

<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.42.04.104>  
УДК 550.4:[502.3:504.5]:543.26(477.64-25)

**В.О. Ємельянов**, д-р геол. наук, чл.-кор. НАН України, проф., дир.  
Державна наукова установа “Центр проблем морської геології,  
геоекології та осадового рудоутворення НАН України”  
03054, м. Київ, Україна, вул. Олеся Гончара, 55-б  
E-mail: eva@nas.gov.ua; <https://orcid.org/0000-0002-8972-0754>

**Є.І. Наседкін**, канд. геол. наук, пров. наук. співроб. Сектор проблем навколишнього середовища  
Науково-організаційний відділ Президії НАН України  
01030, м. Київ, Україна, вул. Володимирська, 54  
E-mail: nasedevg@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-2633-9291>

**А.В. Сачко**, канд. хім. наук, доц. Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
Інститут біології, хімії та біоресурсів  
58012, м. Чернівці, Україна, вул. Коцюбинського, 2  
E-mail: an.sachko@chnu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-3364-4297>

**І.В. Кураєва**, д-р геол. наук, проф., зав. від. Інститут геохімії,  
мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України  
03142, м. Київ, Україна, пр-т Акад. Палладіна, 34  
E-mail: K14412674@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3113-7782>

**Т.О. Кошлякова**, канд. геол. наук, старш. наук. співроб. Інститут геохімії,  
мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України  
03142, м. Київ, Україна, пр-т Акад. Палладіна, 34  
E-mail: geol@bigmir.net; <https://orcid.org/0000-0001-8551-3531>

## РОЗПОДІЛ СВИНЦЮ В ПРИЗЕМНОМУ АТМОСФЕРНОМУ АЕРОЗОЛІ МІСТА ЗАПОРІЖЖЯ

*Наведено результати багаторічних спостережень за геохімічними особливостями розподілу техногенного свинцю в атмосферному аерозолі м. Запоріжжя, а також у ґрунтах, донних відкладах, річковій завесі Дніпра і речовині з фільтрів мокрого газоочищення мартенівських печей найбільшого металургійного підприємства на території досліджень — ПАТ “Запорізький металургійний комбінат “Запоріжсталь”. Фактичний матеріал було отримано на основі проведення комплексного натурного моніторингу протягом 2015—2019 рр. Одночасне залучення даних щодо гідрометеорологічних умов (сезонність, кількість опадів, швидкості, напрямки та тривалість вітрів) в районі досліджень забезпечило комплексний підхід до опрацювання та узагальнення результатів досліджень. Визначено ряд особливостей розподілу седиментаційної речовини в повітрі, взаємозв'язків її антропогенної і природної складових. Установлено зв'язок змін концентрацій свинцю з розподілом мінеральної складової еолової завесі, сезонністю та низкою інших факторів. Найвищу концентрацію свинцю було виявлено у твердих аерозольних частинках, накопичених седиментаційною пасткою у межах моніторингової ділянки. Виявлено, що середній вміст досліджуваного елемента у річковій завесі Дніпра значно перевищує фонові величини, а у ґрунтах міста у три з половиною рази перевищує допустимі норми. При цьому фіксована форма свинцю у повітряному аерозолі, на противагу іншим об'єктам довкілля, втрачає своє домінування, суттєво поступаючись легкообмінним формам, що свідчить про потенційну екологічну небезпеку. Моніторинг сезонних закономірностей розподілу елемента в повітрі міста засвідчив перевищення концентрацій в холодний період року, що, на думку авторів, пов'язано як з метеорологічними умовами, так і з перерозподілом впливу природних і антропогенних факторів, що виступають рушійною силою у процесах надходження та перетворення свинцю в атмосфері у різні сезони року.*

**Ключові слова:** атмосферний аерозоль, ґрунти, донні відклади, річкова завесь, важкі метали, мікроелементний склад, природне середовище, Запоріжжя.

Цитування: Ємельянов В.О., Наседкін Є.І., Сачко А.В., Кураєва І.В., Кошлякова Т.О. Розподіл свинцю в приземному атмосферному аерозолі міста Запоріжжя. *Мінерал. журн.* 2020. 42, № 4. С. 104—115. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.42.04.104>

**Вступ.** Важкі метали традиційно є одними з головних індикаторів антропогенного забруднення навколишнього середовища у великих містах [19]. Серед важливих сучасних аспектів екологічних проблем міст з розвинутою промисловістю є те, що вплив емісії цих металів поширюється на атмосферну, біосферну, гідросферну та літосферну компоненти природного середовища далеко за межами індустріальних осередків. При цьому перше місце за ступенем токсикологічної небезпеки для людини посідає забруднення повітря, а закономірності розподілу та транспортування важких металів атмосферними потоками обумовлюють інтенсивність надходження забрудників в інші компоненти довкілля.

Щорічний світовий видобуток і переробка понад 100 млрд т мінеральної сировини призводить до розсіювання величезних обсягів мікроелементів на тисячі кілометрів. При цьому відбувається перехід речовин у дисперсний стан, придатніший не тільки для міграції, але й для геохімічних перетворень у небезпечні сполуки [7, 17].

Геохімічні дослідження являють собою ту основу, що надає можливість порівняти особливості трансформації хімічного складу поверхневих, підземних вод, атмосфери, ґрунтів та опадів у межах промислово-міських агломерацій, при цьому геохімічні інструменти та підходи можуть слугувати підґрунтям для ухвалення адміністративних рішень, а також вирішення екологічних проблем у містах з високим рівнем забруднення компонентів природного середовища [19].

Визначення особливостей процесів емісії важких металів, ролі різних типів джерел у забрудненні об'єктів навколишнього середовища великих міст, природних закономірностей їх розподілу, трансформації та накопичення потребує комплексного наукового підходу. Зокрема, доцільним є проведення тривалих натурних спостережень за розподілом важких металів у твердій речовині атмосферного та водного середовищ, донних відкладах річок та ґрунтах.

Для Запоріжжя характерним є високий рівень промислового навантаження за рахунок підприємств чорної і кольорової металургії, хімії та машинобудування, що зумовлює інтенсивну емісію небажаних побічних продуктів технологічних процесів цих підприємств, насамперед, низки мікроелементів у навколишнє середовище. Основний внесок у забруднення

атмосферного повітря м. Запоріжжя, за даними періодичних видань про стан навколишнього природного середовища у Запорізькій області [12], вносять промислові підприємства, викиди яких становлять 60–70 % від загального валового обсягу викиду усіх поллютантів. Найбільшими забрудниками атмосферного повітря за останні роки залишаються ПАТ "Запоріжсталь", ПАТ "Дніпроспецсталь", ПАТ "Запорізький завод феросплавів", ПАТ "Український графіт", ПАТ "Запорізький абразивний комбінат", ПрАТ "Запоріжжкокс", ТОВ "Запорізький титано-магнієвий комбінат" та низка інших. Детальніше у статті розглянуто розподіл свинцю в речовині, відібраній фільтрами підприємства ПАТ "Запоріжсталь", адже воно є найбільшим забруднювачем атмосферного повітря Запоріжжя, і тому варте особливої уваги.

