

# MODELING OF GEOFILTRATION PARAMETERS OF RADIONUCLIDES' Cs<sup>137</sup> AND Sr<sup>90</sup> TRANSPORT IN THE HYDROSPHERE UNDER THE COAL MINES FLOODING CONDITIONS

*I.Sadovenko<sup>1</sup>, O. Ulytsky<sup>2</sup>, A. Zahrytsenko<sup>1\*</sup> & K. Boiko<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*

*<sup>2</sup> State ecological academy of postgraduate education and management, Kyiv, Ukraine*

*\*Corresponding author: [zahrytsenko.a.m@nmu.one](mailto:zahrytsenko.a.m@nmu.one)*

**Abstract.** The article considers the issue of quantitative parameters of radionuclides migration within abandoned coal mining areas on the base of current flooding stage modelling, when groundwater rich critical level, and the stabilization process is accompanied by water resources rebound and water-budget components transformation.

Possible concentrations of Sr<sup>90</sup> that would be expected to enter the rivers system at the stage of groundwater level rebound to absolute marks (+120...+145 MASL) are calculated. It is found that the possibility of Cs<sup>137</sup>- ions migration is very low due to specificities of migration mechanism. It has been demonstrated that radionuclides migration pathways figuration depends on the form of distribution and groundwater flow directions at the final stage of mines flooding.

The proposed under the research method enables to perform the forecast of the environmental consequences of coal mines' flooding in Ukraine with the ability to assess the pollution of the hydrosphere not only by radionuclides but also by other chemical elements and create tools for negative environmental situations reduction and management.

The analytical comparison of facts and previous proposals from different sources were applied in order to determine the control measures and technical arrangement of possible threats and its ongoing assessment.

**Key words:** mine workings, flooding, geofiltration modeling, radioactive contamination

## МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ Cs<sup>137</sup> ТА Sr<sup>90</sup> У ГІДРОСФЕРІ ПРИ ЗАТОПЛЕННІ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

*I. Садовенко<sup>1</sup>, О. Улицький<sup>2</sup>, А.Загриценко<sup>1\*</sup>, К. Бойко<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна*

*<sup>2</sup> Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, м. Київ, Україна*

*\* Відповідальний автор: [zahrytsenko.a.m@nmu.one](mailto:zahrytsenko.a.m@nmu.one)*

**Анотація.** В статті досліджені кількісні параметри процесу міграції радіонуклідів в порушеному гірничому масиві вугільних шахт шляхом геофільтраційного моделювання сучасних умов затоплення гірничих виробок, коли рівень підземних вод досяг критичної позначки, а процес його стабілізації супроводжується відновленням водних ресурсів і трансформацією складових водного балансу.

Розраховані можливі концентрації Sr<sup>90</sup>, що надходитимуть у річкову мережу на етапі відновлення рівня підземних вод до абсолютних відміток (+120...+145 м). Встановлено, що ймовірність міграції іонів Cs<sup>137</sup> дуже низька, зважаючи на особливості механізму міграції. Показано, що шляхи міграції радіонуклідів визначаються формою розподілу та спрямованістю течій підземних вод на кінцевому етапі затоплення шахт.

Запропонована методика дослідження може бути використана для прогнозу екологічних наслідків затоплення вугільних шахт України із можливістю оцінки забруднення гідросфери не тільки радіонуклідами, але й іншими хімічними елементами та створення засобів контролю і врегулювання негативних екологічних ситуацій.

Для визначення засобів контролю і технічного врегулювання можливих загроз та їх

поточного оцінювання проведено аналітичне співставлення фактів та попередніх пропозицій із різних джерел.

**Ключові слова:** гірничі виробки, затоплення, моделювання геофільтрації, радіоактивне забруднення

### Вступ

Досвід закриття вугільних шахт у Німеччині, Великобританії, США, Польщі та ін. країнах ґрунтується на продовженні використання водовідливого режиму та забезпеченні відповідного технічного стану опорних (буферних) шахт (Westermann, Rudakov, Reker Melchers, 2019; Malinowska, Witkowski, Guzy & Hejmanowski, 2020) навіть при масовому закритті останніх. В Україні існує практика, коли закриття шахти означає майже повне припинення будь-якої господарської діяльності у межах об'єкту, в т.ч. – припинення роботи водовідливого комплексу з подальшими негативними екологічними наслідками (підтоплення і просідання поверхні, деформації споруд, хімічне забруднення річкової мережі та ін.).

