів до геоекосистеми донних відкладів лиману Сасик та проаналізувати рівень антропогенного впливу на їх накопичення та поширення.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Дослідження донних відкладів лиману Сасик виконані за мережею 31 станції, відібрані проби з приповерхневого шару донних відкладів (рис. 1). Таким чином, фактичним матеріалом роботи є 31 зразок проб донних відкладів озера лиманного типу Сасик, русел та палеорусел річок Когильник і Сарата, а також порід берегового урізу досліджуваної водойми. Авторами роботи було здійснено відбір проб за сіткою точок із моторного човна за допомогою донного черпака Ковш Ван Віна (2л) та орієнтуванням за GPS навігацією. Підготовка проб до аналізу проводилася в лабораторних умовах. Процес включав очистку від детриту,

знешламлення, сушку та дроблення зразків. Геохімічний спектрально-емісійний аналіз [18] на приладі СТЕ-1 був проведений А. А. Таращан у лабораторії Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України. Статистична та картографічна обробка результатів польових, лабораторних та камеральних досліджень виконана за допомогою геоінформаційних систем Mapinfo, QGIS, Global Mapper, Surfer. Статистичний аналіз даних про вміст важких металів, за результатами геохімічного аналізу зразків порід та донних осадів, проведено за допомогою програмних засобів Mapinfo 7, QGIS 3. А саме, використовуючи метод ближнього сусідства шляхом формування тематичних (теплових) карт за сіткою точок спостереження. Дослідження зв'язків накопичення важких металів та тектонічної структури проведено за аналізом мезотектолінеаментів методом виявлення лінійних максимумів у рельєфі району спостереження і побудовою роздіаграм основних напрямків лінеаментів. Аналіз виконано на основі матеріалів радарної зйомки

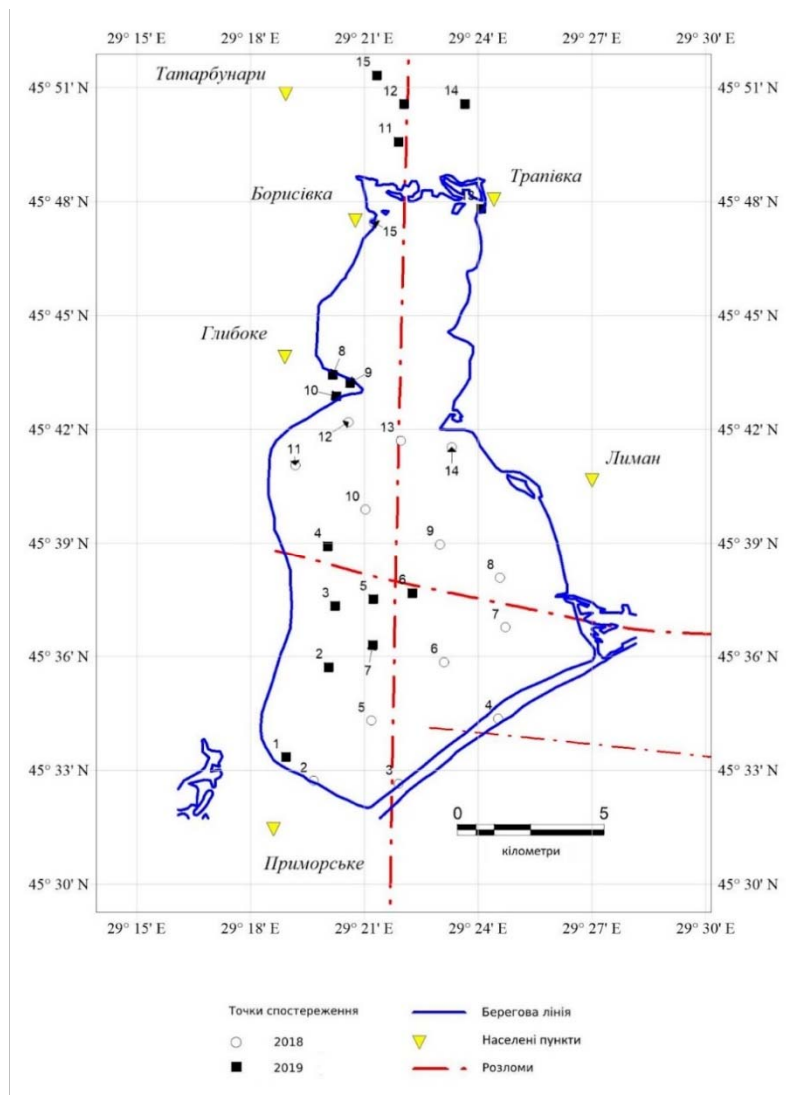


Рис. 1. Карта-схема розміщення станцій відбору проб донних відкладів лиману Сасик / Fig. 1. Map-scheme of Sasyk estuary sediment sampling stations

NASA SRTM (3 arcsec) та гідрографічних даних GEBCO з використанням можливостей Mapinfo 7, QGIS 3, Global Mapper 13, Surfer 13. У роботі використано бази даних та бази знань ПРГП «Причорноморгеології», SAS Planet, EMODnet та Marine Geoscience Data Network GMOD.

Донні відклади лиману, за результатами експедиційних досліджень, представлені, головним чином, мулами сіро-чорними, чорними, в'язкими часто з домішкою раковинного детриту. Рідше донні відклади складені пісками, іноді мулистими, з рясною фауною. Саме мули поширені практично в межах усєї акваторії, піски ж значно менше поширені та фіксуються в південно-західній частині лиману при наближенні до пересипу, також встановлені окремі мозаїчні ділянки їх поширення в прибережній ділянці поблизу с. Борисівка та с. Лиман. Також на ділянці лиману, яка прилегла до с. Борисівка зафіксовано ділянку поширення світло сірих щільних глин, що залягають під шаром раковинного детриту.

Важкі метали з урахуванням їх токсичності, персистентності, гранично допустимих концентрацій та міграційних властивостей поділяються на три класи небезпечності. До I класу небезпечності віднесено As, Cd, Hg, Se, Pb, Zn; до II класу небезпечності – V, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr, а також Ba; V, W, Mn, Sr віднесено до III класу небезпечності [19].

Хімічні елементи As, Hg, Pb і Cd включені Агентством із реєстрації токсичних субстанцій і хвороб (Agency for Substances and Disease Registry, ATSDR) у список 20 найбільш небезпечних для людини [1].

На території лиману Сасик встановлено: серед важких металів I класу небезпечності – Pb; серед важких металів II класу небезпечності – Ni, Cu, Cr, Mo; серед важких металів III класу небезпечності виявлені V, Mn та Ba [19].

Далі ми наводимо основну характеристику щодо вмісту та поширення цих металів у товщі донних відкладів лиману Сасик. Також ми виконали порівняння щодо концентрацій цих металів на прилеглих територіях, щодо кларкових значень цих елементів та гранично допустимих концентрацій для ґрунтів (табл. 1).

