

РЕФЕРАТ

роботи на здобуття Державної премії України
в галузі науки і техніки в 2017 році "**Екогеотехнологічний цикл
видобування та первинної переробки уранових руд**"

Мета роботи – створення і впровадження сучасного екогеотехнологічного циклу, який поєднує розвідку (картування), видобування та первинну переробку уранових руд на наукових засадах геоінформаційного відображення родовищ, підземної геоенергетики, низькотемпературного плазмохімічного електролізу та комплексного геоінформаційного і біорадіохімічного моніторингу, що є підставою високоефективного та екобезпечного виробництва стратегічної сировини.

За вказаними складовими основний зміст роботи, наукова новизна і практичні результати роботи полягають у наступному.

Новітня геоінформаційна основа картування уранових родовищ складається з *розроблених уперше* (або вдосконалених) засобів інтегрованого аналізу геолого-геофізичних і геохімічних даних та аерокосмічних геозображень, що поєднує спеціалізована система "Рапід".

Система дозволяє використовувати різноманітні і багаторівневі геодані з різних джерел. Це – цифрові геолого-геофізичні та картографічні матеріали, аерокосмічні знімки, результати геохімічних аналізів проб, дані буріння, інформацію про ландшафти, цифрові геозображення, отримані на одному з висотних рівнів: космос (супутникові матеріали), повітря (аерофото- і аерогеофізичні зйомки), земна або морська поверхня (польові зйомки), нижній півпростір (вимірювання в гірничих виробках).

Система забезпечує інформаційно-довідкові та вимірювальні функції, фільтрацію даних, формування нових ознак і побудову похідних карт, дослідження залежностей і статистичну обробку, багатовимірне районування; ранжування, картографування ситуацій, різноманітну 2D і 3D-візуалізацію даних, компонування і друк вихідних документів і ряд інших функцій.

Використані кілька моделей представлення даних: сіткову (фізичні поля і геохімічні дані), векторну (картографічні шари) і растрову (аерокосмічні зображення). Основною є сіткова модель, в якій інформація по досліджуваній ділянці співвідноситься з вузлами регулярної мережі на земній поверхні.

Ядро системи забезпечує управління даними, а також сукупність модулів, згрупованих в функціональні підсистеми управління даними, формування простору ознак, лінеаментного аналізу, комплексного аналізу

даних, прогнозування на основі методів Data Mining. Всього до складу ГІС РАПД входить близько 100 функціональних модулів, що мають єдиний користувальницький інтерфейс, українсько- та англійський. У ядрі системи - програмний комплекс, що складається з двох частин. Перша відповідає за виклик окремих модулів, а також обмін даними між різними модулями, що вирішують конкретні завдання обробки і аналізу даних, а також між ГІС РАПД і такими відомими системами як ArcGIS, Micromine, Surfer і ін. Друга, вбудована в усі функціональні модулі, управляє потоками даних, забезпечуючи зчитування, запис, видалення, візуалізацію і прості перетворення (згладжування, заповнення пропусків, нормування). Така **структура системи забезпечує** простоту її розширення і дає можливість створення на її базі як функціональних підсистем, так і окремих ГІС, призначених для вирішення спеціалізованих завдань.

Підсистема формування простору ознак надає можливості обчислення трансформацій вихідних даних і вибору найбільш інформативних з них.

Застосування технології та системи РАПД для оцінки родовищ уранових руд полягала в обробці геолого-геофізичних даних з приведенням до єдиної сітки 20×20 м і розрахунку більше 200 різних трансформант геофізичних полів в споріднених вікнах розміром 100×100 м. Розраховувалися трансформанти, які відомі в геофізиці (градієнти, похідні, напрямки простягання ізоліній), так і вживані, в основному, при обробці зображень: текстурні, гістограмні, фрактальні та ін.

Обробка геологічних даних (карт і схем), представлених, в основному на паперових носіях, включала їх оцифровку і прив'язку, після чого шляхом векторизації формувалися набори векторних об'єктів, що представляли геологічні межі, розломні структури, точки підвищеної рудної мінералізації. Для забезпечення спільного аналізу з геолого-геофізичними даними вони перетворювалися в сітковий вид шляхом обчислення в вузлах регулярної мережі 20×20 м ряду показників, що відображають структурні взаємозв'язки геологічних об'єктів, і використані в подальшому в процедурах Data Mining.