Особливо небезпечна гідрогеологічна ситуація на поточний час формується у Центральному вуглепромисловому районі Донбасу, де закривається 24 із 27 шахт, що функціонували раніше. Слід визнати, що процес затоплення гірничого простору шахт реалізується практично без обґрунтованих заходів щодо його керування. У нинішній ситуації – коли контроль над режимом затоплення багатьох шахт Центрального вуглепромислового району Донбасу (ЦРД) втрачено і впроваджується не «мокра консервація», а фактичне затоплення гірничих виробок – гостро постала необхідність у наочному відображенні (моделюванні) цього процесу з метою прогнозу негативних екологічних наслідків та обґрунтування протидії їх поширенню. Особливе занепокоєння викликає затоплення гірничих виробок шахт «Юнком» та «Олександр-Захід» як об'єктів підвищеної небезпеки. У 1979 р. на шахті «Юнком» (південно-східна частина ЦРД) на глибині 903 м було проведено експеримент «Кліваж» з метою створення додаткової тріщинуватості масиву гірських порід для дегазації вугільних пластів та зменшення ймовірності раптових викидів вугілля та газу. Відомо, що після вибуху камера об'єкту «Кліваж» могла вміщувати близько 300 мг-екв радіоактивних забруднень (Dovhyi, Korzhnev, Kurylo, Malakhov, Trofymchuk & Chumachenko, 2012). Роботу водовідливних комплексів на суміжних шахтах «Червоний Жовтень» та «Полтавська» припинено у 2018 та 2014 рр, відповідно. Обводнення гірничих виробок шахти «Юнком» не виключає, на думку експертів (Yakovlev, Yermakov & Ulytsky (2019), руйнування вибухової камери та подальшу міграцію радіаційно забруднених вод на межі максимальних концентрацій ( $Sr^{90} \approx 10^{-7}$  Кі/дм<sup>3</sup> і  $Cs^{137} \approx 10^{-8}$  Кі/дм<sup>3</sup>) у підземній течії. На сьогодні спостереження за радіаційним забрудненням шахтних вод не виконуються. Отже, існує актуальна проблема дослідження і прогнозу гідродинамічної ситуації в умовах затоплення шахти «Юнком» та суміжних шахт з оцінкою концентрації можливого надходження радіонуклідів до поверхневих вод р. Булавін та визначенням реальних заходів щодо протидії негативним наслідкам цього процесу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В Україні питання, присвячені дослідженню та прогнозуванню змін гідрогеологічного режиму в межах шахтного простору, розглядалися переважно як частина технічних рішень щодо обґрунтування заходів переведення окремих шахт у режим «мокрої консервації». Ці заходи ґрунтувалися на варіантних схемах забезпечення водовідливого режиму «буферних» шахт з-поміж групи шахт, які переводяться на «мокру консервацію», і відображали в основному технологічні аспекти. Протягом останніх двох десятиліть почала формуватись вітчизняна школа моделювання геофільтраційних та міграційних процесів у гідрогеологічному середовищі шахтних полів. Найбільш комплексно огляд методики гідрогеологічного моделювання в умовах затоплення шахт представлено у роботах (Zahrytsenko, Podvigina & Dereviahina, 2018; Sadovenko, Zahrytsenko, Podvigina, Dereviahina & Brzeźniak (2018). У публікаціях (Ulytsky, Yermakov, Lunova, Buglak, 2018; Timoshchuk & Sherstyuk, 2012) висвітлені питання екологічного напрямку, пов'язані із

оцінкою наслідків затоплення гірничих виробок шахт – просідання земної поверхні, забруднення водного середовища.

Відомі дискусійні тлумачення щодо можливих гідрогеомеханічних ушкоджень оболонки камери об'єкту «Кліваж» з подальшими пропозиціями щодо геотехнологічного укріплення виробок та підвищення їх сорбційних властивостей. Детальний параметричний аналіз гідрогеомеханіки та міграції зони впливу об'єкту цього не підтверджує ((Sadovenko & Rudakov, 2005). Тобто стан дискусійності питання щодо небезпечності об'єкту залишається відкритим і потребує суттєвого оновлення науково-практичних підходів до його вирішення.

Досить тривалий час наукові принципи моделювання геофільтрації масивів шахтних полів висвітлюються і у роботах зарубіжних вчених. Базові основи геофільтраційного моделювання висвітлено в публікаціях вчених (Shuchita Garg, 2016; Quiros & Fernández-Álvarez, 2019). На особливу увагу заслуговують роботи польських (Szczepiński, 2019) та німецьких експертів (Reker, Westermann, Goerke-Mallet & Melchers, 2020), як приклад впровадження передової практики прийняття технічних рішень щодо закриття вугільних шахт на основі моделювання процесу затоплення. Проте аналіз публікацій показує, що існуючий науковий досвід прогнозу гідродинамічної ситуації в породному масиві вугільних шахт, що затоплюються, стосується умов керованого затоплення. Кількість робіт, що присвячені дослідженню умов та екологічних наслідків затоплення вугільних шахт, коли рівень відновлення підземних вод досяг критичних абсолютних відміток, вкрай обмежена.