Свинець. Цей метал доволі специфічний насамперед через непропорційно високу антропогенну частку в загальному надходженні в навколишнє середовище. Основними антропогенними джерелами надходження цього металу в середовище є стоки гірничодобувної, будівельної, металургійної, машинобудівної, нафтохімічної, легкої, харчової промисловості, поліграфія, виробництво акумуляторів, боеприпасів, кабелів, виплавка кольорових та чорних металів, комунальні стоки, площовий стік з урбанізованих та індустріальних

ділянок. Серед природних джерел виділяється вітрова ерозія ґрунтів, лісові пожежі, вулкани [12].

На розподіл та поширення цього елемента в донних відкладах впливають мала геохімічна рухомість і невисока розчинність елемента та активне поглинання елемента біотою. Такі характеристики призводять до того, що цей метал накопичується безпосередньо біля джерел його надходження, утворює ділянки невеликого поширення та часто пов'язаний із високо біологічно активними ділянками [12].

Аналізуючи наявний матеріал щодо поширення цього металу на прилеглих до лиману Сасик ділянках можна виділити наступні характеристики (табл. 1). На прилеглий ділянці шельфу фоновий вміст свинцю різниться залежно від типу донних відкладів, зокрема, його вміст у мулах становить 25 мг/кг, у пісках – 10 мг/кг [12]. Середній вміст цього металу в донних відкладах Дунаю в межах тієї частини, що прилегла до лиману, становить 15 мг/кг [20]. Також наявні дані про фоновий вміст металу в прилеглих до лиману ґрунтах, де він становить 11 мг/кг [21].

Що стосується саме донних відкладів лиману Сасик, із 31 досліджуваного зразка 19 виявилися забруднені свинцем, із вмістом, який перевищує всі зазначені нормативні характеристики (табл. 1), тобто кларкові значення, ГДК для ґрунтів, фонові та середні значення на прилеглих ділянках. В 10 точках цей елемент відсутній взагалі (у піщаних відкладах у південній частині лиману біля пересипу, у центральній частині лиману, на невеликій території в прибережній частині лиману біля с. Глибоке та у верхній північно-східній частині лиману). Також на деяких ділянках, зокрема, біля пересипу на двох точках спостереження зафіксований незначний вміст свинцю, який не перевищує нормативних значень (рис. 2).

У загальному, первинний статистичний аналіз вказує, що середній вміст цього елемента для системи донних відкладів лиману становить: для пісків – 32 мг/кг, для мулів – 41 мг/кг. Максимальний вміст для пісків становить 100 мг/кг і зафіксований у східній прибережній частині лиману, для мулів – теж 100 мг/кг (значення зафіксовані в південній частині лиману наближеній до пересипу) (табл. 1, рис. 2).

Видно, що забруднення донних відкладів лиману Сасик цим металом носить досить точковий та локальний характер. Можна припустити, що джерелами надходження можуть служити стічні води з населених пунктів на північно-західному узбережжі Сасику та канали, які поєднують водою з Дунаєм і Тузлівською групою лиманів.

Нікель. Надходження цього металу до навколишнього середовища також, головним чином, пов'язують саме з антропогенними чинниками.

Вміст важких металів в донних відкладах лиману Сасик,
в донних відкладах прилеглих акваторій та в прилеглих ґрунтах /
Content of heavy metals in the bottom sediments of the Sasyk estuary,
in the bottom sediments of adjacent water areas and in the adjacent soils

Метал	Pb	Ni	Cr	Cu	V	Mn	Ba
Вміст металу в донних відкладах лиману Сасик (мули), мг/кг	$\frac{41}{0-100}$	$\frac{62}{0-100}$	$\frac{120}{0-300}$	$\frac{81}{0-500}$	$\frac{103}{0-200}$	$\frac{615}{0-1500}$	$\frac{217}{0-800}$
Вміст металу в донних відкладах лиману Сасик (пісок), мг/кг	$\frac{32}{0-100}$	$\frac{27}{0-80}$	$\frac{44}{5-100}$	$\frac{26}{10-50}$	$\frac{64}{0-200}$	$\frac{500}{100-1000}$	$\frac{240}{0-500}$
Кларк, мг/кг [22]	16	58	83	47	90	1000	650
Фоновий вміст металу в ґрунтах північно-західного Причорномор'я, мг/кг [21]	11	29	89	20	64	697	-
Фоновий вміст металу в донних відкладах північно-західної частини Чорного моря (мули), мг/кг [12]	25	67	84	30	98	-	-
Фоновий вміст металу в донних відкладах північно-західної частини Чорного моря (пісок), мг/кг [12]	10	19	25	20	13	-	-
Середній вміст металу в донних відкладах авандельти р. Дунай, мг/кг [23]	14	32	126	22	-	385	-
Середній вміст металу в донних відкладах р. Дунай (в межах України), мг/кг [20]	15	37	24	31	-	600	-
ГДК металу для ґрунтів (валовий вміст), мг/кг [24]	32	-	-	-	150	1500	200

Основними прикладами таких джерел є: промислові стоки (металургія, енергетика, нафтохімія, будівельна індустрія, машинобудування, добувна промисловість), побутові джерела, поверхневий стік із міських територій та скиди осадків стічних вод. Цей елемент значною мірою концентрується також у рідкому паливі та нафті. Нікель також використовується для виробництва сплавів та пестицидів. Природним джерелом надходження цього металу може бути вітрова ерозія ґрунтів [12].

Нікель також характеризується невисокою геохімічною рухомістю тому, подібно до попередньо описаного свинцю, локалізується в безпосередній близькості від джерела надходження і, відповідно, не утворює значних просторових ділянок поширення. У донних відкладах максимально інтенсивно накопичується в дрібних фракціях (мулісті відклади) [12].

Кларк цього елемента в літосфері рівний 58

мг/кг, на прилеглий до лиману акваторії вміст цього металу рідко перевищує це значення. Зокрема, середній вміст нікелю в донних відкладах авандельти р. Дунай становить 32 мг/кг, фоновий вміст у донних пісках північно-західного Причорномор'я – 19 мг/кг, утім існує перевищення над кларком фонового вмісту в донних мулах цієї ділянки, він тут становить 67 мг/кг (табл. 1).

Первинний статистичний аналіз показує, що в донних відкладах лиману Сасик вміст цього елемента становить: для пісків – 27 мг/кг, для мулів – 62 мг/кг. Максимальний вміст для пісків становить 80 мг/кг, для мулів – 100 мг/кг, такі значення характерні для північної частини лиману, яка прилегла до населеного пункту Борисівка (табл. 1, рис. 3).

