

УДК 574:539.1.04:621.039.586

СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОГЕННИХ РАДІОНУКЛІДІВ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ ЧАЕС

Липська А.І., Ніколаєв В.І., Шитюк В.А., Куліч Н.В.

Інститут ядерних досліджень НАН України

пр-т Науки, 47, 03680, м. Київ

lypska@kinr.kiev.ua

Досліджено розподіл радіонуклідів по вертикальному профілю ґрунту на території ближньої зони ЧАЕС. Експериментально доведено, що основна активність радіонуклідів знаходиться в верхньому десятисантиметровому шарі ґрунту. Розраховано коефіцієнти накопичення рослинами радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr . Методом послідовного хімічного екстрагування визначено фізико-хімічні форми знаходження радіонуклідів в ґрунтах та рослинах. Встановлено, що в ґрунтах на слідах паливних випадів лише ~20 % радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr знаходяться в доступній для рослин формах, а інша частина – в невилугованих структурах паливних частинок. **Ключові слова:** радіонукліди, міграція, фізико-хімічні форми, радіоактивне забруднення, Чорнобильська зона відчуження.

Современное состояние техногенных радионуклидов в ближней зоне ЧАЭС. Липская А.И., Николаев В.И., Шитюк В.А., Кулич Н.В. Исследовано распределение радионуклидов по вертикальному профилю почвы на территории ближней зоны ЧАЭС. Экспериментально доказано, что основная активность радионуклидов находится в верхнем десятисантиметровом слое почвы. Рассчитаны коэффициенты накопления растительностью радионуклидов ^{137}Cs та ^{90}Sr . Методом последовательного химического экстрагирования определены физико-химические формы нахождения радионуклидов в почве и растительности. Установлено, что в почвах на следах топливных выпадений ~20 % радионуклидов ^{137}Cs та ^{90}Sr находятся в доступной для растений формах, а остальная часть – в невыщелоченных структурах топливных частиц. **Ключевые слова:** радионуклиды, миграция, физико-химические формы, радиоактивное загрязнение, Чернобыльская зона отчуждения.

Contemporary state of technogenic radionuclides in the nearest Chernobyl NPP zone. Lypska A.I., Nikolaev V.I., Shytiuk V.A., Kulich N.V. The distribution of radionuclides in the vertical soil profile on the nearest Chernobyl NPP zone of alienation. Experimentally showed that the main activity of radionuclides is concentrated in the topsoil (10 cm). Coefficients of radionuclides accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr by plants are estimated. The physicochemical forms of radionuclides in soil and plants was defined with using the method of sequential chemical extraction. It was established that the main content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soils are represented in non-exchange and fixed forms, and only ~20% of radionuclides - biologically available forms and the rest - in unleached structures of the fuel particles. **Keywords:** radionuclide, migration, physicochemical forms, Chernobyl exclusion zone, radioactive contamination.

Внаслідок аварійного викиду на ЧАЕС величезна кількість радіоактивного забруднення радіонуклідів у різних фізико-хімічних формах потрапила в навколишнє середовище, що призвело до радіоактивного забруднення значних територій України. Основним джерелом поверхневого радіоактивного забруднення Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) є різні види техногенних новоутворень: радіоактивні частинки змішаного складу, радіоактивні аерозолі та інші. Істотний внесок у

забруднення 10-км зони вносять паливомісткі частинки. За час після аварії радіоактивні випадіння суттєво трансформувались під впливом природно-кліматичних факторів, фізико-хімічних перетворень та деструкції паливних частинок, що призводить до збільшення мобільних і біологічно доступних форм радіонуклідів.

Відомо [1-3], що співвідношення мобільних і фіксованих форм радіонуклідів у ґрунтах визначає їх поведінку в наземних екосистемах. Кількісне визначення міграційно-активних форм техногенних радіонуклідів в ЧЗВ становить актуальну наукову та практичну задачу.

Мета роботи – дослідити міграцію техногенних радіонуклідів аварійного викиду та визначити фізико-хімічні форми знаходження радіонуклідів в ґрунтово-рослинних комплексах ближньої зони ЧАЕС.