Формування еталонної вибірки для проведення процедур еталонної класифікації приділялася особлива увага, як етапу, що істотно впливає на ефективність прогнозу. В якості еталонів використовувалися вузли мережі над відомими рудними об'єктами. Еталонні об'єкти, розташовані в різних геологічних умовах на основі апріорних структурно-петрографічних уявлень, виділялися в кілька груп (класів). Далі виконувалися процедури кластеризації об'єктів при різній кількості початкових класів (кластерів) і різної структури простору ознак. Після аналізу результатів кластеризації були сформовані 2 класи еталонів, відмінних, крім іншого, за своїми проявами в геофізичних полях. Далі на основі багатовимірного шкалювання з кожного отриманого

класу видалялися нехарактерні для нього об'єкти, що дозволило істотно підвищити ступінь компактності образів класів.

Обґрунтована методика оцінки запасів руди з використанням можливостей дискретного крайгінга, який включає пошук найкращої оцінки вмісту руди в блоці з врахуванням його вмісту в пробах, розміщених як всередині, так і зовні оцінюваного блоку з отриманням оцінки середнього вмісту в криволінійній зоні рудного покладу.

При використанні неперервного крайгінгу з пошуком найкращої оцінки вмісту руди в блоці, розвідуваному проходженням виробок, в багатозв'язній області виділені зони впливу на основі триангуляції.

Розроблені алгоритми реалізовані системою ГІС Рапід дозволили підвищити достовірність оцінювання запасів руд у межах 17% з підтвердженням цього факту у закордонних партнерів (Узбекистан, Казахстан, Китай).

Органічним продовженням картування уранових родовищ є **використання вперше створених новітніх геоенергетичних основ** технологічної ланки розкриття, підготовки і розробки рудних родовищ з використанням геоенергетичних принципів усунення та перенесення енергії геогідродинамічних явищ у гірському масиві з формуванням екобезпечного середовища.

З використанням промислових, лабораторних та аналітичних методів дослідження напружено-деформованого стану гірських порід **вперше встановлені показники** зонального структурування масиву навколо гірничих виробок з використанням комплексу методів: синергетики, ентропійного фізичного моделювання, натурних спостережень і вимірювань. Аналіз меж зонального деформування масиву, виявлених натурними методами, доводить, що їх форма для підготовчих та очисних виробок наближається до еліпсоїдної. Зміна глибини руйнування контурів очисних камер відповідає степеневим залежностям, а у прилеглих до них підготовчих виробках – експоненціальним, при загальній достовірності результатів 84%. Дослідження параметрів руйнування масиву на фізичних моделях вказує на зональну напруженість масиву, еліпсоїдну форму зон, їх центрування і симетричність щодо виробок зі збіжністю експериментальних і теоретичних результатів близько 90%.

Процеси впливу ентропії на обмін енергією та розвиток деформацій при формуванні енергетичних потоків у гірських породах, непорушених виробками, з удосконаленням синергетичних принципів, відтворені на моделях з оцінкою природного енергетичного балансу, у якому за рахунок ентропії реалізується до 50% енергії від зовнішніх напружень, що діють у рудовміщуючому масиві. Дослідженнями зміни вертикальних та горизонтальних потенціальних напружень для рудних родовищ встановлені степеневі залежності, що

відображують зростання частки впливу ентропії у межах 57 – 95% від загального енергетичного балансу зовнішніх напружень, які діють на глибинах до 3000 м.

Закономірності зонального формування запобіжних капсул навколо гірничих виробок на форми перетворення енергії порушеного масиву **відтворені** моделями з різними фізичними властивостями гірських порід і глибиною залягання, формами та перерізами, габаритними розмірами і видами кріплення при проведенні виробок. **Встановлено**, що розміри і форма енергетичних зон відповідають системі степеневих функцій, в яких коефіцієнт форми енергетичних зон змінюється від одиниці до нуля за умов зниження міцності гірських порід і збільшення глибини закладання виробок.