Серед усіх точок спостережень перевищення над усіма нормативними значеннями зафіксовані в 10 точках, взагалі вміст цього елемента не вияв-

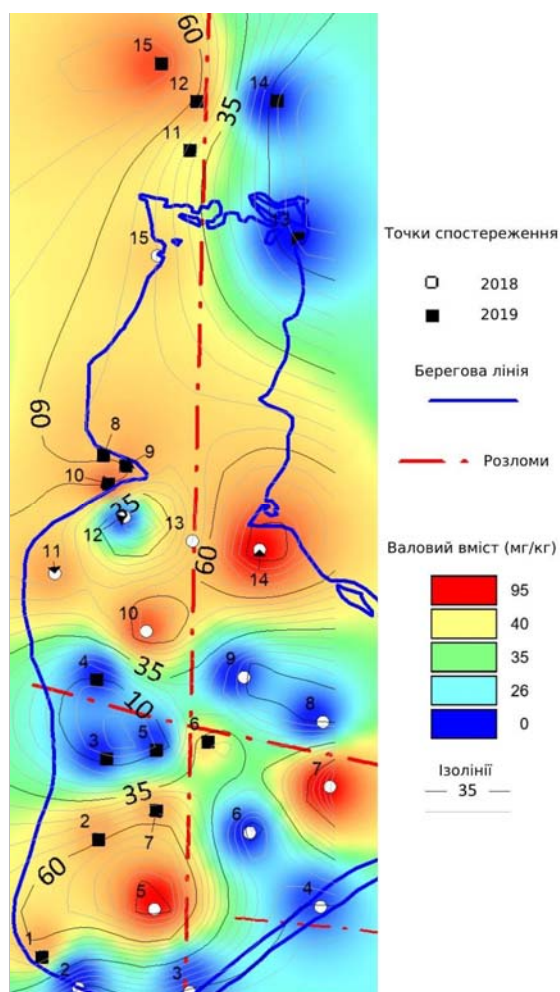


Рис. 2. Вміст Pb в донних відкладах лиману Сасик /
Fig. 2. Pb content in the bottom sediments of the Sasyk estuary

лений у двох точках поблизу с. Глибоке (рис. 3).

У цілому максимальні концентрації цього металу, як було зазначено вище, фіксуються саме в північній частині лиману, у місцях сполучення лиману з річками Когильник та Сарата. Отже, можна припустити, що, ймовірно, цей елемент привноситься до екосистеми лиману саме через цю річкову мережу. Іншим ймовірним джерелом постачання металу є дунайський канал, адже в місцях його сполучення з лиманом також спостерігаються підвищені концентрації цього елемента (80 мг/кг), які далі поширюються в лимані відповідно до загальної схеми циркуляції води в ньому (рис. 3 (а, б)).

Хром. Основним джерелом постачання цього металу в навколишнє середовище є стоки підприємств машинобудівної, металургійної, хімічної, легкої промисловості, також площинний стік з індустріальних, сільськогосподарських ділянок та комунальні стічні води [12].

Цей метал інертний та малорухомий, також він погано накопичується в біоті. Отже, він локалізується близько від джерела надходження [12].

Кларкове значення цього елемента в літосфе-

рі становить – 83 мг/кг [22]. Вміст хрому в донних відкладах лиману Сасик у переважній більшості точок спостереження дещо перевищує кларкове значення (табл. 1). Таким чином, максимальний вміст цього металу зафіксований на ділянці сполучення лиману з дунайським каналом у мулистих відкладах (300 мг/кг). Середній вміст металу в мулистих відкладах лиману становить 120 мг/кг. Ще в кількох точках зафіксовані значення 200 мг/кг.

Характер поширення елемента в межах геоекосистеми донних відкладів лиману певною мірою корелюється з характером циркуляції води в ньому. Підвищені значення вмісту також зафіксовані поблизу с. Борисівка, у мулистих відкладах, ймовірно, метал туди привнесений разом із водами з каналу. Стосовно піщаних відкладів, максимальні концентрації металу в пісках становлять 100 мг/кг, такі значення фіксуються в північній та східній прибережних частинах лиману (рис. 4 (а, б)).

Вміст хрому в донних відкладах лиману Сасик є доволі високим порівняно із суміжними територіями та перевищує їх фонові значення.

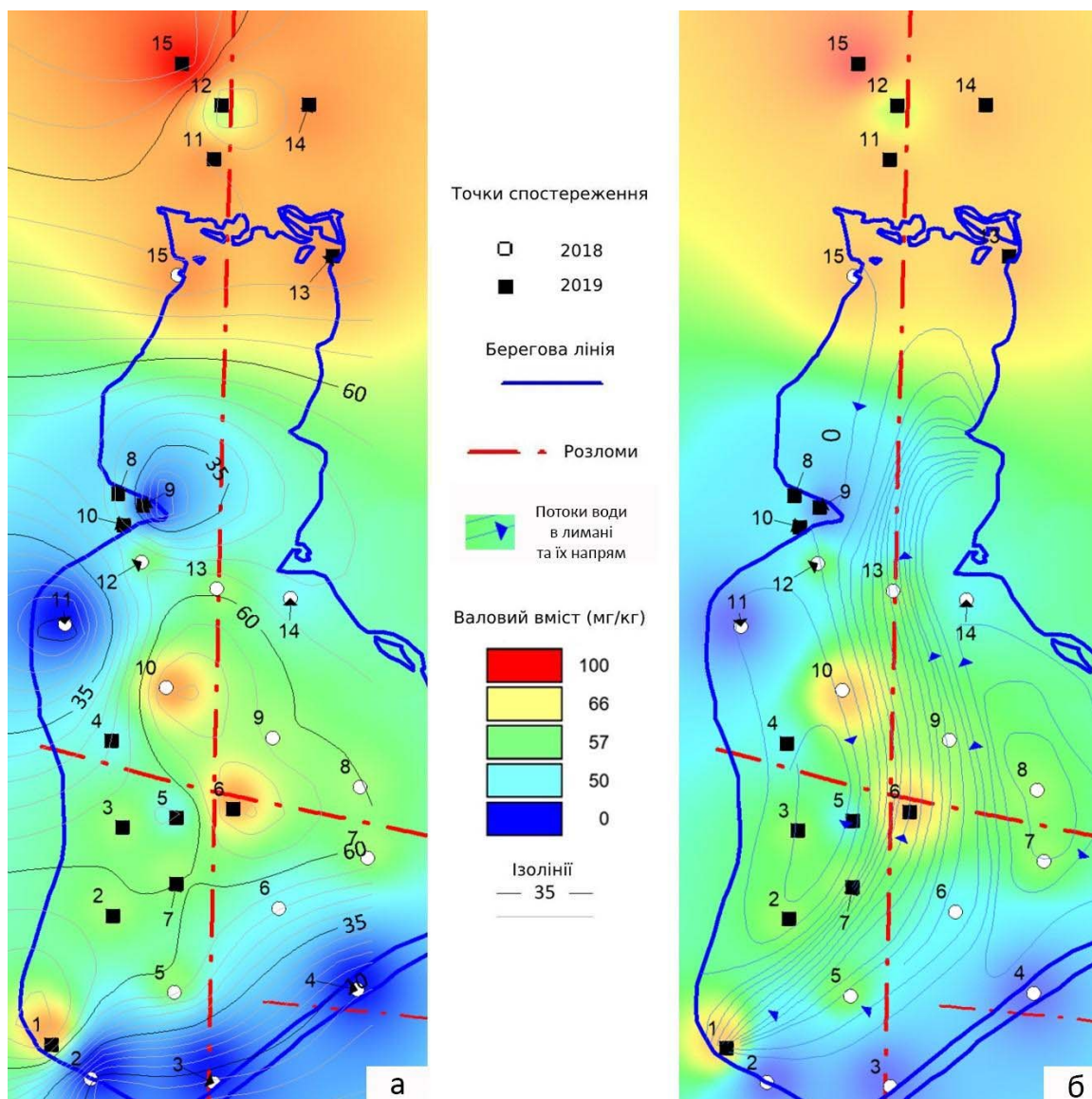


Рис. 3. Вміст Ni в донних відкладах лиману Сасик (а) та його співвідношення із напрямками циркуляції води (б) / Fig. 3. Ni content in the bottom sediments of the Sasyk estuary (a) and its correlation with water circulation directions (б)

Так, наприклад, фоновий вміст металу в грунтах прилеглої до лиману території становить – 89 мг/кг. Фоновий вміст у донних відкладах північно-західного Причорномор'я для мулів становить – 84 мг/кг, для пісків – 25 мг/кг. Середній вміст у донних відкладах авандельти р. Дунай становить 126 мг/кг (табл. 1).