Матеріали та методи досліджень

Комплексні радіоекологічні дослідження включали польові, лабораторні та γ - і β -спектрометричні. Об'єктами досліджень були зразки ґрунту, рослинності та лісової підстилки. Відбір зразків проводили на території природних полігонів ближньої зони ЧАЕС в 2012-2013 рр., з одночасним дозиметричним обстеженням території. Характер і величину вертикальної міграції радіонуклідів у ґрунтовому профілі вивчали пошарово 0-2 см, 2-4 см, 4-7 см, 7-10 см, 10-15 см, 15-20 см, 25-30 см. ґрунт відбирали методом конвєрту за допомогою розбірного пробовідбірника. Точки відбору проб

рослин були прив'язані до точок відбору проб ґрунтів для визначення коефіцієнта накопичення радіонуклідів (K_d) [4]. Після стандартної лабораторної підготовки зразків ґрунту та рослинності проводили їх γ - та β -спектрометрію.

Форми знаходження радіонуклідів у ґрунтах та рослинності визначали за методом послідовного хімічного екстрагування [5, 6]. Екстракцію фракцій радіонуклідів в пробах ґрунту проводили в наступній послідовності: дистильованою H_2O (водорозчинна форма), 1М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (обмінна і легкорозчинна форма), 1М HCl (рухлива), 6М HCl (кислоторозчинна). Зв'язок радіонуклідів з органічною речовиною ґрунту вивчали за методом [7]. Внаслідок послідовного хімічного екстрагування ми отримували 5 рідких фракцій та твердий залишок. Співвідношення твердої та рідкої фаз для ґрунту становило 1:5, для рослин 1:10. У рослинах визначали такі форми: обмінно-адсорбційну, органічну та мінеральний залишок [8, 9]. Радіонукліди, що перейшли в контактний розчин, відносили до "рухливих" форм, а ті, що залишились в мінеральному залишку, до "необмінних".

Вимірювання радіоактивних зразків проводили на γ -спектрометрі CANBERRA та β -спектрометрі «СЕБ-50». Обробку спектрів здійснювали за програмою WINSPECTRUM та модифікованою програмою «Beta fit» [10]. Похибка вимірювання значень активностей γ -випромінювання не перевищувала 5-7%, а β – 15 – 20 %.

Результати досліджень

Дослідний полігон Янів розташований на відстані ~ 3 км від аварійного енергоблоку ЧАЕС, територія його є неоднорідним рельєфом, місцями зустрічались зниження. На полігоні переважають дерново-слабопідзолисті піщані ґрунти. Кислотність ґрунтів на реперних ділянках була рН=5,5-6,0, травостій на пониженнях густий, в основному, осоковий, на сухих місцях – злакова рослинність та зарослі вересу.

На території спостерігали значну плямистість забруднення радіоактивними викидами, потужність експозиційної дози γ - випромінювання була в межах від 600 до 5000 мкР/год.

Питома активність ^{137}Cs , ^{90}Sr та ^{241}Am поверхневого шару ґрунту в різних точках відбору відрізнялась у 4-6 разів. Це пов'язано зі складними фізико-хімічними процесами, що відбувались в аварійному реакторі і обумовили нерівномірний характер розсіювання радіоактивних елементів та їх сполук на прилеглу територію [11, 12].

На основі даних спектрометричних досліджень проб ґрунту розраховано щільність забруднення території: ^{137}Cs $13 \div 62$ МБк/м², ^{90}Sr $2,7 \div 15,6$ МБк/м², ^{241}Am $0,5 \div 1,6$ МБк/м².

Досліджено вертикальний розподіл радіонуклідів у ґрунтах (рис.1).