**Мета і задачі дослідження.** Встановити шляхи та концентрації надходження у підземну та поверхневу гідросферу найбільш небезпечних радіонуклідів в умовах відновлення гідродинамічної ситуації в зоні радіаційно небезпечних об'єктів шахтних полів південного крила Центрального району Донбасу для оцінки екологічного стану навколишнього середовища.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- встановити гідрогеологічні параметри та визначити складові водного балансу в зоні впливу шахтних виробок, що затоплюються;
- виконати прогноз із застосуванням чисельного геофільтраційного моделювання параметрів кінцевого етапу затоплення (абсолютні відмітки рівнів затоплення, напрямок руху підземних вод, розподіл складових балансу);
- визначити можливі шляхи та концентрації надходження радіологічного забруднення від вибухової камери об'єкту «Кліваж» шахти «Юнком» до навколишнього середовища в результаті неконтрольованого затоплення шахти, а також технічно прийнятні засоби контролю можливого негативного розвитку процесу та його упередження.

#### **Методика**

Графо-аналітичний аналіз рядів часового простеження за режимом затоплення досліджуваних шахт дозволив виявити факт формування підземного стоку у річки. Наявність підземного стоку свідчить про трансформацію складових водного балансу – поновлення дренажних властивостей річок, і, в свою чергу, є ознакою початку досягнення рівноваги гідродинамічного режиму. Кількісні показники балансу відповідають встановленим на регіональній моделі геофільтрації шахтних полів ЦРД (Sadovenko, Rudakov & Podvigina, 2010).

На сучасному етапі формування водного балансу в межах впливу шахт, що затоплюються, величина витрати підземної течії може бути розрахована для меж досліджуваної території за наступною формулою:

$$Q_n = 86,4 \cdot M_n \cdot F, \quad (1)$$

де  $Q_n$  – величина витрати підземних вод із площі  $F$ , м<sup>3</sup>/добу;  $M_n$  – модуль підземного стоку з 1 км<sup>2</sup>, л/сек;  $F$  – площа водозбору підземних вод, км<sup>2</sup>.

У порушених умовах породного масиву шахтних полів модуль підземного стоку ( $M_n$ ) та інфільтраційного живлення ( $W$ ) можуть суттєво відрізнятись від відомих емпіричних та експериментальних значень. Тому зазначені параметри потребують уточнення шляхом імітаційних чисельних гідродинамічних розрахунків.

Оцінка розподілу балансових складових, а також гідрогеологічних параметрів в області

гідродинамічного впливу шахт, що затоплюються, виконувалась на основі геофільтраційної моделі. Остання у просторовому плані являє собою водозбірну площу розміром 70 км<sup>2</sup> з наявними гірничими виробками шахт «Червоний Жовтень», «Юнком» та «Полтавська».

Зовнішні межі області фільтрації представлені граничними умовами другого роду з нульовою витратою потоку та граничними умовами першого роду на контурі р. Булавин. Межа граничної умови другого роду проведена по лінії вододілу водозбірного басейну ЦРД, що є геологічною віссю Донецького антиклинорію, та виходах на поверхню пісковиків водоносних комплексів свит С<sub>2</sub><sup>7</sup> - С<sub>2</sub><sup>3</sup>. Для відтворення рівнів затоплення та відображення депресійної поверхні здійснено моделювання із наявними внутрішніми границями потоку у межах шахтних полів у вигляді граничних умов першого роду. Величина гідродинамічного рівня дорівнює абсолютній дренажній відмітці найближчих до поверхні затоплених горизонтів шахт. Враховуючи сучасний гідродинамічний стан, за якого відбулось затоплення майже 95% усіх гірничих виробок шахт, вирішувалась обернена і пряма задача геофільтрації. Оскільки моделювався процес водообміну на глибині розповсюдження умовної зони вивітрювання кам'яновугільних відкладів (≈120 м), тектонічні порушення не відтворювались. Схематизована одним шаром модель відображає середовище поширення техногенного водоносного горизонту у вивітрилих середньокам'яновугільних породах. Гідрогеологічні параметри водоносної товщі, а саме коефіцієнт фільтрації (К<sub>ф</sub>=0,38 м/добу), пружна водовіддача (μ<sup>\*</sup>=0,00011), гравітаційна водовіддача (μ=0,019), тощо прийняті за даними гідрогеологічного вивчення гірського масиву шахтних полів геологічними установами. У якості опорного періоду моделювання обрано час 120 діб, який відповідає тривалості підвищення рівня у шахті «Полтавська» і за результатами попереднього аналізу свідчить про відновлення живлення поверхневого водотоку.