Мідь. На відміну від вище описаних елементів метал дуже рухомий та доволі інтенсивно накопичується в біоті. Основними джерелами надходження елемента в середовище є стоки металургійної, хімічної, машинобудівної промисловості та сільського господарства, скидні води, площовий злив із сільськогосподарських ділянок. Вищезазначені чинники визначають сезонну мінливість поширення міді в донних відкладах лиману [12].

У мулах лиману Сасик середній вміст елемента становить 81 мг/кг, у пісках – 26 мг/кг, що у випадку з піщаними відкладами перевищує кларкові значення елемента (47 мг/кг). У пісках максимальні значення фіксуються в північній частині лиману (50 мг/кг). У мулах максимальний вміст цього елемента зафіксований у південно-західній прибережній частині лиману (500 мг/кг). Підвищені значення також притаманні для західної прибережної частини лиману, яка прилегла до населеного пункту Глибоке (табл. 1, рис. 5).

У межах прилеглих акваторій вміст металу значно менший від вищеприписаного в лимані. Зокрема, у межах прилеглої акваторії шельфової зони північно-західного Причорномор'я фоновий вміст міді в пісках становить 20 мг/кг, у мулах – 30 мг/кг. У донних відкладах авандельти р. Дунай се-

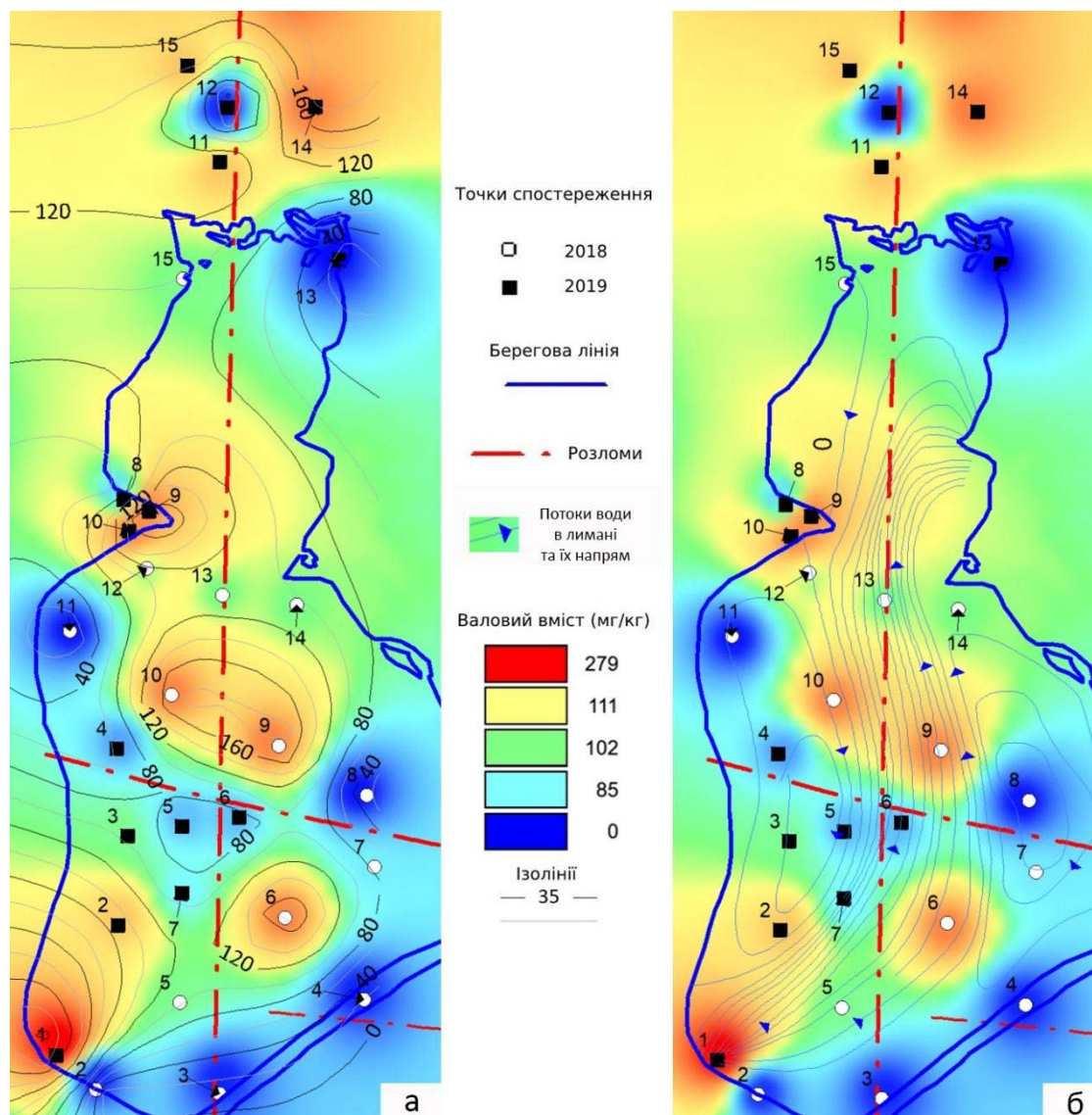


Рис. 4. Вміст Cr в донних відкладах лиману Сасик (а) та його співвідношення із напрямками циркуляції води (б) /

Fig. 4. Cr content in the bottom sediments of the Sasyk estuary (a) and its correlation with water circulation directions (б)

редній вміст елемента становить 22 мг/кг (табл. 1).

Ванадій. Метал, переважно, міститься в рідкому паливі та нафтах. Він використовується в металургії, хімічній та легкій промисловості, тому, власне, головним джерелом його надходження в атмосферу є металургійні стічні води [12].

Кларк цього елемента в земній корі дорівнює 90 мг/кг, у донних відкладах лиману Сасик концентрація цього металу практично на кожній точці випробування перевищує це значення. Середнє значення вмісту елемента для пісків дорівнює 64 мг/кг, для мулів воно значно вище – 103 мг/кг. Максимальні концентрації елемента серед піщаних відкладів (200 мг/кг) зафіксовані в прибережній північній частині лиману поблизу населеного пункту Борисівка, максимальні концентрації серед мулів (200 мг/кг) фіксуються в центральній частині лиману, і також, поблизу вищезгаданого с.

Борисівка (табл. 1, рис. 6).

Для прилеглих до лиману ґрунтів характерне фонове значення вмісту ванадію – 64 мг/кг. Для донних відкладів північно-західної шельфової зони Чорного моря фоновий вміст для пісків становить 13 мг/кг, для мулів – 98 мг/кг (табл. 1).