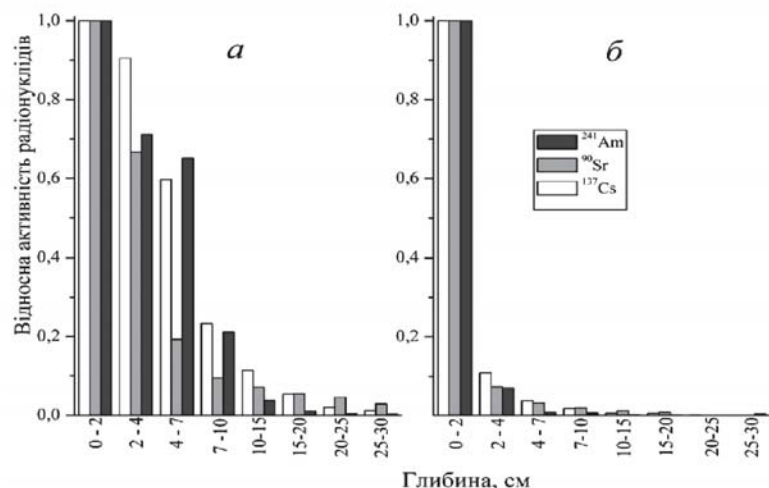


Рис.1. Вертикальний розподіл радіонуклідів у ґрунтах з різним типом зволоження відносно верхнього шару (0 - 2 см): а) вологий ґрунт (низина); б) сухий ґрунт (пагорб)

З рисунку 1 видно, що основна активність радіонуклідів на пагорбах все ще сконцентрована в поверхне-

вому шарі ґрунту (0-2 см), а на пониженнях - в десятисантиметровому шарі.

Зі збільшенням ступеня зволоження ґрунтів глибина проникнення радіонуклідів суттєво збільшується. В зволжених місцях на глибині 20-30 см знаходиться 1–5% ^{137}Cs , 2–8% ^{90}Sr та 0,3-0,8% ^{241}Am від загальної активності в ґрунті. На сухих ділянках менше одного відсотка активності перемістилось на глибину 30 см. За експериментальними даними основний вміст радіонуклідів сконцентрований в кореневмісному горизонті ґрунту, що свідчить про низькі темпи вертикальної міграції радіонуклідів.

Таблиця 1. Постійна міграційної здатності радіонуклідів у ґрунтах

Радіонуклід	λ (см-1)	
	Пагорб	Низина
^{137}Cs	0,60	0,30
^{90}Sr	0,62	0,45
^{241}Am	0,70	0,33

Для прогнозової оцінки вертикальної міграції по профілю ґрунту слід використовувати λ та активність радіонуклідів A_0 в поверхневому шарі ґрунту.

Досліджено особливості накопичення радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr рослинами - типовими представниками досліджуваної території (*Carex* L., *Stipa* L., *Calluna vulgaris* L.). Вміст ^{137}Cs в рослинах був в межах 280 – 870 кБк/кг, а ^{90}Sr змінювався від 252 до 575 кБк/кг. У *Calluna vulgaris* L. у пробах надземної фітомаси реєстрували найвищі концентрації радіонуклідів ^{90}Sr та ^{137}Cs . Це, ймовірно, зумовлено тим, що верес багаторічна рослина, коріння якого тісно оплетене мікоризою. Деякі мікоризні гриби відіграють ключову роль у мінераль-

Розподіл радіонуклідів по вертикальному профілю ґрунту досить точно описується експоненційною залежністю: $A(x) = A_0 \times \exp(-\lambda x)$, де A_0 - активність радіонукліда у верхньому шарі ґрунту (кБк/кг); $A(x)$ - активність радіонукліда у дослідному шарі ґрунту (кБк/кг); λ - постійна, що характеризує міграційну здатність радіонукліда і залежить від фізико-хімічних властивостей радіонукліду та типу ґрунту; x - глибина (см). Визначено значення λ для окремих радіонуклідів (табл.1).

ному живленні судинних рослин, інтенсифікують надходження радіонуклідів у складі поживних речовин до вищих рослин, які знаходяться в симбіозі з грибами.

Система “ґрунт-рослина” є найбільш важливою ланкою в біологічних ланцюгах міграції радіонуклідів. Вміст радіонуклідів у рослинності визначається як загальним вмістом їх у ґрунті, так і кількістю мобільних форм, а також біологічною особливістю рослин. Інтенсивність переносу радіонуклідів з ґрунту в рослини оцінювали за величиною коефіцієнтів накопичення K_n (відношення питомої активності радіонукліда в надземній частині рослини до питомої активності у ґрунті), результати розрахунків представлені в таблиці 2.