Для моделювання рівневої поверхні підземних вод використано програму MODFLOW, в основі математичного апарату якої є розв'язок диференціальних рівнянь фільтрації кінцево-різницею методом з граничними умовами на зовнішніх та внутрішніх контурах.

Міграція забруднюючих речовин у потоці підземних вод визначається умовами області фільтрації, а також міграційними властивостями забруднювачів. Механізми масопереносу різних радіоактивних компонентів відрізняються. Так, для Sr<sup>90</sup> переважає механізм конвективного переносу в розчині, тобто з латеральними потоком безнапірних або напірних вод. А для Cs<sup>137</sup>, що легко поглинається твердою фазою гірської породи, характерний процес дифузії. Висхідна фільтрація під час затоплення гірничих виробок шахти «Юнком» навіть при ймовірному пошкодженні камери вибуху вочевидь супроводжується надходженням радіоактивних компонентів у зони радіогеохімічно ненасичених порід. Міграційні властивості Cs<sup>137</sup> обумовлюватимуться переважно поглинанням його іонів масивом гірських порід. Тому, на кінцевий період затоплення, що позначатиметься формуванням фільтрації підземних вод у напрямку до р. Булавин, доцільно виконати оцінку концентрації та шляху надходження іонів Sr<sup>90</sup> як головного забруднюючого компоненту.

Фахівцями Харківського фізико-технічного інституту (2004 р.) встановлені початкові концентрації стронцію-90 у підземних водах (≈ 10<sup>-7</sup> Кі/дм<sup>3</sup>) у разі руйнування вибухової камери об'єкту «Кліваж». Міграція іонів стронцію під час висхідної вертикальної та подальшої горизонтальної фільтрації супроводжується процесами їх деструкції (розпаду). Зменшення концентрації початкової речовини C<sub>1</sub> може бути описане рівнянням першого порядку:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = -\lambda_1 C_1, \quad (2)$$

де λ<sub>1</sub> – параметр розпаду, діб<sup>-1</sup>, λ<sub>1</sub> = ln 2 / T<sub>1</sub>; T<sub>1</sub> – період напіврозпаду речовини; t – час міграції (діб).

За відомої початкової концентрації забруднюючої речовини та відомого часового інтервалу диференціальний вираз рівняння (2) набуває параметричного вигляду (розв'язок Коші)

$$C_1 = a \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot t) \quad (3)$$

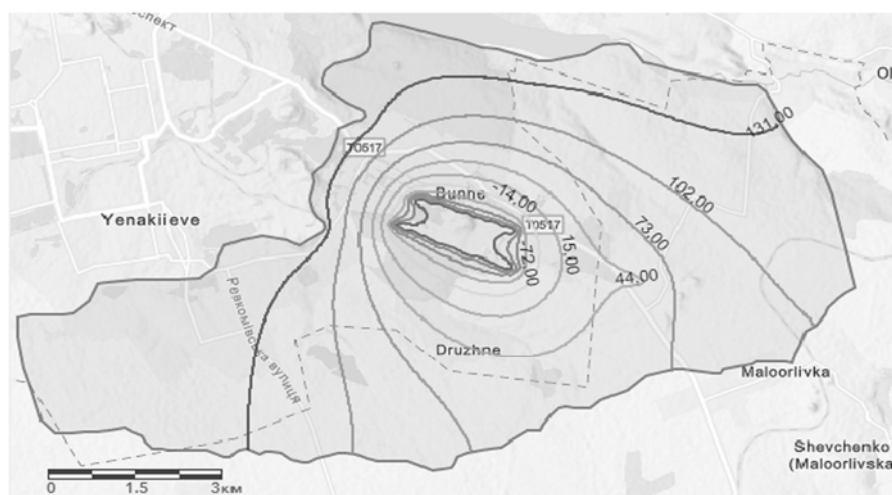
де C<sub>1</sub> – величина зменшення концентрації речовини; a – початкова концентрація речовини; λ<sub>1</sub> – параметр розпаду, діб<sup>-1</sup>; t – час міграції (діб).

Міграція іонів  $Sr^{90}$  до річкової мережі відбувається в умовах горизонтальної фільтрації, настання якої корелює з початком стабілізації режиму затоплення або наближенням до стаціонарного режиму фільтрації. Найбільш ймовірні напрямки міграції іонів  $Sr^{90}$  встановлені шляхом застосування математичного апарату обчислення масопереносу (MODPATH) на параметрах моделі геофільтрації та прогнозного положення рівнів.

