

Гідроінформатика як акселератор прийняття рішень в управлінні ремедіацією водних ресурсів: інноваційна агентно-орієнтована модель для Херсонщини

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.010>

Богдан Чернявський
Кафедра технічних наук
Університет Прикладних наук в Коніні
Конін, Польща
bohdan.cherniavskiy@konin.edu.pl

Анотація – У статті розкрито інноваційні підходи до управління ремедіацією водних ресурсів Херсонської області після підриву греблі Каховської ГЕС з використанням агентно-орієнтованої моделі. Автор акцентує увагу на актуальних та значущих проблемах відновлення водопостачання, підтримки екосистем, а також забезпечення відновлення соціально-економічного розвитку регіону. З метою вирішення цих питань запропоновано інноваційну агентно-орієнтовану модель, яка інтегрує сучасні інформаційні технології, такі як геоінформаційні системи. Модель спрямована на підвищення ефективності прийняття управлінських рішень, оптимізацію використання ресурсів та прискорення процесу ремедіації водних ресурсів Херсонщини.

Ключові слова – агентно-орієнтована модель, військові забруднення, ремедіація, водні ресурси, екологічна безпека

I. INTRODUCTION

Безпрецедентна війна в Україні завдала шкоди усім без винятку сферам територіальної соціально-економічної системи країни. Руйнування і збитки, зафіксовані на сьогоднішній день, свідчать про масштабність і полівекторність руйнівного її впливу.

Згідно з опублікованими даними Світовим банком, загальна сума збитків та вартість відновлення країни на кінець 2023 року становила біля \$486 мільярдів, і ця сума продовжує зростати, додаючи до неї близько \$10 мільярдів щомісяця. Значні руйнування було зафіксовано в житловому секторі, у соціальній інфраструктурі, в тому числі, у сфері охорони здоров'я, освіти, а також у сільському господарстві. Було пошкоджено близько 149,300 житлових будинків і майже 20% сільськогосподарських угідь виявилися непридатними для подальшого використання. Близько 30% території країни забруднені мінами та боєприпасами, які не розірвалися, що створює додаткові труднощі для відновлення національної економіки [2].

Крім того, за прогнозами дослідників, до 2026 року Україна може втратити ще до \$120 мільярдів у продуктивності, а капітальні втрати можуть перевищити \$950 мільярдів. Такий рівень руйнувань не спостерігався в Європі з часів Другої світової війни, і відновлення країни може зайняти десятиліття [2, 3].

Необхідно зазначити, говорячи про збитки, йдеться не тільки про негативний антропогенний вплив на екосистему внаслідок воєнних дій, а й про такі явища, які зафіксовані світовою громадськістю, як екоцид (підриг дамби Каховської ГЕС), геноцид (масове знищення цивільного населення у Бучі, Ірпені та Ізюмі), а також урбцид (знищення міст, якот Маріуполь і Бахмут). Усі вище перелічені факти підкреслюють необхідність уже зараз виступити з ініціативою формування комплексної стратегії ремедіації постраждалих територій [4].

Питання ремедіації водних ресурсів та водозабезпечення постраждалих від війни територій є пріоритетними. Саме тому, фокус уваги світової спільноти прикутий до віднайдіння способів покращення ситуації.

Підриг дамби Каховської ГЕС спричинив масштабну екологічну катастрофу на території Херсонщини, що негативно вплинуло на водні ресурси регіону, знищивши водопостачальні зрошувальні системи, погіршивши якість води, та призвівши до забруднення й засолення ґрунтів. Відновлення водних ресурсів є життєво необхідним для регіону, оскільки це впливає не тільки на екологічний стан, але й на відновлення сільського господарства, питне водопостачання. У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні сучасних інноваційних технологій для ефективного управління відновлення водозабезпечення регіону та моніторингу функціонування водних систем, що дозволить прискорити процес ремедіації у цілому. Гідроінформатика та агентно-орієнтоване моделювання надають унікальні можливості для створення ефективної системи управління ремедіації водних ресурсів, враховуючи комплексність

досліджуваної проблеми і необхідність адаптації до швидко змінних умов.

Метою дослідження є розробка інноваційної агентно-орієнтованої моделі управління ремедіацією водних ресурсів Херсонщини з використанням гідроінформатики як акселератора прийняття управлінських рішень. Модель передбачає інтеграцію сучасних інформаційних технологій для моніторингу, оцінки та управління водопостачанням та функціонування водних систем, а також врахування взаємодії між різними агентами, які будуть брати участь у процесі ремедіації.

II. АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ (АОМ) ЯК ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТРУМЕНТ РЕМЕДІАЦІЇ

A. Доцільність використання АОМ в проблемах, пов'язаних з управлінням водними ресурсами

Гідроінформатика — це міждисциплінарна галузь, яка поєднує інформатику, гідрологію, інженерну справу та екологію для вирішення проблем, пов'язаних з управлінням водними ресурсами. Вона використовує сучасні інформаційні технології для збору, обробки, аналізу та моделювання даних, що стосуються водних систем і процесів. Окрім геоінформаційних систем (ГІС), інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (ШІ) тощо, особливе місце в ній посідає моделювання водних процесів — розробка моделей для прогнозування потоків, водопостачання, затоплень, ерозії ґрунтів, якості води та інших процесів.

В якості інструменту досягнення поставленої мети автор пропонує до використання агентно-орієнтованого моделювання.