Манган. Кларк цього елемента в земній корі дорівнює 1000 мг/кг. На жаль, даних щодо фонового вмісту мангану в донних відкладах шельфової зони північно-західного Причорномор'я недостатньо, однак є дані щодо фонового вмісту в прилеглих до лиману ґрунтах, де він визначений у 697 мг/кг, треба зауважити, що ГДК цього елемента для ґрунтів становить 1500 мг/кг. Існують також матеріали, які вказують, що середній вміст мангану в донних відкладах річки Дунай визначений у 600 мг/кг (табл. 1).

Що стосується безпосередньо донних відкла-

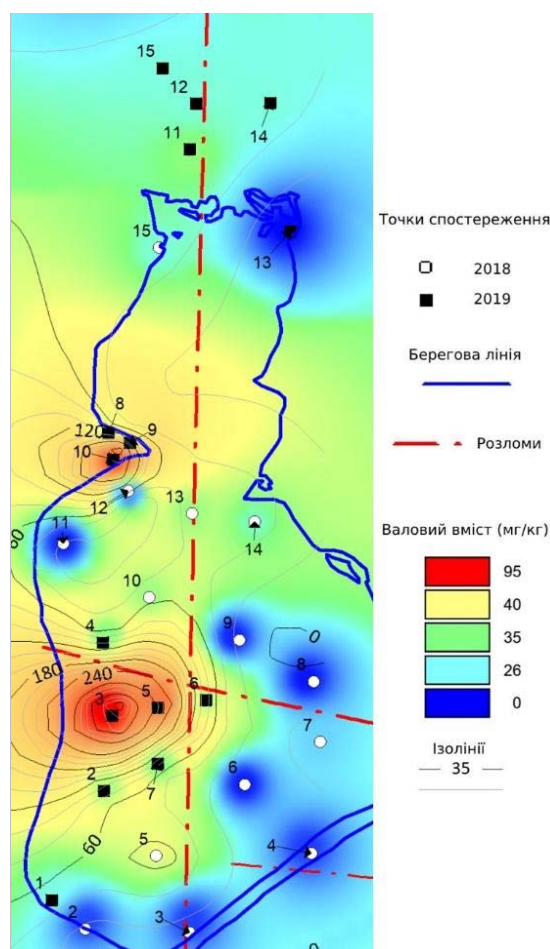


Рис. 5. Вміст Cu в донних відкладах лиману Сасик /
Fig. 5. Cu content in the bottom sediments of the Sasyk estuary

дів лиману Сасик, перебільшення концентрації цього елемента над кларковим значенням зафіксоване, лише в межах однієї точки спостереження, у прибережній частині лиману поблизу населеного пункту Глибоке в мулистих відкладах (1500 мг/кг). Загалом середній вміст мanganу в мулистих відкладах лиману становить 615 мг/кг, у пісках – 500 мг/кг. Максимальні значення в піщаних відкладах рівні кларковому значенню – 1000 мг/кг і фіксуються в частині лиману, яка наближена до с. Борисівка. Отже, високі концентрації цього металу притаманні для центральної частини лиману із прив'язкою до населених пунктів Глибоке та Борисівка, ймовірно, джерело його надходження є саме антропогенним і пов'язане воно зі скидами цих сіл (табл. 1).

Крім вище описаних елементів у донних відкладах лиману Сасик зафіксовані також підвищені концентрації молібдену та барію.

Зокрема, щодо *молібдену*, вміст цього елемента в земній корі визначається кларковим значенням 1,1 мг/кг [22], на жаль, даних щодо вмісту цього металу в донних відкладах суміжних акваторій та ґрунтів немає. Безпосередньо в донних відкладах лиману зафіксоване єдине перевищення

над кларковим значенням у верхній частині лиману, у мулистих відкладах (2 мг/кг). Загалом з усіх відпрацьованих зразків, вміст цього металу зафіксований, крім вище зазначеної точки, ще в семи точках, у кожній із яких він практично рівний кларковому значенню.

Барій. Серед усіх точок спостереження перевищення концентрації цього елемента над кларковим значенням (650 мг/кг) зафіксоване, лише в одній точці спостереження біля сполучного каналу із р. Дунай, вміст тут становить – 800 мг/кг (мули). У загальному, середній вміст цього металу для мулистих донних відкладів лиману становить 217 мг/кг, у пісках – 240 мг/кг. Максимальний вміст, який визначений у пісках дорівнює 500 мг/кг і зафіксований він у верхів'ї лиману (табл. 1).

Зауважимо, що крім видимих антропогенних чинників, які можна виділити за схемами розповсюдження важких металів, ми також можемо припустити, що розподіл і вміст важких металів у донних відкладах контролюється також неотектонічним фактором.

Таким чином, вивчення лінеаментно-тектонічної структури району, дозволило нам виділити геологічні чинники маршрутів міграції елементів.

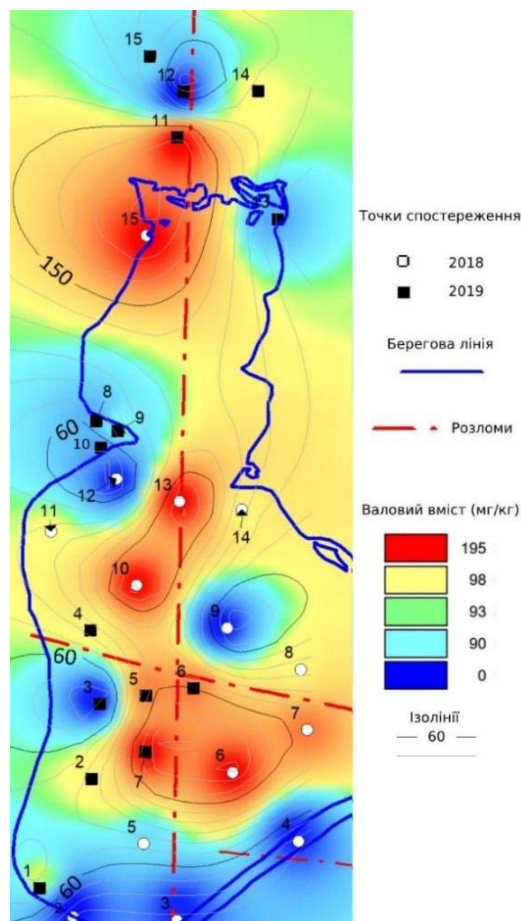


Рис. 6. Вміст V в донних відкладах лиману Сасик /
 Fig. 6. V content in the bottom sediments of the Sasyk estuary

Аналіз мезотополінементів, що сформовані за моделлю цифрового рельєфу NASA SRTM, з побудовою роз-діаграм основних напрямків лінементів виконано за раніше використаною методикою [25]. У результаті такого аналізу, узбережжя

лиману Сасик та його сусідні регіони розділено на 9 основних районів, для яких характерні свої кутові характеристики в межах змін рельєфу та розривних порушень (рис. 7).