Головною **метою** проведеного дослідження було визначення геохімічних особливостей розподілу техногенного свинцю в атмосферному аерозолі м. Запоріжжя у порівнянні з його вмістом у ґрунтах, донних відкладах, зависі річки Дніпро та речовині з фільтрів мокрого газоочищення мартенівських печей ПАТ "Запоріжсталь", а також установа форм знаходження елемента в аерозолі та виявлення закономірностей змін його концентрацій під дією природних факторів.

Безпосередньо **об'єктом дослідження** є приземний атмосферний аерозоль м. Запоріжжя. Також додатково досліджено ґрунти міста, донні відклади, річкову завись р. Дніпро та речовину з фільтрів мокрого газоочищення мартенівських печей ПАТ "Запоріжсталь".

**Предметом дослідження** є геохімічні особливості розподілу та форм знаходження техногенного свинцю у приземному атмосферному аерозолі м. Запоріжжя, а також у інших компонентах навколишнього середовища.

**Методика досліджень** передбачала щомісячний відбір зразків натурної речовини, накопичених у встановлених пастках для уловлювання атмосферного аерозолю, водної зависі, а також сезонний відбір донних відкладів Дніпра на спостережній ділянці та ґрунтів суходолу за визначеним профілем "Заводський район" (техногенно найнавантаженіша ділянка території м. Запоріжжя) — моніторингова ділянка Державної установи "Науковий гідрофізичний центр НАН України" (рис. 1). Варто відмітити, що за низкою параметрів (віддаленість від основних джерел забруднення, наявність межі



Рис. 1. Масштабована оглядова карта території досліджень у межах Запоріжжя за профілем "Заводський район" — моніторингова ділянка Державної установи "Науковий гідрофізичний центр НАН України": 1—8 — ділянки відбору проб ґрунтів  
Fig. 1. Scaled survey map of the research territory within Zaporizhzhia according to the profile "Factory district" — monitoring site of the State Institution "Scientific Hydrophysical Centre of the National Academy of Sciences of Ukraine": 1—8 — soils sampling fields

розділу "суходіл — акваторія", необхідна інфраструктура, закрита територія), моніторингова ділянка задовольняє вимогам проведення натурального експерименту (рис. 2). Відстань від промислових об'єктів (промзона в межах Заводського району) до моніторингової ділянки, на якій відібрано проби повітряного аерозолі, становить 8,9 км.

Відбір завислої речовини з акваторії Дніпра та з атмосферного середовища виконано за допомогою седиментаційних пасток, конструктивні особливості яких вимагали тривалого процесу відбору зразків, з часом експозиції до місяця. Вилучення з пастки натурної речовини здійснювалося один раз на 30 днів, а саме 15 числа кожного місяця з метою створення умов накопичення її необхідної кількості для проведення запланованих лабораторних аналізів [11]. Методика дослідження базувалася як на методичних рекомендаціях, представлених в літературних джерелах, зокрема [9], так і на власному досвіді проведення аналогічних робіт [6, 11, 15].

Комплекс лабораторних досліджень включав електронномікроскопічний аналіз сухих проб ґрунтів суходолу, донних відкладів, річкової завислої речовини та атмосферного аерозолі, а також виконання мікроелементного, хімічного та гранулометричного аналізу.

Елементний аналіз донних відкладів здійснено за допомогою атомно-абсорбційного спектрофотометра С-115М. Форми знаходження важких металів, зокрема свинцю, визначали за допомогою методу витяжок [14].

Електронномікроскопічні дослідження виконано із використанням сканувального електронного мікроскопа (СЕМ) JEOL-6490 LV (JEOL Ltd., Японія) з енергодисперсійним спектрометром (EDS) системи рентгенівського мікроаналізу INCA Energy+ (Oxford Instruments plc., Велика Британія). Гранулометричний аналіз — за допомогою лазерного седиментографа (лазерного аналізатора розміру частинок MasterSizer 2000 з модулем рідинної дисперсії Hydro 2000S (Malvern Ins. Ltd, Велика Британія).

Визначення речовинного (гранулометричного, мінерального та хімічного) складу атмосферних аерозолів виконано на базі обладнання Центру колективного користування науковими приладами Інституту геологічних наук НАН України.

Протягом періоду спостережень вивчено інформацію щодо характеристик атмосферних потоків та синоптичної ситуації, що сприяло створенню інформаційного масиву даних напрямків, тривалості та швидкості вітрів, а також розподілу атмосферних опадів у районі досліджень. Залучений комплекс аналітичних

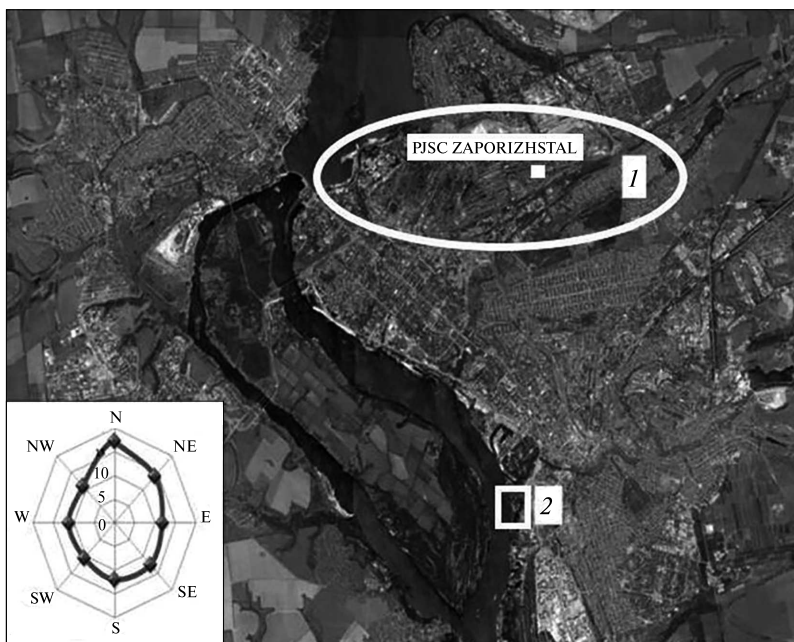


Рис. 2. Масштабована оглядова карта розташування основних забруднювальних підприємств Запоріжжя відносно моніторингової ділянки із зазначенням середньорічної повторюваності напрямків вітру, %: 1 — промислова зона міста, в межах якої розташовано основні забруднювальні підприємства, зокрема ПАТ "Запоріжсталь"; 2 — ділянка моніторингу атмосферного аерозолю

Fig. 2. Scaled overview map of the location of the main polluting enterprises of Zaporizhzhia relative to the monitoring site, indicating the average annual repeatability of wind directions, %: 1 — industrial zone of the city, within which the main polluting enterprises are located, in particular Public Joint Stock Company "Zaporizhstal"; 2 — atmospheric air monitoring site)