Встановлено, що зміною градієнтів напружень, щільності, температури, газо- і водонасиченості у порушеному масиві, формується навколо гірничої виробки запобіжна капсула, приконтурна зона якої є епіцентром розвитку автохвильових синусоїдно-згасаючих коливань градієнтів різних фізичних параметрів. Ці процеси призводять до утворення кільцевих зон балансу і дисбалансу енергії, співвідношення розмірів яких описується степеневими функціями. Загальна кількість енергетичних зон у запобіжній капсулі визначається поліноміальними рівняннями четвертого порядку, збіжність яких підтверджена результатами аналізу розподілу енергії та маси в подібних системах різних масштабних рівнів, що наближається до 100%.

Розроблено новітні геоенергетичні підходи до проектування трас нарізних і підготовчих виробок та встановлені параметри кріплення в статичних умовах капсулювання на базі обґрунтованих принципів керування енергією запобіжної капсули – протидії, урівноваження, сприяння, усунення та перенесення. Встановлено, що відносна кількість спрямованої енергії гірського тиску на підтримання гірничих виробок, відтворюється нелінійною функцією, яка визначає параметри геоенергетичних підходів до технології підземної розробки уранових руд.

У технологічній ланці первинної переробки радіоактивних руд авторами науково **обґрунтована і запроваджена принципово нова технологія** очищення рідких радіоактивних відходів плазмою тліючого розряду у реакторах безперервної дії. Крім очищення від радіонуклідів у реакторі нейтралізуються складні органічні сполуки та патогенна мікрофлора.

Розроблена теорія низькотемпературного плазмового електролізу на підставі дії плазми тліючого розряду у електролізерах та реакторах періодичної та безперервної дії. **Вперше показано**, що при протіканні фарадеєвських процесів при низькотемпературному плазмовому електролізі на межі розподілу газ-рідина утворюється біполярний біфункціональний електрод, на якому протікають специфічні хімічні та електрохімічні реакції. **Знайдено**, що діючим фактором процесу очистки методом

низькотемпературного плазмового електролізу є спектр сумісних дій, що надаються квантами світла, бомбардуванням зарядженими частками, ультразвуковому опромінюванню та фарадеевським процесом. Виявлені та досліджені особливості протікання електрохімічних та хімічних процесів в різних умовах.

Створені наукові засади технологій суміщеного отримання поліоксидів водню і рекуперації домішок з рідинних середовищ у нерівноважній низькотемпературній плазмі (ННТП) з розвитком уявлень про процеси, що перебігають у тонкому прошарку на міжфазній межі рідина-плазма, а також встановлений вплив поліоксидних сполук на закономірності рекуперації неорганічних сполук і радіонуклідів, окисної деструкції органічних сполук і знезараження води.

Доведено, що при дії ННТП на міжфазній межі рідина-газ, основним процесом є утворення поліоксидів водню. Складений матеріальний баланс процесу утворення пероксидних сполук шляхом одержання рівнянь для швидкостей і концентрацій різних речовин із використанням закону діючих мас. Встановлено, що лімітуючою стадією при одержанні пероксидних сполук, є утворення $\text{HO}_2 \cdot$ радикалів. Вперше розраховані кінетичні криві, що описують зміну концентрацій $\cdot\text{OH}$ і $\text{HO}_2 \cdot$ у процесі утворення поліоксидів водню. Виявлені характер і природа впливу купрум (II) сульфату і натрій хлориду в розчинах на кінетику утворення поліоксидів водню.

Запропонований новий спосіб рекуперації домішок із рідинних середовищ, окисної деструкції органічних речовин і знезараження води в ННТП. Сутність способу полягає у використанні значного зростання активності утворених поліоксидів водню за рахунок формування оксигенвмісних частинок радикального типу при впливі ультрафіолетового опромінювання, що індуюється плазмою. Основною перевагою запропонованого способу в порівнянні з класичним методом Фентона є можливість його реалізації в одному пристрої, безреагентність і висока ефективність.