Дослідження роз-діаграм показало (рис. 8),

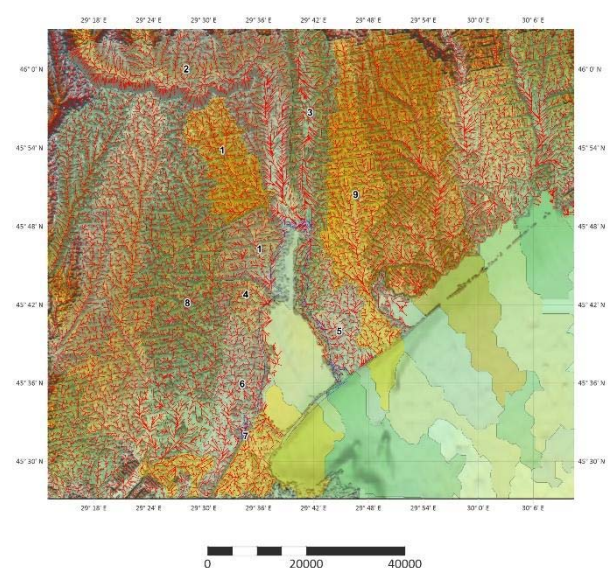


Рис. 7. Мезотополінементи навколо лиману Сасик /
 Fig. 7. Mesotopolineaments around the Sasyk estuary

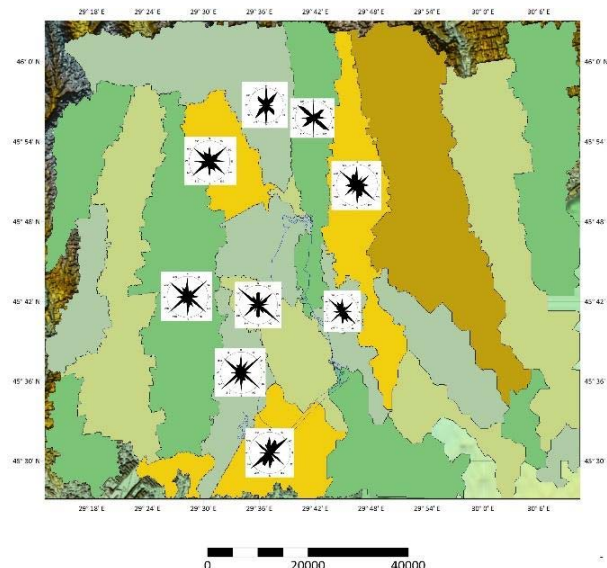


Рис. 8. Лінеаментно-тектонічне районування та рози-діаграми узбережжя лиману Сасик /
 Fig. 8. Lineament-tectonic zoning and rose diagrams of the Sasyk estuary coast

що для більшості ділянок найвагомішим напрямком лінементів є напрямки зони Терсейра-Торнквіста, яка на території України приурочена до ділянки переходу від Українського щита до Передобруджинського прогину. Також розповсюдження мають напрямки 45° - 50° , які характерні для четвертинних розривних порушень, що контролюють неотектоніку регіону.

За аналізом схеми ми можемо припустити, що ймовірні шляхи постачання важких металів у лиман Сасик можуть відбуватися через тектонічні блоки, що відповідають за річкові системи Когильник та Сарата з півночі, дунайського напрямку з південного заходу, структурні райони біля сіл Борисівка та Глибоке з північного заходу. Менш інтенсивно на район впливають структури з моря, структура біля с. Трапівка та західного узбережжя лиману.

Такі процеси корелюються з геохімічними аномаліями важких металів, поряд із гідродинамікою водойми, у межах лінементно-тектонічних блоків та основних тектонічних розломів району дослідження, де молода лінементна мережа, за вивченням роз-діаграм, виражена в сучасному рельєфі та адаптує (вибірково використовує) ансамблі більш давніх розломів і плікативних структур докембрійського фундаменту.

Висновки. За результатами проведених експедиційних досліджень донних відкладів лиману Сасик, на основі вивчення 31 зразка, нам вдалося встановити основні особливості літологічного складу цих відкладів, а також, використовуючи спектрально-емісійний аналіз, визначити валовий вміст важких металів у їх складі. За допомогою побудови карт поширення цих елементів та схем мезотополінементів ми змогли прослідкувати основні закономірності поширення металів системою донних відкладів лиману та зробити припущення щодо можливих джерел їх привнесення.

Також ми проаналізували результати досліджень щодо вмісту металів у донних відкладах та ґрунтах суміжних територій.

Літологічно донні відклади представлені в'язкими сіро-чорними, чорними мулами, часто з домішкою раковинного детриту. При наближенні до пересипу в південно-західній частині лиману донні відклади складені пісками, іноді мулистими з рясною фауною. Піски також зустрічаються в прибережній ділянці поблизу сіл Борисівка та Лиман, де утворюють невеликі мозаїчні ділянки. На території лиману Сасик серед важких металів у концентраціях, які перевищують існуючі нормативні характеристики встановлені: Pb, Ni, Cu, Cr, Mo, V, Mn та Ba.

Найінтенсивніше зазначені елементи накопичуються в мулистих відкладах, саме там і фіксується їх максимальний вміст. Поширення металів акваторією лиману має переважно точковий характер, часто контролюється основними напрямками циркуляції води. Максимальні концентрації елементів, переважно, приурочені до прибережних частин лиману, які наближені до основних населених пунктів території, та, ймовірно, привносяться до геоекосистеми водойми саме за рахунок стічних вод цих сіл. Крім того, підвищений вміст металів також спостерігається на ділянках сполучення лиману з дунайськими каналом і річками Когильник та Сарата. Відповідно до результатів аналізу лінементно-тектонічної структури району, ми припускаємо, що шляхи постачання важких металів у лиман Сасик можуть відбуватися через тектонічні блоки, що відповідають за річкові системи Когильник та Сарата, дунайський напрямок та структурні райони біля сіл Борисівка, Глибоке. Менш інтенсивно на район впливають структури з моря, західного узбережжя лиману та структура біля с. Трапівка.

Список використаної літератури

1. Надходження і міграція важких металів наземними та водними екосистемами [Текст] / В.М. Войціцький [та ін.] // Біоресурси і природокористування. – 2019. – Т. 11, № 1-2. – С. 59–68. DOI: <https://doi.org/10.31548/bio2019.01.007>.
2. Ковальчук Л.Й. Сучасний еколого-гігієнічний стан водних об'єктів українського Придунав'я [Текст] / Л.Й. Ковальчук, А.В. Мокієнко // Актуальные проблемы транспортной медицины. – 2014. – № 3 (37). – С. 171–183.
3. Смельянов В.О. Історія та перспективи дослідження причорноморських лиманів [Текст] / В.О. Смельянов, Т.Б. Кулага // Геологія і корисні копалини Світового океану. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 64–75. DOI: <https://doi.org/10.15407/gpimo2020.03.064>.
4. Ляшенко А.В. Гидролого-гидрохимическая характеристика лимана Сасык и Сасыкского водохранилища [Текст] / А.В. Ляшенко, Е.Е. Зорина-Сахарова // Гидробиологический журнал. – 2016. – Т. 52, № 6. – С. 99–109.
5. Ляшенко А.В. Гидроэкологическая характеристика лимана Сасык и Сасыкского водохранилища [Текст] / А.В. Ляшенко, Е.Е. Зорина-Сахарова // Гидробиологический журнал. – 2017. – Т. 53, № 1. – С. 28–46.
6. Халаим А.А. Макрозообентос водохранилища Сасык в современных экологических условиях [Текст] / А.А. Халаим, М.М. Джуртубаев, В.В. Заморов // Гидробиологический журнал. – 2016. – Т. 52, № 6. – С. 60–67.
7. Рыбаков Н.П. Серия причерноморская. Лист L-35-XXIV, XXX [Текст] / Н.П. Рыбаков, Л.С. Арбузов, П.С. Сурнина // Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Объяснительная записка / ред. Г.И. Молякко. – Киев, 1973. – 70 с.