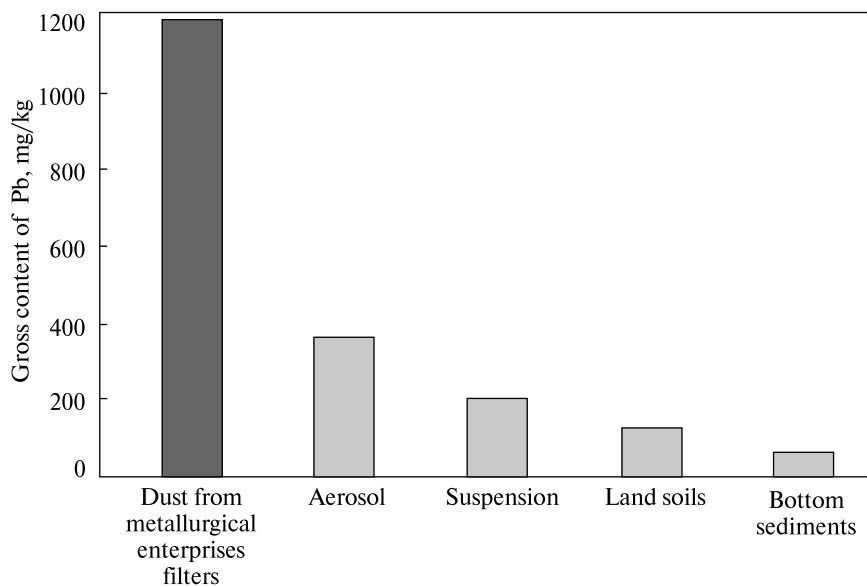
досліджень допоміг проаналізувати весь обсяг накопиченого матеріалу та окреслити, зокрема, розподіл свинцю в натурній речовині основних складових навколишнього середовища та визначити ряд закономірностей.

**Результати та обговорення.** Під час виконання досліджень авторами було виявлено загальну закономірність: валовий вміст свинцю в компонентах навколишнього середовища м. Запоріжжя є найбільшим у атмосферному аерозолі, і його концентрація поступово зменшується у ряді "річкова завись — ґрунти суходолу — донні відклади". Варто відмітити, що у ході подальших досліджень доцільно окремо

розглядати концентрації елемента в речовині, відібраній повітряними фільтрами в процесі виробничої діяльності цехів певних технологічних ланок металургійного виробництва деяких підприємств міста — Запоріжсталі, Дніпросталеалі, Феросплавного заводу.

Найвищою виявилась концентрація свинцю у твердих аерозольних частинках, накопичених седиментаційною пасткою у межах моніторингової ділянки (середній вміст — 335 мг/кг). Концентрація свинцю у річковій зависі Дніпра значно перевищує фонову і становить 174 мг/кг. Середній вміст досліджуваного елемента у ґрунтах міста становить

Рис. 3. Діаграма усереднених показників розподілу Pb (валовий вміст, мг/кг) у твердій речовині атмосферних викидів ПАТ "Запоріжсталь" (проби пилу з повітряних фільтрів) [18], еолічних потоків, річкової зависі, поверхневих ґрунтів суходолу та донних відкладів Дніпра в районі спостережень



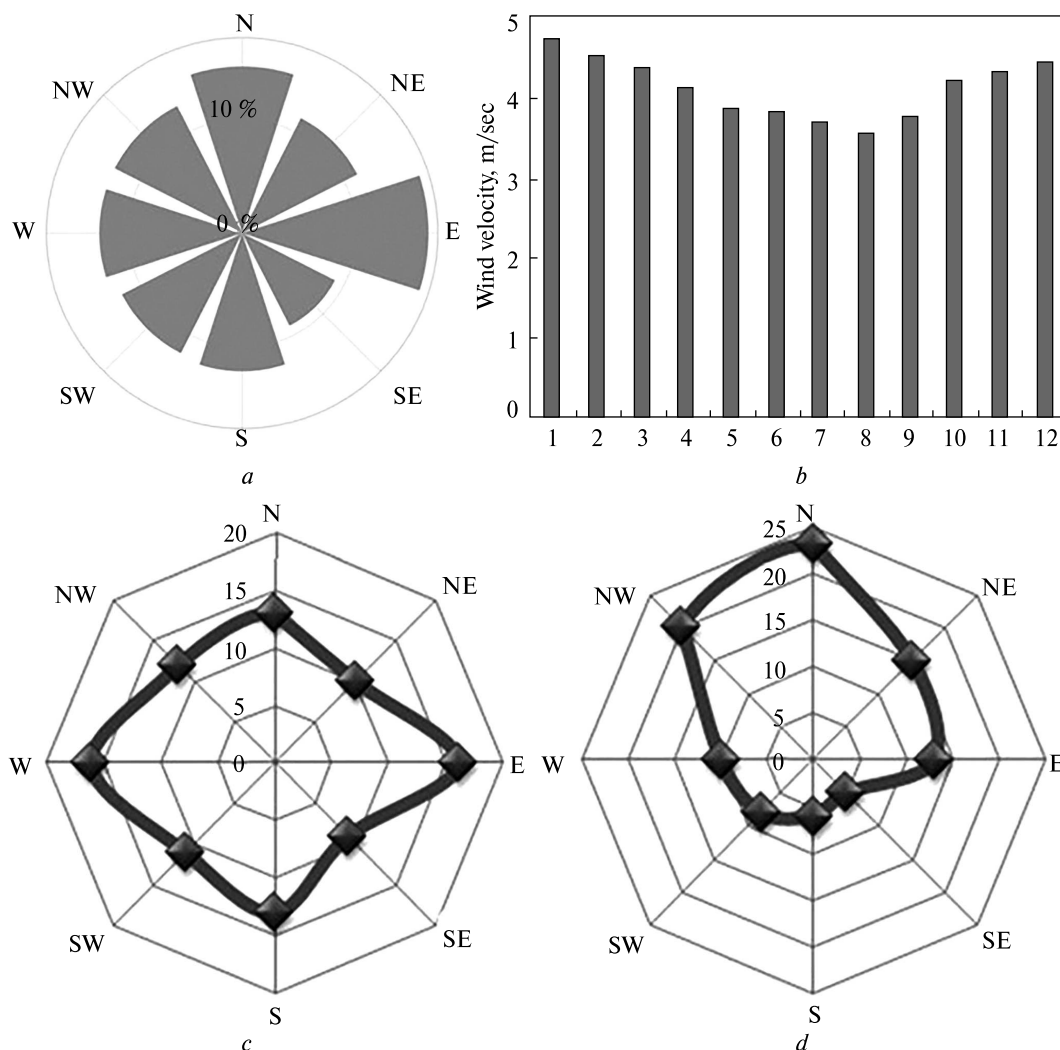


Рис. 4. Роза вітрів м. Запоріжжя за усередненими середньорічними показниками напрямків та швидкостей вітру [2]: *a* — повторюваність напрямків вітру за рік (%), *b* — гістограма усереднених величин швидкості вітру, за місяцями (м/с), *c* — повторюваність напрямків вітру у липні (%), *d* — повторюваність напрямків вітру у січні (%)

Fig. 4. Wind rose of Zaporizhia according to the average annual indicators of wind directions and speeds [2]: *a* — repeatability of wind directions per year (%), *b* — histogram of average wind speeds by months (m/s), *c* — the frequency of wind directions in July (%), *d* — the frequency of wind directions in January (%)

115 мг/кг, що у три з половиною рази перевищує допустимі норми (ГДК свинцю для ґрунту — 32 мг/кг) (рис. 3).

Такі співвідношення викликані переважно природними факторами, зокрема впливом характеристик навколишнього середовища, а також безпосередньо якісних властивостей носіїв елемента — твердих поліметалевих утворень, відібраних із різних об'єктів довкілля. Як правило, за збільшення відстані від джерела викидів відбувається перебудова співвідношень форм надходження металів у бік збільшення вмісту водорозчинних та рухоміших сполук [5].