За встановлених закономірностей процесів рекуперації неорганічних речовин з рідинних середовищ у ННТП неорганічні речовини, у тому числі іони важких металів, переводяться в нерозчинні сполуки, які потім агрегатуються і видаляються на стадії фільтрації.

Досліджена кінетика руйнування тіосульфату при впливі ННТП. Показано, що процес може бути описаний кінетичним рівнянням першого порядку, а на кінетичній кривій, незалежно від вихідної концентрації тіосульфату, спостерігається злом, який вказує на зниження константи швидкості при зменшенні концентрації реагенту. Зі зменшенням початкової концентрації натрій тіосульфату зростають константи швидкості, що вказує на тісний взаємозв'язок процесів розкладення $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_2$ і утворення

поліоксидів водню. Обидва процеси перебігають за участю оксигенвмісних радикалів і є залежними один від одного.

Доказана принципова можливість та запропоновано метод низькотемпературного плазмового електролізу для виділення сполук штучних радіоактивних та трансуранових елементів з використанням реактора періодичної та безперервної дії, який пройшов дослідно-промислово перевірку. Показано високу ефективність (95-99%) цього метода при виділенні радіоактивних елементів, особливо, в установках з реактором безперервної дії. **Встановлено механізм** виділення трансуранових елементів, який полягає в утворенні комплексних сполук з пероксидами та над пероксидами кисню і за рахунок катодного підлучення перехід в нерозчинні сполуки. Виявлено роль коагулянтів та провідних добавок, кількість рециклів для інтенсифікації процесу.

Досліджена ефективність впливу нерівноважної низькотемпературної плазми при знезараженні бактеріально забрудненої води, що має у своєму складі патогенні, умовно патогенні та індикаторні бактерії. Встановлена висока вірулентність ННТП щодо вірусу поліомієліту і коліфагів при реалізації процесу в реакторі з динамічною плівкою рідини, що суттєво збільшує ефективність процесу.

Обґрунтована макрокінетична модель газорідинного реактора для ефективного здійснення процесів із використанням ННТП. Порівняння запропонованої моделі з реальними кінетичними закономірностями, які були одержані емпірично, показало її адекватність і можливість застосування для широкого спектру рідинно фазних реакторів. Основними технологічними факторами, що визначають інтенсивність процесів у реакторі з ННТП, є час обробки, тиск у зоні реакції і відстань від анода до між фазної межі рідина-газ.

На підставі теоретичних та експериментальних досліджень розроблене і **реалізоване апаратурно-технологічне оформлення** процесів суміщеного одержання поліоксидів водню і рекуперації неорганічних речовин та радіонуклідів, окисної деструкції органічних сполук і біологічних забруднень із рідинних середовищ ННТП.

Розроблені технології дезактивації рідинних середовищ від трансуранових елементів, успішно пройшли дослідно-промислово перевірку на базі Науково-технологічного центру з комплексного поводження з радіоактивними відходами, речовинами та джерелами іонізуючого випромінювання Українського державного об'єднання «Радон» і виробничого об'єднання «Південний машинобудівний завод ім. А.М. Макарова».

Складові **екобезпеки технологічного циклу поєднує система** створеного авторами **комплексного моніторингу**, що вміщує геоінформаційну та радіо біохімічну складові:

- науково-методологічну основу структурування і функціонування геоінформаційних моделей геоекосистеми уранодобувного регіону;
- модель масоперенесення, прогнозу та контролю ланцюга можливого руху радіоактивних речовин від джерел поховання з урахуванням дочірніх радіонуклідів;
- регламент санітарно-гігієнічних запобіжних заходів, що ґрунтуються на розкритому механізмі та біологічному значенні поєданого впливу радіації та важких металів за типом біосумації.