8. Геология шельфа УССР. Лиманы [Текст] / И.И. Молодых [та ін.]; ред. Е.Ф. Шнюков. – Киев: Наукова думка, 1984. – 176 с.
9. Шуйский Ю.Д. Опыт анализа антропогенной перестройки естественного лимана на северо-западном побережье Черного моря [Текст] / Ю.Д. Шуйский, А.А. Стоян // Экологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу: Зб. наук. пр. – 2011. – Т. 1, № 25. – С. 38–48.
10. Садчикова Т.А. Позднечетвертичная история лиманов северо-западного Причерноморья [Текст] / Т.А. Садчикова, А.Л. Чепалыга // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – 1999. – № 63. – С. 76–85.
11. Гранова А.К. Геологічна будова узбережжя кайнозойських відкладів Сасицького лиману (північно-західне Причорномор'я) [Текст] / А.К. Гранова, В.О. Волинська // Геологічний журнал. – 2014. – № 3(348). – С. 39–44.
12. Экогеохимия Чорного моря: монографія [Текст] / ред. Митропольський О.Ю., Наседкін Є.І, Осокіна Н.П. – Київ: дім «Академперіодика» НАН України, 2006. – 277 с.
13. Исследования уровня загрязнения тяжельми металами донних отложений Куяльницкого лимана [Текст] / Г. Н. Шихалева [та ін.] // Вісник ОНУ. Сер. Хім. – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 70–77.
14. Характеристика антропогенного забруднення пелоїдів причорноморських лиманів [Текст] / О.М. Нікіпелова [та ін.] // Вісник ОНУ. Сер. Хім. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 46–51.
15. Дятлов С.Є. Міжрічна мінливість вмісту важких металів у воді та донних відкладах полігону «Одеський регіон ПЗЧМ» [Текст] / С.Є. Дятлов, О.В. Чепіжко, В.О. Урдя // Экологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу: Зб. наук. пр. – 2012. – Т. 1, № 26. – С. 257–269.
16. Дятлов С.Є. Донні відкладення південної частини Хаджибейського лиману в умовах хронічного забруднення [Текст] / С.Є. Дятлов, О.В. Кошелев, С.О. Запорожець // Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біолог. – 2017. – № 2. – С. 60–64.
17. Мельников А.Ю. Акумуляція важких металів у біоценозі дельти Дунаю [Текст] / А.Ю. Мельников // Экологічні науки. – 2018. – № 2(21). – С. 138–142.
18. Зінчук В.К. Фізико-хімічні методи аналізу : навч. посіб. [Текст] / В.К. Зінчук, Г.Д. Левицька, Л.О. Дубенська. – Львів : Вид. центр ЛНУ ім. Ів. Франка, 2008. – 362 с.
19. ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения (64456) [Електронний ресурс] // ДНАОП - Нормативно-правовая библиотека инструкции документы. – Режим доступу: https://dnaop.com/html/64456/doc-ГОСТ_17.4.1.02-83.
20. Васенко О.Г. Важкі метали в донних відкладах р. Дунай на території України [Текст] / О.Г. Васенко, А.Ю. Мельников // Экологічна безпека. – 2018. – Т. 25, № 1. – С. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.1.26-31>
21. Фононий вміст мікроелементів у ґрунтах України [Текст] / ред.: А.І. Фатєєв, Я.В. Пащенко. – Харків : ННЦ «Ін-т ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Сокол.», 2003. – 72 с.
22. Виноградов А.П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре [Текст] / А.П. Виноградов // Геохимия. – 1956. – № 1. – С. 7–52.
23. Кудря С.П. Накопичення важких металів у донних відкладах авандельти Дунаю [Текст] / С.П. Кудря // Вісник ОНУ. Географія. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 176–186.
24. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин [Електронний ресурс] // Офіційний вебпортал парламенту України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-n#Text>.
25. Automated morphometric analysis and its application to tectonic zonation [Electronic resource] / I.E. Lomakin [et al.] // 16th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects, Kiev, May 15-17, 2017. – 2017. – P. 1–4. – DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701881>.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Heavy metals in the bottom sediments of the Sasyk estuary

Ihor Shuraiev¹,

PhD (Geology), Scientific Secretary, Scientific Researcher of Department of Problems of Marine Geology and Sedimentary Ore Formation of

¹ State Scientific Institution «Center for Problems of Marine Geology, Geoecology and Sedimentary Ore Formation of the NAS of Ukraine», 55-b O. Honchara St., Kyiv, 01601, Ukraine;

Tetiana Kulaha¹,

Junior Researcher of Department of Problems of Marine Geology and Sedimentary Ore Formation;

Oleksander Paryshev¹,

PhD (Geology), Senior Researcher of Department of Problems of Marine Geology and Sedimentary Ore Formation

ABSTRACT

Purpose. The main aim of research is to study the bottom sediments of the Sasyk estuary, in particular, to establish their lithological characteristics and the peculiarities of the distribution of heavy metals in their layers.

Method. The research was done with the results of the expedition work carried out in 2018-2019, 31 samples of the bottom sediments of the Sasyk estuary, channels and paleochannels of the Kogylnyk and Sarata rivers, and rocks of the shoreline of the studied reservoir were selected. We carried out sampling along the network of 31 stations from a motor boat using a bottom-grab and orientation by GPS navigation. The content of heavy metals was determined using geochemical spectral emission analysis. Statistical and cartographic processing of the research results was carried out using geographic information systems Mapinfo, QGIS, Global Mapper and Surfer. Also, to establish the possible routes of metal migration, we used the analysis of mesotopolineaments formed according to the NASA SRTM digital terrain model, with the construction of rose diagrams of the main directions of the lineaments.

The results. We established that the bottom sediments were represented mainly by grey-black, black, viscous silt, often with an admixture of shell detritus. Less often, they were composed of sand, sometimes muddy with abundant fauna. We also determined the content of heavy metals in the system of bottom sediments, features of their distribution and possible ways of infusing. Thus, in the territory of the Sasyk estuary, heavy metals of the first (Pb), second (Ni, Cu, Cr, Mo) and third (V, Mn, Ba) hazard class are found in high concentrations.

The average content of Pb for the bottom sediment system of the estuary is: for sand – 32 mg/kg, for silt – 41 mg/kg. The maximum content for both is 100 mg/kg. The average Ni content is: for sand – 27 mg/kg, for silt – 62 mg/kg. The maximum content for sand is 80 mg/kg, for silt – 100 mg/kg. The average Cu content in the silt of the Sasyk estuary is 81 mg/kg, and 26 mg/kg in the sand. An elevated content of Mn, Ba and Mo was also found in several samples.