Вміст рухомої та фіксованої форм важких металів у аерозолях в середньому орієнтовно приймається як 50/50 [4], але для свинцю в середньому 60 % форм вважають нерозчинними [3]. Форми існування важких металів у ґрунтах, окрім того, суттєво залежать від фізико-хімічних характеристик ґрунту: в закислених ґрунтах переважають рухомі та водорозчинні форми, в нейтральних та лужних відбувається фіксація свинцю з утворенням гідроксидів та нерозчинних неорганічних солей [14].

Суттєвим фактором є також метеорологічні умови — розподіл напрямків та швидкостей ві-

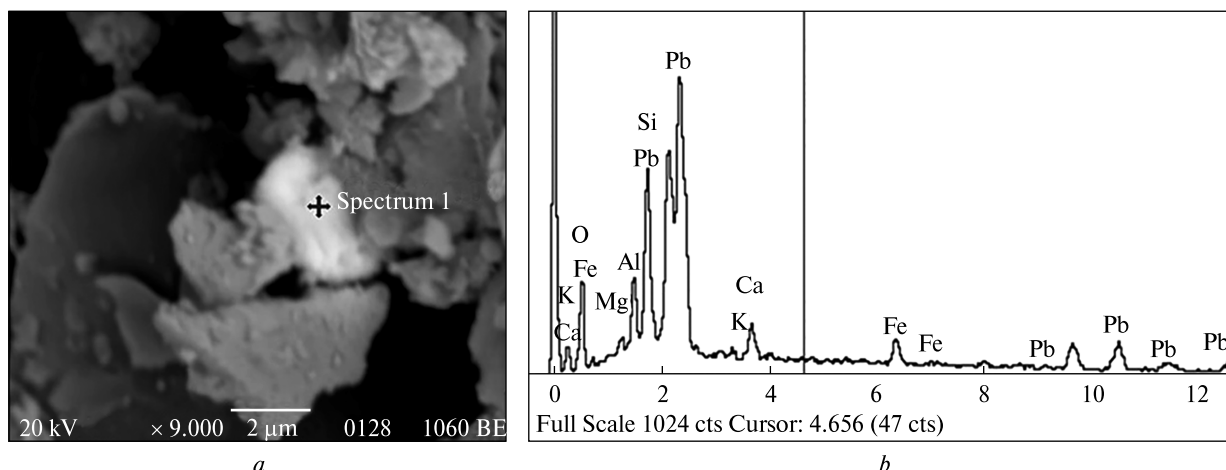
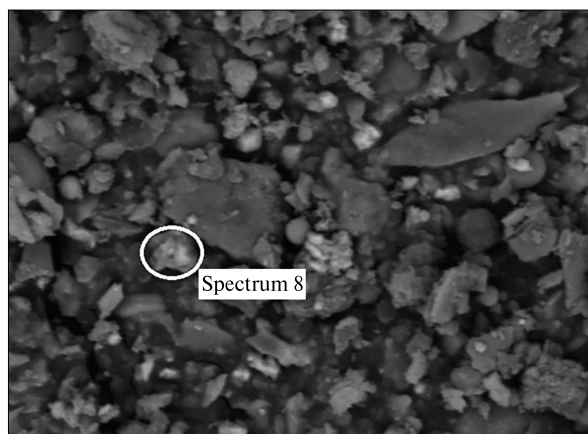


Рис. 5. Електронномікроскопічний знімок та хімічний склад аерозольної частинки, відібраної за допомогою пастки в межах моніторингової ділянки у м. Запоріжжя, основним компонентом якої є свинець

Fig. 5. Electron-microscopic image and chemical composition of aerosol particle selected by a trap within the monitoring site in Zaporizhzhia, the main component of which is lead

Рис. 6. Електронномікроскопічний знімок аерозольної частинки, відібраної за допомогою пастки в межах моніторингової ділянки у м. Запоріжжя, основним компонентом якої є залізо, а вміст свинцю не перевищує перших відсотків

Fig. 6. Electron-microscopic image of aerosol particle selected by a trap within the monitoring site in Zaporizhzhia, the main component of which is iron, and the lead content does not exceed first percents



трів, інтенсивність атмосферних опадів, наявність рідких частинок аерозолю в повітрі. На рис. 4 представлено рози вітрів м. Запоріжжя за усередненими показниками повторюваності напрямків вітру у цілому за рік, окремо для теплого (липень) та холодного (січень) періоду року, а також річну гістограму швидкості вітру за місяцями. Для досліджень, що відбуваються в межах відкритих великих водойм, ефективним прискорювачем виведення з атмосфери континентального пилу є аерозоль, утворений над водною поверхнею [13]. Окрім того, суттєвим фактором є склад та розмірність частинок еолової завесі в повітрі — зокрема, в роботі [8] визначається сталий зв'язок елемента з певними гранулометричними фракціями завислої речовини.

Автори виконали кореляційний аналіз часового зв'язку розподілу концентрацій свинцю з такими факторами, як гранулометричний

склад відібраних зразків, напрямки вітрів (з території суходолу та акваторії Дніпра), сила вітрів (інтегральний показник тривалості та швидкостей вітрів за градаціями більше 7 та 4 м/с і розподілом атмосферних збурень всіх швидкостей), а також швидкість накопичення речовини у седиментаційній пастці. Для періоду спостережень, яке охоплює дослідження, відповідних стійких зв'язків та значимих величин коефіцієнта кореляції виявлено не було.

Електронномікроскопічні дослідження мінеральної складової атмосферних потоків засвідчили, що аерозольні частинки з підвищеним вмістом свинцю можуть представляти собою як агреговані з дрібнодисперсної складової утворення, так і окремі мінеральні поліметалеві фрагменти (рис. 5, 6; табл. 1, 2).

Під час виконання дослідження не виявлено зв'язку між підвищенням концентрацій свинцю та збільшенням вмісту глинозему у пробах

атмосферної речовини. Автори пов'язують це явище зі значною кількістю фіксованої форми металу в уламках, представлених оксидами заліза алевритової розмірності. Стійку залежність у межах моніторингової ділянки було виявлено для розподілу концентрацій свинцю та заліза у зразках відібраної аерозольної речовини (рис. 7). Коефіцієнт кореляції сягає показника 0,8 для інформаційного масиву за весь період спостережень, що є значимою величиною.

Варто зазначити, що форми існування свинцю в повітрі дуже часто пов'язують насамперед із додаванням тетраетилсвинцю до бензину (хоча в Україні такий бензин був заборонений ще з 1 січня 2003 року). Алкільні сполуки свинцю, наявні у бензині, під час процесів спалення зазнають трансформації до оксидів, які реагують із присутніми в бензині галогеновуглеводнями, утворюючи леткі галоїд-свинцеві сполуки на зразок  $PbCl_2$ ,  $PbClBr$ ,  $PbBr_2$ , що виносяться з камер згоряння двигунів разом із відпрацьованими газами. В атмосфері за присутності інших забруднювачів галоїд-свинцеві сполуки перетворюються на солі, що сприяє виведенню їх з атмосферного середовища шляхом гравітаційного осадження за участі атмосферних опадів [16].