При обґрунтуванні технічно прийнятних засобів контролю можливого негативного сценарію радіонуклідного забруднення проаналізовані результати попередніх досліджень, бази фактичних даних про об'єкт та врахований багаторічний досвід співавтора роботи Улицького О.А. у регіоні ЦРД, безпосередньо пов'язаний з проектами закриття вугільних шахт.

### Результати

На основі запропонованої схематизації території досліджень виконано моделювання процесу затоплення шахт за опорний період спостереження, який характеризувався надходженням підземного стоку до гірничих виробок. Слід зазначити, що відтворення рівнів затоплення на зазначений період у межах шахтних полів досягнуто варіантною зміною вхідних параметрів. Найбільш чутливою модель виявилася до величини інфільтраційного живлення. Збільшення величини інфільтраційного живлення від 85 до 130 мм/рік дозволило відтворити близькі до спостережних рівні затоплення. Підвищенні значення величини інфільтраційного живлення обумовлені значною тріщинуватістю зони вивітрювання. Змодельована поверхня розподілу рівнів за існуючих геофільтраційних параметрів представлена на рис. 1. Похибки моделювання представлені у таблиці 1.



Умовні позначення:

- водозбірна площа
- 102,00 абсолютна відмітка рівня затоплення, м
- ізолінія рівня затоплення, м

Рис. 1 Положення рівнів затоплення за результатами рішення оберненої задачі

Таблиця 1

Похибки визначення рівня затоплення шахт за опорний період (120 діб)

Назва шахти	Абсолютна відмітка дзеркала затоплення після 120 діб, м		Відносна похибка, %
	Фактична	На моделі	
«Червоний Жовтень»	-148,60	-142,00	4,44
«Юнком»	-240,10	-210,00	12,53
«Полтавська»	43,50	48,00	10,34

Модуль підземного стоку території, розрахований за рівнянням (1), враховуючи отриману величину витрати підземних вод, становить 3,16 л/сек з 1 км<sup>2</sup>.

За результатами прогнозного моделювання час стабілізації складає 1740 діб з початку затоплення гірського масиву, а характерні для режиму затоплення абсолютні відмітки рівня підземних вод складають +120...+145 м. Розподіл балансових складових на прогнозний період часу наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Баланс моделі на прогнозний період

Балансові складові	Прибуткова	Витратна
Інфільтраційне живлення по площі, м <sup>3</sup> /доб	37372	-37372
Приток до границі I роду (р. Булавин), м <sup>3</sup> /доб	2718	-
Розвантаження у річкову мережу, м <sup>3</sup> /доб	-	- 2368
Всього, м <sup>3</sup> /доб	40090	-39740

Прогнозне положення рівня підземних вод, отримане за результатами моделювання на період 1740 діб з початку затоплення породного масиву, показано на рис. 2.



Умовні позначення:

- водозбірна площа
- 120,0 абсолютна відмітка рівня підземних вод, м
- гідроізогіпса

Рис. 2. Положення рівня підземних вод на прогнозний період

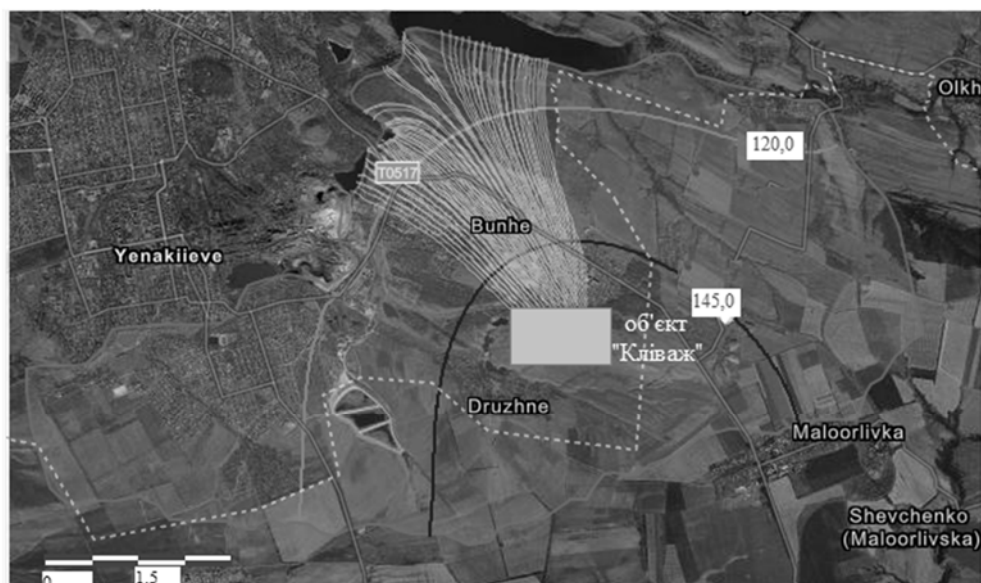
При прогнозі міграції радіонуклідів враховано, що період напіврозпаду Sr<sup>90</sup> становить 28,79 років. Відповідно, параметр розпаду Sr<sup>90</sup> складає 0,00006.