Often areas with increased concentrations of metals have a point character. In almost all cases, they are connected to the river systems adjacent to the pond. The distribution of some metals is correlated with the main directions of estuary water circulation. Wastewater is a likely source of metals entering the estuary geoecosystem. We also assume that the migration of these elements to the pond may occur through tectonic blocks.

Scientific novelty. For the first time in recent years, we have carried out expeditionary work on research of the bottom sediments of the Sasyk estuary, along the complete network of the station. We obtained the data on the gross content of heavy metals, and determined their average, maximum and minimum concentrations. For the first time, maps of the spatial distribution of metals were constructed, which made it possible to establish the main regularities of their accumulation in the bottom sediment system of the pond.

Practical significance. Pollution of the bottom sediments of the Sasyk estuary with heavy metals is one of the components of today's critical ecological state of the pond, which affects the well-being of the residents of the surrounding areas. The obtained results can be used at the state level to create effective programs for quality management of the resource potential of the estuary.

Keywords: Sasyk estuary, geoecosystem, bottom sediments, heavy metals, statistical analysis, distribution patterns of metals, anthropogenic load, pollution, lineament tectonics.

References

1. Voitsitskiy, V.M., Khyzhnyak, S.V., Danchuk, V.V., Mityk, S.V., Kepple, O.Y., Ushkalov, V.O. (2019). The infake and migration heavy metals of terrestrial and aquatic ecosystems. *Biological Resources and Nature Management*, 11(1-2), 59–68. <https://doi.org/10.31548/bio2019.01.007>. [in Ukrainian]
2. Kovalchuk, L.J., Mokienko, A.V. (2014). Modern environmental and health conditions of water objects of Ukrainian Danube region. *Actual problems of transport medicine*, 37(3), 171–183. [in Ukrainian]
3. Yemeliyanov, V.O., Kulaha, T.B. (2020). History and prospects of research of the Black Sea estuaries. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 16(3), 64–75. <https://doi.org/10.15407/gpimo2020.03.064>. [in Ukrainian]
4. Lyashenko, A.V., Zorina-Sakharova, Y.Y. (2016). Hydrological and hydrochemical characteristics of the Sasyk estuary and the Sasyk reservoir. *Hydrobiological Journal*, 52(6), 99–109. [in Russian]
5. Lyashenko, A.V., Zorina-Sakharova, Y.Y. (2017). Hydroecological Characteristics of the Sasyk Liman and the Sasyk Reservoir. *Hydrobiological Journal*, 53(1), 28–46. [in Russian]
6. Khalaim, A.A., Dzhurtubayev, M.M., Zamorov, V.V. (2016). Macrozoobenthos of the Sasyk Reservoir in Actual Ecological Conditions. *Hydrobiological Journal*, 52(6), 60–67. [in Russian]
7. Rybakov, N.P., Arbuzova, L.S., Surnina, P.S. (1973). *Prychornomorska series. Sheet L-35-XXIV, XXX. V H. Molyavko (Eds.), Geological map of the USSR on a scale of 1: 200,000. Ministry of Geology of the USSR.* [in Russian]
8. Shnyukov, E.F. (Eds.). (1984). *Geology of the shelf of the Ukrainian SSR. Estuaries.* Kiev, Naukova Dumka. [in Russian]
9. Shuisky, Y.D., Stoyan, A.A. (2011). Experience of analysis of anthropogenic reorganization of the natural estuary on the northwestern coast of the Black Sea. *Ecological safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, 1(25), 38–48. [in Russian]
10. Sadchikova, T.A., Chepalyga, A.L. (1999). Late Quaternary history of the estuaries of the North-Western Black Sea coast. *Bulletin for the commission for the study of the Quaternary period*, (63), 76–85. [in Russian]
11. Granova, A.K., Volynskaya, V.O. (2014). Geological structure of the Cainozoic deposits of the Sasyk estuary coast (the north-west Near Black region). *Geological Journal*, 3, 39–44. [in Ukrainian]
12. Mitropolsky, O.Yu., Nasedkin, E.I., Osokina, N.P. (Eds.). (2006). *Geochemistry of the Black Sea.* Kiev, Akadempriodika. [in Ukrainian]
13. Shykhalyeyeva, G.N., Ennan, A.A., Chursina, O.D., Shykhalyeyev, I.I., Kuzmina I.S. (2012). Study of the Kuyalnyk estuary bottom sediments pollution by heavy metals. *ONU Herald. Series: Chemistry*, 17 (4), 70-77. [in Russian]

14. Nikipelova, E.M., Mokiyenko, A.V., Solodova, L.B., Cimbaluk, K.K., Cioma, H.A., Koyeva, K.A., Shevchenko, M.V., Latayeva, A.V. (2012). Description of anthropogenic contamination of muds of Prichernomorski estuaries. *ONU Herald. Series: Chemistry*, 17(1), 46–51. [in Ukrainian]
15. Dytlov, S.E., Chepizhko, A.V., Urda, V.A. (2012). Interannual variability of the composition of heavy metals in water and sediments of the landfill «Odessa region NWBS». *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (26), 257 - 269. [in Ukrainian]
16. Dyatlov, S.Y., Koshelev, A.V., Zaporozhets, S.A. (2017). Bottom sediments of southern part of Khadzhybei estuary in terms of chronic anthropogenic pollution. *Scientific Issues of TNPU. Series: Biology*, 69(2), 60–64. [in Ukrainian]
17. Melnykov, A. Yu. (2018). Accumulation of heavy metals in the biocenoses of the Danube Delta. *Ecological Sciences*, 2(21), 138-142. [in Ukrainian]
18. Zinchuk, V.K., Levytska, G.D., & Dubenska, L.O. (2008). *Physico-chemical methods of analysis*. Publishing Center of Ivan Franko National University. [in Ukrainian]
19. GOST 17.4.1.02-83. Nature protection. Soils. Classification of chemicals for pollution control (64456). DNAOP - Legal and regulatory library instructions documents. https://dnaop.com/html/64456/doc-GOCT_17.4.1.02-83. [in Russian]
20. Vasenko, A.G., Melnikov, A.Y. (2018). Heavy metals in the Danube bottom sediments on the territory of Ukraine. *Ecological Safety*, 25(1), 26–31. <https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.1.26-31>. [in Ukrainian]
21. Fateev, A., Pashchenko, Y. (Eds.). (2003). *Background content of trace elements in soils of Ukraine*. NSC «Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky». [in Ukrainian]
22. Vinogradov, A.P. (1956). Regularities in the distribution of chemical elements in the earth's crust. *Geochemistry*, (1), 7–52. [in Russian]
23. Kudrya, S.F. (2012). An accumulation of toxic metals is in the ground deposits of the avandelta of Danube. *ONU Herald. Series: Geography*, 17(3), 176–186. [in Ukrainian]
24. On the approval of standards for maximum permissible concentrations of hazardous substances in soils, as well as the list of such substances. Official web-portal of the Parliament of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-n?lang=en#Text>. [in Ukrainian]
25. Lomakin, I.E., Pokalyuk, V.V., Shuraiev, Y.N., & Shpyrko, S. (2017). Automated morphometric analysis and its application to tectonic zonation. 16th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects (p. 1–4). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701881>.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Received 9 August 2022
Accepted 15 February 2023