Обґрунтований ландшафтознавчий підхід до моніторингу геотехнічної системи (ГТС) уранодобувного регіону. Ландшафт – це різнорідна ділянка території, складена з кластерів екосистем, що взаємодіють і повторюються в близьких формах по всій території. Найбільш показовою характеристикою, що використана для аналізу території, є NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормалізований різницевий вегетаційний індекс – кількісний показник фотосинтетично активної біомаси. Цей індекс використовувався для регіонального картування та аналізу різних типів ландшафтів. В результаті його застосування виділені: зони, в яких рослинність не пошкоджена (здорова, густа рослинність); зони з розрідженою рослинністю; зони, які не мають рослинного покриву (відкритий ґрунт або штучні матеріали міської забудови). Цей індекс був застосований при геоінформаційному моделюванні стану вегетації на території уранодобувного регіону. На космічних знімках відображена важлива динамічна властивість ґрунтів – еродованість.

Авторами **розроблений алгоритм кластеризації**, що дозволяє чітко виявляти на космознімках структури ерозії у комплексі з даними цифрових моделей рельєфу (ЦМР). Проведена серія експериментів над множиною даних дистанційної зйомки регіону та прилеглих територій. Есперименти полягали у визначенні спектральних та інших особливостей балочних структур (форми, тип ґрунтів та т. ін.), які розташовані у різних місцях території, що була досліджена. Розроблений інструментарій моделювання входить до складу програмного забезпечення пакету ERDAS Imagine з розробленим алгоритмом кластеризації додаткових даних з ЦМР.

За космознімками, різними за часом, досліджена динаміка змін місцевості. Цифрові моделі ландшафту співставлені з вугледобувним регіоном сходу країни, де динаміка деградації ландшафту загрозлива. Показники уранодобувного регіону на цьому фоні задовільно стабільні, але є потреба у постійному моніторингу.

Вперше розроблені математичні моделі нестационарного масопереносу на основі аналітичних методів математичної фізики, які надають можливість послідовно визначати показники підземної водної міграції в «ближній» та «дальній» зонах навколо геотехнічної системи, сформованої сховищем радіоактивних відходів, зокрема, у верхніх шарах породного масиву та водоносних горизонтах з подальшим надходженням до поверхневих водотоків та водойм. **Моделі дозволяють** детально і комплексно враховувати головні чинники масопереносу від джерел надходження радіоактивних речовин у водоносні горизонти, включаючи розпад кількох компонент за ланцюгом, форму та характер дії джерел, сорбцію, просторову зміну швидкості фільтрації і прогнозувати параметри зон з радіоактивним вмістом у підземних водах, що дозволило обґрунтовано розробляти регламент моніторингу в зоні впливу сховищ радіоактивних відходів.

З розвитком обчислювальної техніки і вдосконалення систем комп'ютерної математики **розвинена структура моделей** для обчислення нестационарного масопереносу, в яких враховується спільний вплив багатьох джерел різної форми і характеру дії в дво- і тривимірних областях з різними типами меж.

На основі прогнозу міграції радіонуклідів у підземних водах зони відчуження оцінено динаміку їх надходження у водоносні горизонти на території розташування сховища радіоактивних відходів. **Обґрунтовані умови безпечного розміщення** сховищ відходів на міжріччі та обмеженого впливу пунктів тимчасової локалізації радіоактивних речовин, розташованих у заплаві річки з виносом радіонуклідів, що сягає кількох десятків Кі/рік. Аналіз конкретних об'ємів радіоактивного забруднення підземних вод показує, що воно носить переважно локальний характер, а в фільтраційному потоці завжди можна виділити основний напрямок міграції радіонуклідів.

З використанням розроблених моделей у підземному водоносному горизонті оцінено динаміку зони поширення радіонуклідів уранового ряду ^{210}Pb , ^{238}U , ^{210}Po , що обумовлено їх витоками з хвостосховища відходів переробки уранових руд. Удосконалення радіоекологічного моніторингу передбачає облаштування свердловин у зоні з максимальними швидкостями міграції на шляху до найближчого населеного пункту.

Виконаним прогнозом міграції тритію зі сховищ твердих радіоактивних відходів, що розташоване на півночі України, **оцінено параметри зони** радіоактивного забруднення в суттєво неоднорідній області фільтрації і масопотік до найближчого поверхневого водотоку. Проведене зіставлення варіантів ліквідації джерела забруднення на динаміку зниження концентрації тритію у підземних водах, що дає пролонгований ефект через 12-20 років.