Загалом, для частинок еолового завису максимальна вимиваюча здатність властива таким погодним явищам як снігопад, морось, туман та дощ. За інтенсивності дощу 2,5 мм/год за де-

кілька годин вимивається 90 % змочуваних та 25 % незмочуваних частинок [1]. Аналіз зв'язку між інтенсивністю атмосферних опадів і швидкістю накопичення твердої компоненти аерозолю в пастках за весь період досліджень засвідчив наявність стійкої зворотної залежності. Це, в свою чергу, позначилось на перерозподілі концентрацій свинцю в складі атмосферної речовини в різні сезони, що, на думку авторів, пояснюється впливом комплексу факторів.

З метою визначення особливостей розподілу вмісту свинцю в пробах еолової зависи, відібраної в межах моніторингової ділянки, та можливого впливу на концентрації елемента природних та антропогенних факторів, було визначено середні показники за весь період спостережень протягом умовних теплового та холодного періодів. Показник "теплий період" включав речовину, відібрану протягом періоду від другої половини травня до першої половини вересня, "холодний період" — відповідно, від другої половини листопада до першої половини березня.

Виявилось, що вміст свинцю у холодний період року суттєво перевищує відповідні концентрації в натурній речовині за теплий сезон (рис. 8).

Можливим поясненням цього явища може бути зміна якісних характеристик еолової речовини у зв'язку з перерозподілом співвідношень між антропогенною та природною скла-

**Таблиця 1. Хімічний склад аерозольної частинки, відібраної за допомогою пастки в межах моніторингової ділянки у м. Запоріжжя, основним компонентом якої є свинець**

**Table 1. Chemical composition of mineral aerosol particle selected by a trap within the monitoring site in Zaporizhia, the main component of which is lead**

Параметр	Хімічний елемент							
	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Pb	O
Ваговий вміст, %	0,97	3,91	7,89	0,91	3,18	4,79	57,32	21,04

**Таблиця 2. Хімічний склад аерозольної частинки, відібраної за допомогою пастки в межах моніторингової ділянки у м. Запоріжжя, основним компонентом якої є залізо, а вміст свинцю не перевищує перших відсотків**

**Table 2. Chemical composition of aerosol particle selected by a trap within the monitoring site in Zaporizhia, the main component of which is iron, and the lead content does not exceed first percents**

Параметр	Хімічний елемент								
	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Pb
Ваговий вміст, %	Н. в	Н. в	7,39	13,58	8,81	Н. в	1,30	64,85	4,07

Примітка. Н. в. — не виявлено.

Note. Н. в. — non detected.

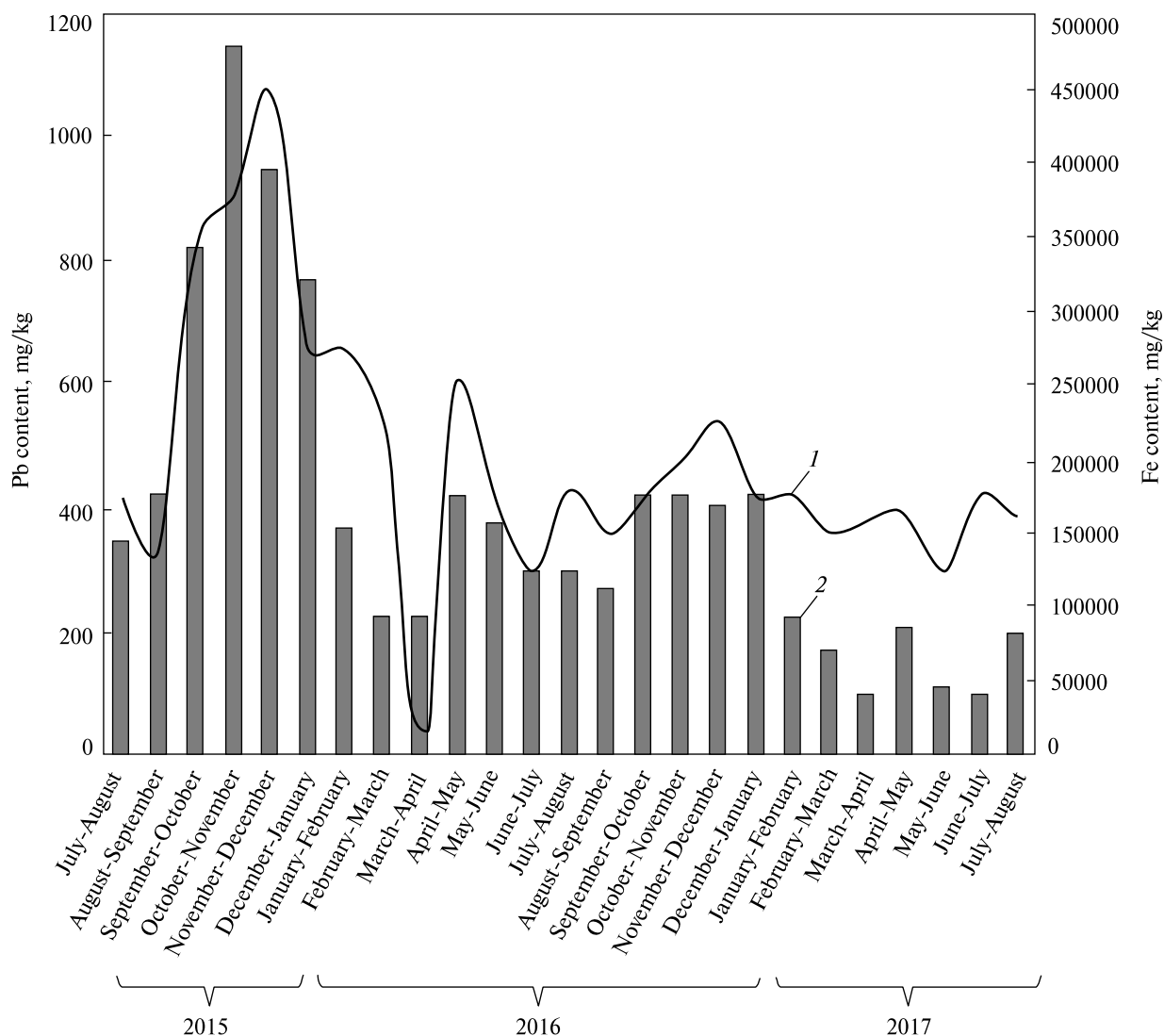
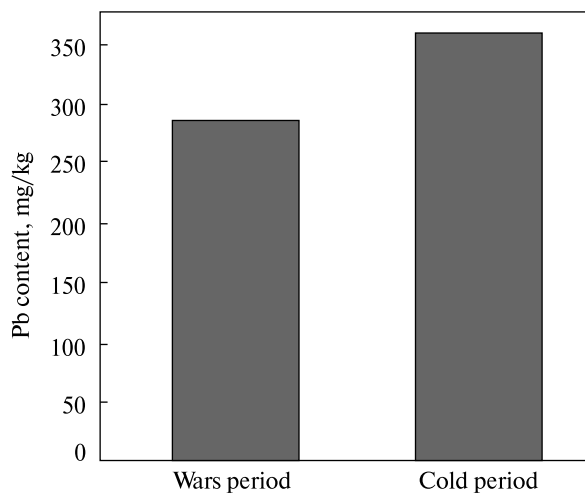