Таблиця 2. Коефіцієнти накопичення радіонуклідів різними видами рослин

Вид	K _н	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Cárex L. Осока	0,21	0,58
Stípa L. Ковила	0,40	0,55
Calluna vulgaris L. Верес	0,91	1,37

Показано, що рослини накопичують ⁹⁰Sr більш інтенсивно (K_н ⁹⁰Sr більше в 1,3-2,7 рази, ніж ¹³⁷Cs). За рівнем зростання K_н ¹³⁷Cs рослини складають ряд: верес >ковила> осока, а ⁹⁰Sr - верес> осока ≥ковила. Величина K_н визначається видовою приналежністю рослин, типом ґрунту, на якому вони зростають, та вмістом радіонуклідів у ґрунті.

За методом послідовної екстракції визначено форми знаходження радіонуклідів у ґрунтах на слідах паливних випадін. Встановлено, що основний вміст ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr у ґрунтах перебуває в необмінних та

фіксованих формах і лише ~20 % радіонуклідів - у біологічно доступних формах. У таблиці 2 наведено розподіл форм радіонуклідів у ґрунтах. Такий розподіл, ймовірно, зумовлений тим, що значна частка радіонуклідів у ґрунтах все ще знаходиться в складі паливних частинок і слабо вилугується контактними розчинами. Результатами досліджень встановлено, що значна частка радіонуклідів у ґрунтах перебуває в необмінному стані і найближчим часом не буде включатися в процеси перерозподілу.

Таблиця 3. Форми радіонуклідів у ґрунтах дослідного полігону

Форми радіонуклідів	¹³⁷ Cs, %	⁹⁰ Sr, %	²⁴¹ Am, %
Водорозчинна	0,20 ±0,01	0,25 ±0,05	0,5±0,2
Обмінна	0,31 ±0,02	9,35 ±0,8	1,0±0,5
Пов'язана з органічною речовиною	0,49 ±0,03	2,4 ±0,45	7,0 ±0,2
Рухома	2,5 ±0,5	7,5 ±0,7	45 ±5
Кислоторозчинна	12,5 ±1,5	2,5 ±0,5	20 ±2
Твердий залишок	84 ±5	78 ±8	26,5 ±3

Слід зазначити, що у приповерхневих шарах ґрунту (2-5 см) спостерігали збільшення в 2-4 рази легкодоступних форм радіонуклідів ⁹⁰Sr, ймовірно, за рахунок переміщення міграційноактивних форм. Щодо до ¹³⁷Cs та ²⁴¹Am, то такі зміни не реєструвалися.

Проведено лабораторні дослідження процесів вилугування радіонуклідів з проб ґрунту розчина-

ми різного складу. У якості контактних розчинів використовували нерадіоактивні водні настої листяного опаду (pH=5,5) та хвої (pH=4,7), а також дистильовану воду (pH=6,8). Максимальну ступінь вилугування радіонуклідів з ґрунту відмічали при використанні водної витяжки листяного опаду. Питома активність радіонуклідів у водних витяжках ґрунту зростає в ряду дистильована

вода < хвоя < листяний опад. Збільшення виходу (в 3-5 раз) радіонуклідів з ґрунту в контактний розчин (рослинні витяжки), ймовірно, зумовлено присутністю різних органічних кислот, що впливають на трансформацію хімічних сполук, до складу яких входять радіонукліди.

При проведенні спектрометричних досліджень екстрагованих

фракцій радіонуклідів з біомаси рослин встановлено, що в рослинах радіонукліди переважно знаходяться в обмінно-адсорбційній та органічній формах (85-90%). Розподіл радіонуклідів по фракціях не залежав від питомої активності ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr в рослинах. На рис. 2 представлено форми знаходження радіонуклідів в рослинах.