Розрахунковий час зменшення концентрації – враховує період від моменту виміру концентрацій у 1991 р. до прогнозованого часу настання гідродинамічної рівноваги – всього 11602 доби. Величина зменшення концентрації Sr<sup>90</sup> відповідно до рівняння (3) у підземному потоці на момент встановлення гідродинамічної рівноваги навколо шахтного поля «Юнком», а також прилеглих територій водозбірної площі, становитиме  $1,99 \cdot 10^{-13}$  Кі/дм<sup>3</sup>.

Отже, можлива концентрація Sr<sup>90</sup>, яка надходитиме у поверхневу гідрографічну мережу на момент досягнення рівнів затоплення абс. відміток +120...+145 м, складе  $\approx 2 \cdot 10^{-13}$  Кі/дм<sup>3</sup>.

Згідно даних опробувань шахтних вод навколо об'єкту «Кліваж», виконаних науково-дослідним інститутом Промтехнології у 1991 р., вміст Sr<sup>90</sup> у шахтних водах становив  $8 \cdot 10^{-13}$  Кі/дм<sup>3</sup>. Для порівняння, об'ємна активність водотоків Донбасу зафіксована на рівні  $5 \cdot 10^{-13}$  Кі/м<sup>3</sup>. Низькі показники концентрацій стронцію обумовлені сорбційною здатністю оточуючого породного масиву та герметичністю вибухової камери. Напрямок міграції Sr<sup>90</sup> від

джерела забруднення (вибухова камера) до річкової мережі визначається формою розподілу та спрямованістю потоку підземних вод на 1740 добу з початку затоплення шахт. Найбільш ймовірні напрямки міграції іонів  $Sr^{90}$ , встановлені шляхом застосування математичного апарату із розрахунку масопереносу (MODPATH), проілюстровані на рисунку 3.



Умовні позначення:

- |   |   |
|---|---|
|  водозбірна площа |  траекторія руху іонів $Sr-90$ від камери вибуху об'єкту "Кліваж" |
| 120,0 абсолютна відмітка рівня підземних вод, м   |  об'єкт "Кліваж"   |
|  гідроізогіпса   |   |

Рис. 3. Відображення напрямку міграції іонів  $Sr^{90}$  в умовах настання рівноважного гідродинамічного режиму, отримана на основі моделювання із застосуванням MODPATH

Прогнозований час настання гідродинамічної рівноваги може мати певний інтервал коливання, враховуючи, що на даний період часу незатопленими залишаються виробки верхніх горизонтів шахт «Червоний Жовтень» та «Юнком». Крім того, це може бути наслідком значної неоднорідності та анізотропії фільтраційних властивостей кам'яновугільних порід, що слід враховувати подальшою фрагментацією моделі на основі моніторингових спостережень. Також відомо, що при наближенні рівня підземних вод до зони вивітрювання і поширення тріщинуватості порід середнього карбону (для території ЦРД остання поширюється на глибину 150 м від поверхні), слід очікувати активізацію процесу повторних вертикальних деформацій земної поверхні. Враховуючи істотні величини і складність зрушення порід у ЦРД, коли очікувана амплітуда вертикальних деформацій земної поверхні сягатиме більше 3-5 м, а також значну глибину поширення техногенної тріщинуватості, не слід виключати ймовірність формування додаткового живлення підземного стоку. Подальше формування підпору підземних вод у межах досліджуваної території може значно погіршити водообмін та спричинити підтоплення у межах знижених ділянок рельєфу (заплава р. Булавин та долини балок).

Геолого-гідргеологічні умови ЦРД та їх суттєві зміни в результаті двохсотрічного інтенсивного видобутку вугілля, проектування і практика ведення гірничих робіт з надзвичайно низьким відсотком витрат (менше 10% собівартості вугілля) на підтримку екостабільності в регіоні обумовили ситуацію, за якої практично неможливо задіяти фінансові та технічні ресурси на переведення дослідженого авторами об'єкту у режим гарантованої безпеки. Рядом досліджень пропонується реалізувати надзвичайно складні технічні заходи, серед яких буріння свердловин глибиною близько 1000 м з комплексом геомеханічних, гідргеохімічних, гідродинамічних, геофізичних та радіаційних випробувань, для уточнення і

корегування прогнозів. Крім цього не виключається реалізація заходів щодо геомеханічного зміцнення зони об'єкта «Кліваж» і заповнення гірничих виробок сорбційними матеріалами на шляхах міграційних течій, що є вкрай проблематично.