Рис. 7. Фрагмент гістограми щомісячного розподілу концентрацій свинцю з накладеним графіком розподілу заліза у складі відібраної речовини атмосферного аерозолі на моніторинговій ділянці за 2015–2017: 1 – графік розподілу заліза, 2 – гістограма розподілу свинцю)

Fig. 7. Snippet histogram of monthly distribution of lead concentrations with superimposed curve of iron distribution in the composition of selected atmospheric aerosol substance at the monitoring site for 2015–2017: 1 – curve of iron distribution, 2 – histogram of lead distribution

Рис. 8. Діаграма усереднених концентрацій свинцю (мг/кг) в пробах еолової зависі, відібраних пасткою для атмосферного аерозолі (показник "теплий період" – речовина, відібрана протягом періоду від другої половини травня до першої половини вересня, "холодний період" – відповідно, від другої половини листопада до першої половини березня)

Fig. 8. Diagram of average lead content distribution in samples of eolian suspension, sampled by atmospheric aerosol traps, mg/kg (indicator "warm period" – a substance sampled during the period from the second half of May to the first half of September, "cold period" – respectively, from the second half of November to the first half of March)





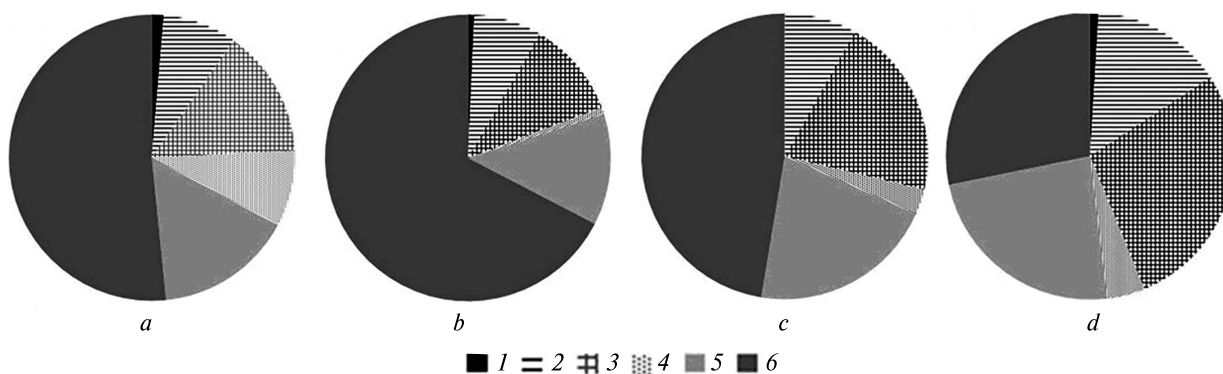


Рис. 9. Діаграма розподілу різних форм свинцю в складі (%): *a* — річкової завислої речовини, *b* — пилу з фільтрів ливарних цехів ПАТ "Запоріжсталь" (мартенівські печі, мокре газоочищення [18], *c* — ґрунтів суходолу, *d* — атмосферного аерозолу; 1 — водорозчинна форма, 2 — іонообмінні та легко розчинні форми, 3 — пов'язаний з карбонатами, 4 — пов'язаний з органічними речовинами та сульфатами, 5 — пов'язаний з гідроксидами заліза та марганцю, 6 — фіксована форма

Fig. 9. Diagram of distribution of different forms of lead in composition of (%): *a* — river suspended matter, *b* — dust from filters of PJSC Zaporizhstal foundries (open-hearth furnaces, wet gas purification [18], *c* — land soils, *d* — atmospheric aerosol: 1 — water-soluble forms, 2 — ion-exchange and easily soluble forms, 3 — linked with carbonates, 4 — linked with organic matter and sulfates, 5 — linked with iron and manganese hydroxides, 6 — fixed form

довими повітряної зависі у певні часові проміжки протягом року. Питомий вміст частини, прив'язаної до природних процесів вивітрювання гірських порід, а також біологічної складової (продукти метаболізму рослин), присутньої в повітрі, в холодний період зменшується. Автори пов'язують це явище з процесами зволоження ґрунтів та їх промерзанням, що зменшує надходження у повітря диспергованої мінеральної складової з їх поверхні, а також уповільненням процесів вегетації рослин. Останнє підтверджується даними електронномікроскопічних досліджень.

Поряд із цим, складова речовини атмосферних потоків, представлена викидами промислових підприємств, переважно зберігає обсяг в холодний період, збільшуючи свою питому кількість у розподілі антропогенної та природної складових еолового матеріалу. Це, відповідно, призводить до змін у мінеральній складовій речовини, гранулометричному складі, а також вмісті важких металів. Природні фактори матимуть на них вплив вже у процесі розподілу в повітрі (тривалість перебування в атмосфері, дальність і швидкість перенесення). Тобто інтенсивність технологічних процесів, що обумовлюють викиди антропогенної частки еолової зависі, можна умовно вважати сталою величиною впродовж періоду досліджень, а процеси, що регламентують вміст природної частки, визначаються значною мінливістю протягом року [10].

Найінформативніші показники щодо особливостей розподілу свинцю в атмосферних аерозолях, порівняно з іншими компонентами навколишнього середовища, були отримані завдяки визначенню його форм існування у пробах річкової завислої речовини, пилу з фільтрів ливарних цехів ПАТ "Запоріжсталь" (мартенівські печі, мокре газоочищення) [18], ґрунтів суходолу та атмосферного аерозолу (рис. 9). Авторами детально розглядався саме пил з фільтрів ливарних цехів підприємства, оскільки ця речовина є найбільш насиченою металами (цей етап виробництва сталі є кінцевим). Натомість пил, відібраний на попередніх етапах виробництва — видобутку, збагачення, виробництва агломерату — є менш інформативним, бо речовина розбавляється пустою породою та речовиною шихти, що зменшує концентрації важких металів та їх асоціацій.

Валовий вміст важких металів є фактором ємності, що вказує на загальну забрудненість об'єктів навколишнього середовища та слугує кількісним показником техногенного навантаження на довкілля, проте не відображає ступеня доступності елементів для біологічної складової. З метою характеристики стану біоценозів забруднених територій, зокрема впливу на живі об'єкти, застосовують показники вмісту рухомих форм важких металів. Загальна кількість рухомих форм металу визначається за допомогою витяжок [14].

Водорозчинні форми володіють високою біологічною доступністю та легко потрапляють в організм з продуктами харчування та забрудненою водою. До них відносять вільні іони важких металів, розчинні комплексні сполуки, що містять іони важких металів, деякі водорозчинні органічні сполуки. Результати досліджень показали, зокрема, що вміст свинцю у водній витяжці зі зразка річкового завису Дніпра, відібраного в межах моніторингової ділянки, становить 0,3 мг/дм<sup>3</sup>, що суттєво перевищує гранично допустиму концентрацію (ГДК) свинцю для річкової води (0,03–0,1 мг/дм<sup>3</sup>). Оскільки перед дослідженням зразок не проходив попередньої обробки, лише був висушений до повітряно-сухого стану, можна стверджувати, що концентрація свинцю у водній витяжці відображає концентрацію свинцю в завислій складовій водної товщі на момент відбору зразка.