У межах медико-біологічної складової моніторингу **здійснене наукове обґрунтування** та розробка профілактичних заходів щодо мінімізації негативних наслідків для здоров'я дії важких металів (ВМ) та радіаційних факторів на основі визначення особливостей їх поєданого впливу на сечостатеву систему міських мешканців і робітників уранодобувної та металургійної промисловості.

Попередній експертний аналіз медико-біологічних даних дозволив зосередити науково практичні дослідження за схемою «фон розвиненого обласного центру – райцентр з задовільними екопоказниками – райцентр, що тяжіє до уранодобувної галузі».

В результаті досліджень **вперше проведені порівняльні** дослідження рівня радіаційного забруднення об'єктів навколишнього середовища промислових та непромислового міст Придніпров'я та ступеня інкорпорації радіонуклідами населення із визначенням вмісту ізотопів урану в сечі та нирках жителів. В умовах натурального підгострого виробничого експерименту доведено негативний вплив поєданої дії радіаційних та хімічного факторів, потенціуючого характеру, який формується в залежності «доза-час-ефект». **Доведена детермінованість** морфологічних змін у нирках експериментальних тварин від рівня накопичення ВМ у біосубстратах. Проведений епідеміологічний аналіз захворюваності на хвороби сечостатевої системи жителів Придніпров'я, які постійно мешкають у зоні поєданого впливу радіаційного фактору та важких металів. Встановлено особливості накопичення та розподілу ВМ у сечостатевих органах жителів урановидобувного району. Отримані дані щодо патоморфологічних змін у нирках мешканців, які постійно перебувають під поєданим впливом ВМ та іонізуючого випромінення. **Розроблено і впроваджено** комплексну систему профілактики розвитку патологічних змін у сечостатевій системі та оцінено її клініко-гігієнічну ефективність у мешканців індустріально розвиненого регіону.

Результати досліджень стали науковим підґрунтям доцільності розробки і впровадження системи існуючих та власних профілактичних заходів законодавчого, інженерно-технічного, технологічного, санітарно-гігієнічного, організаційного та медико-біологічного характеру зі зменшення техногенного навантаження населення індустріально розвинених територій, профілактиці захворювань та зміцненню здоров'я населення.

Запропонований і впроваджений метод індивідуальної біопрфілактики за допомогою пектинів, який був апробований у клініко-гігієнічних дослідженнях практично здорових мешканців обласного центру Придніпров'я.

Доведено, що індивідуальна пектинопрфілактика у практично здорових мешканців промислового міста позитивно впливає на організм, підвищує добовий діурез, зменшує азотемію, стабілізує електролітний баланс

крові в сукупності з поліпшенням клінічного стану та імунного статусу і доводить, таким чином, її клініко-реабілітаційну ефективність і доцільність впровадження для населення екозональних територій.

Узагальнюючи можна стверджувати, що авторами вперше на єдиних новітніх науково-технічних засадах створений екобезпечний геотехнологічний цикл розвідки, видобування та первинної переробки уранових руд, який є стратегічно важливим у забезпеченні домінуючої ролі атомної енергетики в Україні.

Практична ефективність від впровадження створеної екогеотехнології на уранових шахтах, підприємствах первинної переробки руди та об'єктах складування відходів підтверджується економічною складовою (0,5 млрд. грн) та попередженим екологічним збитком (245 млн. грн).

Кількість публікацій: 25 монографій, 231 стаття. Загальна кількість посилань на публікації авторів / h-індекс: згідно бази даних SCOPUS – 108/14, згідно бази даних Google Scholar – 1095/55. Новизна і конкурентоспроможність технічних рішень захищені 38 патентами України. За даною тематикою захищено 6 докторських і 16 кандидатських дисертацій.

Автори роботи:

 Б.С. Бусигін

С.А. Дробот

О.В. Кравченко

В.С. Кублановський

О.А. Півоваров

Д.В. Рудаков

В.П. Стусь

О.Є. Хоменко

Підпис засвідчую:

Вчений секретар ДВНЗ «УДХТУ»

 О.В. Охтіна