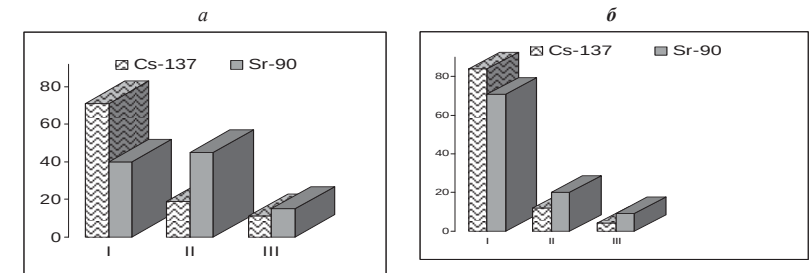


Рис. 2. Форми знаходження ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr в рослинах: I - обмінно-адсорбційна; II - органічна; III - мінеральний залишок; а) верес; б) осока.

Отже, значна частка радіонуклідів після відмирання рослин може активно включатись у кругообіг речовин як абіогенний, так і біогенний.

Досліджено вміст радіонуклідів у лісовій підстилці. Активність ¹³⁷Cs в підстилці у різних місцях відбору була в межах 474 - 790 кБк/кг, а активність ⁹⁰Sr змінювалась від 400 до 600 кБк/кг. Активність лісової підстилки перевищувала активність ґрунту на різних ділянках від 1,5 до 4,0 разів.

У модельних експериментах досліджено залежність виходу водорозчинних форм радіонуклідів з лісової підстилки від часу вилугування. У якості контактної речовини використовували дистильовану воду (імітатор дощової). Протягом 15 діб спо-

стерігали поступове зростання сумарної активності радіонуклідів, що перейшли в контактний розчин. За час спостереження радіоактивність контактного розчину збільшилась майже в 2 рази. Отже, в лісних екосистемах, у низинах, де тривалий час може затримуватись дощова вода (опаді), лісова підстилка стає істотним джерелом рухливих форм радіонуклідів. Радіонукліди, що вийшли з лісової підстилки у водний розчин, легко переміщуються за рахунок конвективного переносу до кореневмісного шару ґрунту і в подальшому вступають у біологічний кругообіг. Отже, тривала наявність вологи на поверхні ґрунту - важливий фактор, що впливає на вилугування та міграційну здатність радіонуклідів.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено:

- територіальну нерівномірність забруднення дослідного полігону радіоактивними викидами;
- ізотопний склад техногенних радіонуклідів у ґрунтах і рослинності;
- основна активність радіонуклідів знаходиться в десятисантиметровому шарі ґрунту;
- у ґрунтах на слідах паливних випадін лише ~20 % радіонуклідів

Література

1. Иванов Ю. А., Левчук С. Е., Киреев С. И. и др. Подвижность радионуклидов выброса ЧАЭС в почвах отчужденных территорий // Ядерная физика та енергетика. - 2011. - Т. 12. - № 4. - С. 375 - 384.
2. Kashparov V.A., Lundin S.V., Khomutinin Yu.V. et.al. Soil contamination with ⁹⁰Sr mobility in the Chornobyl accident // Journal of Environment Radioactivity. - 2001. - Vol. 56. - No 3. - P. 285 - 298.
3. Prister B.S., Baryakhtar V.G., Perepelyatnikova L.V. et al. Experimental Substantiation and Parameterization of Model Describing ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr Behavior in a Soil-Plant System // Environmental Science and Pollution Research. -2003. - Special Issue 1. - P. 126 - 136.
4. Методика відбору ґрунтових і рослинних проб для визначення в них вмісту радіоактивних речовин. - К.: МінАПК. УкрНДІСТР. -1987. - 48 с.
5. Павлоцкая Ф.И. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. / Ф.И. Павлоцкая. - М.: Атомиздат, 1974. - 215 с.
6. Горяченкова Т.А., Казинская И.Е., Лавринович Е.А. и др. Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах /Материалы ІУ Междунар. конф. (Томск 4-8 июня 2013 г.) Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. - Томск: Изд-во Томского политех. ун.-та.- 2013.- С. 151-154.
7. Орлов Д.С. Химия почв. Изд-во Московского Университета.- 1992.- С.399.
8. Дементьев Д.В., Болсуновский А.Я. Содержание техногенных радионуклидов в кустарниковых растениях и грибах в зоне влияния Горно-химического комбината (Красноярский край) //Journal of Siberian Federal University. Biology 2 (2009 2) 172-181
9. Ganzha Ch., Gudkov D., Ganzha D., Klenus V., Nazarov A. Physicochemical forms of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in components of Glyboke Lake ecosystem in the Chornobyl exclusion zone //Journal of Environmental Radioactivity 127.- 2014. P. 176-181.
10. Желтоножская М.В., Кулиш Н.В., Липская А.И., и др. Новые методические подходы к одновременному измерению активности ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в объектах окружающей среды // Ядерная физика та енергетика. - 2012. -Т. 13. - № 4. - С. 403-408.
11. Chernobyl Catastrophe. /ed. Baryakhtar V.G. - Kyiv: Export Publishing House. - 1997. - 572 p.
12. 20 лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в будущее /Национальный доклад Украины. - К.: Аттика. - 2006. - 224 с.

¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr знаходяться в доступній для рослин формах;

- у рослинах та підстилці переважають обмінно-адсорбційна та органічна форми (85-90 %), що являють собою додаткове джерело біологічно доступних форм радіонуклідів;
- тривалий контакт води з лісовою підстилкою та ґрунтом сприяє деградації та вилугуванню з паливних частинок радіонуклідів та їх міграційним процесам.

УДК

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ВУГІЛЬНИХ РОДОВИЩ ДОНЕЦЬКОГО ВУГІЛЬНОГО БАСЕЙНУ

Рудько Г.І.¹, Плахотний С.А.²

Рудько Г.І. – д.т.н., д.геогр.н., д.геол.-мін.н., професор, Державна комісія України по запасах корисних копалин, Київ, Україна, rudko@dkz.gov.ua;
Плахотний С.А. – начальник відділу з надання надруку користування Держгеонадр України

Вугільні підприємства Донбасу, які тимчасово знаходяться на невідконтрольній українській владі території несуть величезну загрозу екологічній безпеці всього регіону. Через застарілі й неефективне обладнання та способи видобутку вугілля на Донбасі, а також ліквідації шахт відбуваються такі небезпечні процеси як просідання, підтоплення, заболочення денної поверхні, порушення загального водного балансу, засолення, самозаймання відвальних порід та ін. Щоб забезпечити розвиток загрозливих екологічних явищ, які можуть спричинити невідворотні процеси необхідно не тільки якнайшвидше припинити військові дії на території Донецької та Луганської областей, а й розробити і втілити в дію план екологічних заходів з відновлення вугільної промисловості цих регіонів.

Экологическая безопасность угольных месторождений Донецкого угольного бассейна. Рудько Г.И., Плахотный С.А. Угольные предприятия Донбасса, временно находящиеся на неподконтрольной украинским властям территории несут огромную угрозу экологической безопасности всего региона. Из-за устаревшего и неэффективного оборудования и способов добычи угля на Донбассе, а также ликвидации шахт происходят такие опасные процессы как проседание, подтопление, заболачивание дневной поверхности, нарушение общего водного баланса, засоление, самовозгорание отвальных пород и т.д. Чтобы предотвратить развитие угрожающих экологических явлений, которые могут вызвать необратимые процессы необходимо не только как можно скорее прекратить военные действия на территории Донецкой и Луганской областей, но и разработать и воплотить в действие план экологических мероприятий по восстановлению угольной промышленности этих регионов.

Environmental safety of coal deposits of the Donetsk coal basin. G.I. Rudko, S.A. Plahotniy. Coal enterprises of Donbas which are temporally located on the uncontrolled territory of Ukrainian authorities cause an enormous threat to environmental safety of the whole region. Due to outdated and inefficient equipment and methods of coal mining in the Donbas, and also due to elimination of mines there are such dangerous processes like subsidence, flooding, swamping of the ground surface, violation of the general water balance, salinity, combustion of overburden rocks, etc. In order to prevent the development of threatening environmental phenomena, which could cause irreversible processes, it is necessary not only to stop military operations on the territory of Donetsk and Lugansk regions as soon as possible, but also to develop and put into action the plan of environmental activities of the coal industry rehabilitation in these regions.

Актуальність дослідження

Вугільна промисловість у районах концентрації шахт, збагачувальних

фабрик та інших промислових підприємств істотно погіршує екологічне становище. Вугілля в Донбасі видобувається вже понад 200 років. Про-