Аналіз факторів і досліджень, які згадувались при постановці проблеми, дозволяють виокремити основні підстави до більш реального сценарію переведення об'єкту досліджень у контрольований режим, а саме:

- вибухова камера зі склоподібною оболонкою знаходиться у затопленому стані, тобто нижче рівня підземних вод, що підтверджене бурінням свердловин у порожнину камери у 1991 р.;

- підземна фільтраційна течія за весь час до початку затоплення шахти «Юнком» рухалась з гідродинамічними градієнтами, відповідно і швидкістю, що на порядки перевищує ці параметри при затопленні шахти, тобто зміна інтенсивності руху радіонуклідів відповідна;

- локальна міграційна модель для вищезгаданого періоду (Sadovenko & Rudakov, 2007) не надала підстав для прогнозу розвитку небезпечного сценарію руху радіонуклідів;

- елементарний розгляд закону підземної гідростатики з урахуванням міцнісних властивостей породного масиву в зоні об'єкта «Кліваж» свідчить, що ефективні напруження зменшаться до 8 МПа і майже співпадуть з показниками міцності порід на одновісне стиснення, тобто умови для геомеханічного руйнування радіоактивної зони відсутні.

З урахуванням вищенаведеного найбільш реалістичний сценарій заходів може бути наступним.

1. Переведення створеної моделі у більш детальний масштаб з виділенням і фрагментацією найбільш активних у фізичному аспекті складових.

2. Визначення точок моніторингових спостережень, які відображують стан об'єкту на контрольованій території (наприклад, фізико-хімічні показники поверхневих течій гідрографічної мережі).

3. Калібровка моделі епігнозними рішеннями з використанням вищевказаних вхідних даних, а також її синтез з геомеханічними моделями-фрагментами.

4. Розробка гідродинамічних модулів за методикою (Sadovenko, Rudakov & Inkin, 2016) для упередження (або ліквідації) екологічної небезпеки, що розгортається за поточним модельним прогнозом. Технічне впровадження модуля дозволяє реалізувати зміну міграційних течій у необхідному напрямку на контрольованих ділянках, а також містить модульні блоки очищення (або утилізації) забруднень.

## Висновки

Проведеним дослідженням встановлені особливості режиму затоплення типової групи шахт відкритої частини Центрального району Донбасу – «Червоний Жовтень» - «Юнком» - «Полтавська». Зазначені шахти є гідравлічно зв'язаними між собою, але характеризуються різними глибинами і об'ємами виробленого простору. На основі графо-аналітичного аналізу зміни рівнів затоплення із часом на шахті «Полтавська» виявлено періоди формування додаткового підземного стоку. Шляхом чисельного геофільтраційного моделювання оцінені головні гідродинамічні параметри та величини складових водного балансу досліджуваної території – водозбірної площі р. Булавін у межах впливу полів шахт «Червоний Жовтень» - «Юнком» - «Полтавська». Виконане моделювання та подальша верифікація моделі за балансними складовими, дає підстави стверджувати, що підвищення рівня затоплення забезпечується витратою підземного стоку у кількості 821 м<sup>3</sup>/год, а також інфільтраційним живленням атмосферних опадів у кількості 130 мм/рік.

Розрахована можлива концентрація Sr<sup>90</sup>, яка надходить у поверхневий стік із джерела – камери вибуху шахти «Юнком» - на момент досягнення рівнів підземних вод відміток +120 - +145 м. За попередніми розрахунками вона складатиме 9·10<sup>-8</sup> Кі/л, що не перевищує допустимих концентрацій. Можливість міграції іонів Cs<sup>137</sup> дуже низька, оскільки механізм міграції іонів Cs<sup>137</sup> полягає у дифузії у подвійному дифузійному шарі (поглинання твердою фазою ґрунту). Шляхи міграції Sr<sup>90</sup> у випадку досягнення забруднених вод абсолютних відміток +120 - +145 м, визначаються загальною картиною розподілу та спрямованістю потоку підземних вод у межах території впливу.



Обґрунтована реалістична схема переводу дослідженого об'єкту в режим контролю та попередження небезпеки у разі її виникнення за поточним модельним прогнозом. Схема базується на розгалуженні і деталізації масштабу найбільш активних фрагментів фільтраційної моделі та її синтезі з геомеханічною. Поточні дані прогнозу будуть фіксуватись на контрольованій території, де можливе врегулювання небезпечної ситуації мобільними технологічними модулями.