**Висновки.** Виконані дослідження допомогли виявити ряд геохімічних особливостей розподілу техногенного свинцю у складі речовини різних компонентів довкілля м. Запоріжжя, а також установити ймовірні джерела його емісії в навколишнє середовище:

1. Валовий вміст свинцю в компонентах навколишнього середовища м. Запоріжжя є найбільшим у атмосферному аерозолі, і його концентрація поступово зменшується у ряді "річкова завись — ґрунти суходолу — донні відклади".

2. Найвищу концентрацію свинцю виявлено у твердих аерозольних частинках, накопичених седиментаційною пасткою у межах моніторингової ділянки.

3. Виявлено стійку зворотну залежність між інтенсивністю атмосферних опадів і швидкістю накопичення твердої компоненти аерозолу в пастках.

4. Аерозольні частинки з підвищеним вмістом свинцю — це агреговані з дрібнодисперсної складової утворення або окремі мінеральні поліметалеві фрагменти.

5. Середній вміст свинцю у річковій зависі Дніпра значно перевищує фонові величини, а у ґрунтах міста у три з половиною рази перевищує допустимі норми.

6. Валовий вміст елемента в пилу з фільтрів атмосферних викидів ПАТ "Запоріжсталь" на порядок перевищує його концентрації у ґрунтах території міста та в шість разів — у складі еолових потоків.

7. У сезонному часовому розрізі у холодний період року вміст свинцю у повітрі перевищує аналогічні показники у теплий період, що свідчить про переважання антропогенних факторів над природними.

8. Для атмосферного аерозолу характерним є високий кореляційний зв'язок у часовому розподілі свинцю та заліза, що є опосередкованим доказом значного антропогенного впливу.

9. Фіксована форма свинцю у повітряному аерозолі, на противагу іншим об'єктам довкілля, втрачає своє домінування, суттєво поступаючись легкообмінним формам, що свідчить про потенційну екологічну небезпеку.

Загалом дослідження засвідчили, що визначення природи та ступеня впливу можливих механізмів трансформації техногенних форм свинцю в навколишньому середовищі на рухомість і біологічну доступність елемента має передбачати детальне вивчення їх форм знаходження в повітрі, водному середовищі, ґрунтах і донних відкладах. Зважаючи на це, автори наголошують на необхідності розробки уніфікованих методик визначення вмісту різних форм важких металів у об'єктах довкілля.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Айбулатов Н.А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. 271 с.
2. Вітроенергетичний ресурс Запорізької області. URL: <http://ecost.lviv.ua/ua/grafic/zaporigija.html> (дата звернення: 31.07.2020)
3. Добровольский В.В. Глобальные циклы миграции тяжелых металлов в биосфере. *Тяжелые металлы в окружающей среде*. М.: Моск. ун-т, 1988. С. 4–13.
4. Добровольский В.В. Тяжелые металлы: загрязнение окружающей среды и глобальная геохимия. *Тяжелые металлы в окружающей среде*. М.: Моск. ун-т, 1980. С. 3–12.
5. Елипатьевский П.В., Толстова Л.М. Фазовый состав металлов в аэральных выпадениях и техногенно-аномальных почвах. *Тяжелые металлы в окружающей среде*. М.: Моск. ун-т, 1988. С. 50.
6. Кармазиненко С.П., Кураєва І.В., Самчук А.І., Войтюк Ю.Ю., Манічев В.Й. Важкі метали у компонентах навколишнього середовища м. Маріуполь (еколого-геохімічні аспекти). Київ: Інтерсервіс, 2014. 168 с.
7. Коржнев М.М., Вижва С.А., Кошляков О.Є., Гожик А.П., Корнеєнко С.В., Байсарович І.М., Аксьом О.С., Сухіна О.М. Екологічна геологія. Підруч. Київ: ВПЦ Київ. ун-т, 2005. 257 с.

8. Миклишанский А.З., Савельев Б.В., Яковлев Ю.В. О формах нахождения химических элементов в атмосфере: распределение микроэлементов между парами атмосферной влаги и аэрозолем в приземных слоях воздуха. *Геохимия*. 1978. № 1. С. 3—9.
9. Мороз С.А., Митропольский А.Ю. Геохимический мониторинг Черного моря. Препринт. Киев: Ин-т геол. наук, 1990. 45 с.
10. Наседкін Є.І. Геохімічні аспекти досліджень атмосферного аерозолю м. Запоріжжя. *Мінерал. журн.* 2017. **39**. № 2. С. 57—63. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.02.057>
11. Наседкін Є.І., Митропольський О.Ю., Іванова Г.М. Моніторинг седиментаційних процесів у зоні взаємодії суходолу та моря. Севастополь: "ЕКОСІ-Гідрофізика", 2013. 295 с.
12. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Запорізькій області у 2017 році. URL: <https://www.zoda.gov.ua/news/42281> (дата звернення: 29.05.2020).
13. Савенко В.С. Роль эолового терригенного материала в осадкообразовании. *Литология и полезные ископаемые*. 1988. № 1. С. 29—40.
14. Самчук А.И., Бондаренко Г.Н., Долин В.В. Сушик Ю.Я., Шраменко И.Ф., Мицкевич Б.Ф., Егоров О.С. Физико-химические условия образования мобильных форм токсичных металлов в почвах. *Минерал. журн.* 1998. **20**, № 2. С. 48—59.
15. Самчук А.І., Кураєва І.В., Єгоров О.С., Манічев В.Й., Стадник В.О., Строй А.М., Красюк О.П., Худайкулова О.О., Огар Т.В., Білик В.В., Батієвський Б.О. Важкі метали у ґрунтах Українського Полісся та Київського мегаполісу. Київ: Наук. думка, 2006. 108 с.
16. Транскордонні проблеми токсикології довкілля. URL: <https://pidruchniki.com/71216/ekologiya/svinets> (дата звернення: 29.05.2020).
17. Шнюков Е.Ф., Шестопалов В.М., Яковлев Е.А. и др. Экологическая геология Украины. Справ. пособ. Киев: Наук. думка, 1993. 407 с.
18. Bondar K.M., Tsiupa I.V., Kozhemiakin H.V., Kuraieva I.V., Voitiuk Yu.Yu. Magnetic minerals and heavy metals content of industrial dusts and polluted topsoil of Zaporizhzhya (Ukraine). *Proc. of 16th Int. Conf. on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects*. 2017. P. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701909>
19. John Ludden, Denis Peach, Dee Flight. Geochemically Based Solutions for Urban Society: London, A Case Study. *Elements*. **11**(4). 2015. P. 253—258. <https://doi.org/10.2113/gselements.11.4.253>

Надійшла 01.06.2020

## REFERENCES

1. Aybulatov, N.A. (1990), *Dinamika tverdogo veschestva v shelfovoy zone*, Gidrometeoizdat, Leningrad, RU, 271 p. [in Russian].
2. (2020) *Vitroenerhetychnyi resurs Zaporizkoi oblasti*, available at <http://ecost.lviv.ua/ua/grafic/zaporiggja.html> (Last accessed: 31.07.2020) [in Ukrainian].
3. Dobrovolskiy, V.V. (1988), *Tyazhelye metally v okruzhayushey srede*, Moskovskiy Univ., Moscow, RU, pp. 4-13 [in Russian].
4. Dobrovolskiy, V.V. (1980), *Tyazhelye metally v okruzhayushey srede*, Moskovskiy Univ., Moscow, RU, pp. 3-12 [in Russian].
5. Elipatevskiy, P.V. and Tolstova, L.M. (1988), *Tyazhelye metally v okruzhayushey srede*, Moskovskiy Univ., Moscow, RU, p. 50 [in Russian].
6. Karmazynenko, S.P., Kuraieva, I.V. Samchuk, A.I., Voitiuk, Yu.Yu. and Manichev, V.Yo. (2014), *Vazhki metaly u komponentakh navkolyshnyoho seredovyscha m. Mariupol (ekoloho-heokhimichni aspekty)*, Interservis, Kyiv, UA, 168 p. [in Ukrainian].
7. Korzhnev, M.M., Vyzhva, S.A., Koshliakov, O.Ye., Hozhyk, A.P., Korniyenko, S.V., Baysarovych, I.M., Aks'om, O.S. and Sukhina, O.M. (2005), *Ekolohichna heolohiia*, Pidruchnyk, Kyivskiy Univ. publ., Kyiv, UA, 257 p. [in Ukrainian].
8. Miklishanskiy, A.Z., Savelev, B.V. and Yakovlev, Yu.V. (1978), *Geohimiya*, No. 1, Moscow, RU, pp. 3-9 [in Russian].
9. Moroz, S.A. and Mitropolskiy, A.Yu. (1990), *Geokhimicheskiy monitoring Chernogo moray*, In-t geol. nauk, Preprint, Kyiv, UA, 45 p. [in Russian].
10. Nasiedkin, Ye.I. (2017), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 39, No. 2, Kyiv, UA, pp. 57-63 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.02.057>
11. Nasiedkin, Ye.I., Mytropolskiy, O.Yu. and Ivanova, H.M. (2013), *Monitorynh sedimentatsiinykh protsesiv u zoni vzaemodii sukhodolu ta moria*, EKOSI-Hidrofizyka, Sevastopol, UA, 295 p. [in Ukrainian].
12. (2017) *Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha u Zaporizkiy oblasti u 2017 rotsi*, available at: URL: <https://www.zoda.gov.ua/news/42281> (Accessed: 29.05.2020) [in Ukrainian].
13. Savenko, V.S. (1988), *Litologiya i poleznye iskopaemye*, No. 1, Moscow, RU, pp. 29-40 [in Russian].
14. Samchuk, A.I., Bondarenko, G.N., Dolin, V.V., Sushchik, Yu.Ya., Shramenko, I.F., Mitskevich, B.F. and Yegorov, O.S. (1998), *Mineral. Journ. (Ukraine)*, Vol. 20, No. 2, Kyiv, UA, pp. 48-59 [in Russian].
15. Samchuk, A.I., Kuraieva, I.V., Yegorov, O.S., Manichev, V.Yo., Stadnyk, V.O., Stroy, A.M., Krasnyuk, O.P., Khudaykulova, O.O., Ohar, T.V., Bilyk, V.V. and Batiyevskyy, B.O. (2006), *Vazhki metaly u gruntakh Ukrainskoho Polissia ta Kyivskoho mehapolisu*, Nauk. dumka, Kyiv, UA, 108 p. [in Ukrainian].

16. (2020) *Transkordonnii problemy toksykologii dovkillia*, available at: URL: <https://pidruchniki.com/71216/ekologiya/svinets> (Accessed: 29.05.2020) [in Ukrainian].
17. Shnyukov, E.F., Shestopalov, V.M., Yakovlev, E.A. and et al. (1993), *Ekologicheskaya geologiya Ukrainy*. Spravochno-sobnie, Nauk. dumka, Kyiv, UA, 407 p. [in Ukrainian].
18. Bondar, K.M., Tsiupa, I.V., Kozhemiakin, H.V., Kuraieva, I.V. and Voitiuk, Yu.Yu. (2017), *Proc. of 16th Int. Conf. on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects*, pp. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701909>
19. John, Ludden, Denis, Peach and Dee, Flight (2015), *Elements*, Vol. 11(4), pp. 253-258, <https://doi.org/10.2113/gselements.11.4.253>

Received 01.06.2020

*V.O. Yemelianov*, DrSc (Geology), corresponding member of NAS of Ukraine, prof., director  
State Scientific Institution "Center for Problems of Marine Geology, Geoecology and Sedimentary Ore Formation of the NAS of Ukraine"  
55-b, O. Honchar Str., Kyiv, Ukraine, 03054  
E-mail: [eva@nas.gov.ua](mailto:eva@nas.gov.ua); <https://orcid.org/0000-0002-8972-0754>

*Ye.I. Nasiedkin*, PhD (Geology), Leading Researcher  
Unit for environmental problems of Scientific-Administrative Department of Presidium of the NAS of Ukraine  
54, Volodymyrska Str., Kyiv, Ukraine, 01030  
E-mail: [nasedevg@ukr.net](mailto:nasedevg@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0003-2633-9291>

*A.V. Sachko*, PhD (Chemistry), Ass. prof.  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
Institute Biology, Chemistry and Bioresources  
2, Kotsiubynskoho Str., Chernivtsi, Ukraine, 58012  
E-mail: [an.sachko@chnu.edu.ua](mailto:an.sachko@chnu.edu.ua); <https://orcid.org/0000-0002-3364-4297>

*I.V. Kuraieva*, DrSc (Geology), Prof., Head of Department  
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine  
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142  
E-mail: [KI4412674@gmail.com](mailto:KI4412674@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-3113-7782>

*T.O. Koshliakova*, PhD (Geology), Senior Research Fellow  
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine  
34, Acad. Palladin Ave., Kyiv, Ukraine, 03142  
E-mail: [geol@bigmir.net](mailto:geol@bigmir.net); <https://orcid.org/0000-0001-8551-3531>

#### LEAD DISTRIBUTION IN GROUND-LEVEL ATMOSPHERIC AEROSOL OF ZAPORIZHIA CITY

The results of long-term observations on the geochemical peculiarities of technogenic lead distribution in atmospheric aerosol of Zaporizhia, as well as in soils, bottom sediments, suspended matter from Dnipro river and substance from wet gas filters of open-hearth furnaces PJSC Zaporizhstal are presented. The actual material was obtained on the basis of comprehensive field monitoring during 2015-2019. Simultaneous involvement of data on hydrometeorological conditions (seasonality, precipitation, wind speeds, directions and duration) in the study area provided an integral approach to the processing and generalization of research results. A number of peculiarities of sedimentary substance distribution in air, interrelations of its anthropogenic and natural components are defined. Correlations were revealed between lead concentrations changes and aeolian mineral component distribution, seasonality, and a number of other factors. The highest concentration of lead was found in solid aerosol particles accumulated by the sedimentary trap at the monitoring site. It was revealed that the average concentration of investigated element in river suspension of Dnipro exceeds significantly background values, and for soils exceeds more than 3.5 times the permissible norms. At the same time, the fixed form of lead in atmospheric aerosol, in contrast to other environmental objects, loses its domination, giving the way to easily soluble forms, so the evidence of environmental hazard. Monitoring of seasonal patterns of the element distribution in the city air showed excess concentrations in the cold period of the year, which, according to the authors, is due to both meteorological conditions and redistribution of natural and anthropogenic factors that serve the driving force in processes of arriving and conversion of lead in atmosphere during different seasons of the year.

**Keywords:** atmospheric aerosol, soils, bottom sediments, river suspension, heavy metals, microelemental composition, natural environment, Zaporizhia city.