### References

1. Westermann, S., Rudakov, D., Reker, B., & Melchers, C. (2019). Ein neuer Blick auf Grubenwasseranstiegsprozesse – ausgewählte Beispiele aus dem deutschen Steinkohlenbergbau. *Markscheidewesen*, 126(1), 30-38.
2. Malinowska, A.A.; Witkowski, W.T.; Guzy, A.; Hejmanowski, R. (2020) Satellite-Based Monitoring and Modeling of Ground Movements Caused by Water Rebound. *Remote Sens.* 12, 1786.
3. Dovhyi, S. O., Korzhnev, M. M., Kurylo, M. M., Malakhov, I. M., Trofymchuk, O. M., Chumachenko, S. M. (2012). *Ekolohichni ryzyky, zbytky ta ratsionalni mezhi vykorystannia nadr v Ukraini*. К.: Nika-Tsentr, 316.
4. Яковлев, С. О., Єрмаков, В. М., Улицький, О. А. (2019). Екологічні наслідки затоплення камери атомного вибуху шахти «Юнком» (Центральний Донбас). *Мінеральні ресурси України*, (1), 38-44. doi: <https://doi.org/10.31996/mru.2019.1.38-44>.
5. Yakovlev, YE. O., Yermakov, V. M., Ulytsky, O. A. (2019). Ekolohichni naslidky zatoplennya kamery atomnoho vybukhu shakhty «Yunkom» (Tsentralnyy Donbas). *Mineralni resursy Ukrayiny*, (1), 38-44 <https://doi.org/10.31996/mru.2019.1.38-44>.
6. Zahrytsenko, O. Podvigina and N. Dereviahina (2018) Scientific and methodological foundations to develop numerical hydrodynamical models of mine fields in Donbas, *E3S Web of Conferences* 60, 00034 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000034>
7. Sadovenko, A. Zahrytsenko, O. Podvigina, N. Dereviahina, S. Brzeźniak (2018) Methodical and Applied Aspects of Hydrodynamic Modeling of Options of Mining Operation Curtailment. *Solid State Phenomena*, Vol. 277, 36-43 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.36>
8. Ulytsky, O., Yermakov, V., Lunova, O., Buglak, O. (2018). Environmental risks and assessment of the hydrodynamic situation in the mines of Donetsk and Lugansk regions of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 27(2), 368-376. <https://doi.org/10.15421/111861>.
9. Timoshchuk, V., & Sherstyuk, Y. (2012). Geofiltration regularities in the areas loaded by gravitation in tailings and waste rock dumps. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 30-35.
10. Sadovenko I.A., Rudakov D.V. (2007) Прогноз долговременной локализации объекта радиационной опасности в шахтном поле // *Проблеми екології*. Донецьк: ДонНТ, 1-2, 20-25.
11. Sadovenko I.A., Rudakov D.V. (2007) Prognoz dolgovremennoy lokalizatsii ob"yekta radiatsionnoy opasnosti v shakhtnom pole // *Problemi yekologii*.“ Donetsk: DonNT, 1-2, 20-25.
12. Shuchita Garg, S.K. (2016). Singh Modeling of arsenic transport in groundwater using MODFLOW: *A case study. Inational journal of geomatics and geosciences*, 6(4), 56-81.
13. Quiros, A. G., & Fernández-Álvarez, J. P. (2019). Conceptualization and finite element groundwater flow modeling of a flooded underground mine reservoir in the Asturian Coal Basin, Spain. *Journal of Hydrology*, 578, [124036]. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124036>
14. Szczepiński, J. (2019). The significance of groundwater flow modeling study for simulation of opencast mine dewatering, flooding and the environmental impact. *Water*, 11 (4), 848, 1-16. doi:<https://doi.org/10.3390/w11040848>
15. Reker, B., Westermann, S., Goerke-Mallet, P., Melchers, C. (2020) Mine water rebound processes in Europe *SME Annual Conference and Expo*
16. Sadovenko, D. Rudakov, O. Podvigina (2010) Analysis of hydrogeodynamics in a mining region during exploitation till closure of coal mines. *New Techniques and Technologies in Mining: School of Underground Mining 2010*, 61-69.
17. Sadovenko I. A., Rudakov D. V., Inkin A. V. Геотехнология освоения емкостных и газотермальных ресурсов Донбасса: монография, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет", Днепр, 2016. 310с.
18. Sadovenko I. A., Rudakov D. V., Inkin A. V. Geotekhnologiya osvoyeniya yemkostnykh i gazotermal'nykh resursov Donbassa: monografiya, Gosudarstvennoye VUZ "Natsional'nyy gornyy universitet", Dnepr, 2016. 310s.