Агент-орієнтоване моделювання (АОМ) - це науковий підхід, що реалізує функції діяльності об'єктів на мікрорівні (на прикладі локальної територіальної системи - *прим. авт.*) шляхом моделювання функціонування складної динамічної системи на основі агентів, що мають певну індивідуальність, спрямовану на вивчення взаємодії об'єктів даної системи з метою встановлення залежностей між мікро- і макрорівнями. До однієї з основних переваг агент-орієнтованого підходу належить можливість моделювання системи, максимально наближеної до реальності. Більш деталізований параметричний аналіз АОМ в контексті його застосування у ремедіації водних ресурсів буде подано нижче [5].

B. Ключові аспекти та переваги АОМ

Агентно-орієнтоване моделювання (АОМ) є одним із перспективних інноваційним підходом в аналізі та управлінні складними системами, такими як водні ресурси, через те, що воно дозволяє моделювати взаємодію окремих агентів: населення, суб'єктів господарювання (в тому числі, у сільському господарстві як головного споживача водних ресурсів – *прим. авт.*), державних інституцій, органів місцевого самоврядування у динамічному середовищі.

Переваги застосування АОМ полягає в таких аспектах:

1. Моделювання індивідуальних агентів створює максимально подібну до реального життя симуляцію: кожен агент має власну мету, стратегію та поведінку, що дозволяє точно відображати реальні системи, включаючи економічні та екологічні фактори.

2. Адаптивність АОМ: моделі можуть динамічно адаптуватися до швидких змін у внутрішньому та зовнішньому середовищі, наприклад, кліматичні зміни або непередбачувані ситуації (аварії на об'єктах водної інфраструктури, забруднення води тощо).

3. Інтерактивність АОМ, яка полягає у тому, що агенти можуть взаємодіяти між собою та з навколишнім середовищем, що дозволяє розглядати різні сценарії розвитку подій, наприклад, ефекти від впровадження «зелених» методів ремедіації у водному господарстві (наприклад, біофільтрація – *прим. авт.*).

4. Прогнозування: агентно-орієнтовані моделі дозволяють аналізувати ретроспективні данні наслідків і формувати прогноз розвитку ситуації або пропонувати оптимальні стратегії управління тощо.

5. Інтеграція з іншими системами: АОМ досить ефективно інтегрується з іншими системами, зокрема, з геоінформаційними системами, з технологіями дистанційного зондування, а також може розширювати за рахунок цього свої функціональні можливості і генерувати інформацію у режимі реального часу в цілях прийняття ефективних оперативних, тактичних та стратегічних управлінських рішень [6, 7].

III. МОДЕЛЬ АОМ РЕМЕДІАЦІЇ ВОДНИХ РЕСУРСІВ ПІСЛЯ ПІДРИВУ ДАМБИ КАХОВСЬКОЇ ГЕС.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ КЛЮЧОВИХ АГЕНТІВ ВЕРИФІКАЦІЯ ЇХНІХ РОЛЕЙ

Перш за все, було виокремлено 6 основних груп зацікавлених сторін агентно-орієнтованої моделі, які прямо або опосередковано впливатимуть на систему прийняття рішень:

- суб'єкти аграрного бізнесу - основні споживачі води для цілей зрошення сільськогосподарських угідь та ведення основної операційної діяльності. Фермери відіграють ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки та стійкості сільського господарства. Їхні потреби у воді впливають на загальний розподіл водних ресурсів;

- комунальні служби, метою їх діяльності є забезпечення населення чистою питною водою та підтримання інфраструктури водопостачання та водовідведення Комунальні служби, в тому числі, опосередковано несуть відповідальність за здоров'я та добробут населення, забезпечуючи доступ до безпечної питної води та санітарних умов;

- державні органи управління, які здійснюють регулювання та координацію процесів

ремедіації та розподілу водних ресурсів. Передусім, державні органи встановлюють нормативні акти, забезпечують фінансування та контроль за виконанням програм (в тому числі, ремедіації – прим. авт.), а також вирішують конфлікти між різними користувачами води;

- органи місцевого самоврядування, які організують координацію та реалізацію програм ремедіації на рівні місцевих громад. Органи місцевого самоврядування, разом з цим, забезпечують безпосередню взаємодію з місцевим населенням, враховують місцеві потреби та проблеми, а також сприяють участі громадськості в процесах ремедіації;

- Іноземні партнери та інвестори, які організують та реалізують фінансування і впровадження передових технологій в цілях ремедіації та управління водними ресурсами. Відомо, що іноземні інвестори привносять в національну економіку не тільки капітал, але і новітні технології, досвід, підвищення кваліфікації та професіоналізму, що дає змогу прискорити та поліпшити процеси ремедіації, впровадити прогресивні методи та обладнання в управління водними ресурсами;

- фірми з державно-приватного партнерства (ДПП) і підрядники ремедіаційних робіт. Вони можуть суттєво вплинути на хід реалізації ремедіації та ефективного розподілу води на основі укладання договорів із державою.

A. Опис виділених груп агентів

Кожного агента i у системі можна описати такими характеристиками:

- стан агента $Si(t)$ у момент часу t ;
- набір правил поведінки Ri ;
- місце розташування агента в середовищі $Pi(t)$.

B. Модель імплементації в середовище обраних груп агентів:

- Середовище імплементації гравців являє собою двовимірний або тривимірний простір, у якому виділені групи агентів можуть переміщатися і взаємодіяти. 2d або 3d простір може бути розділений на ділянки, кожна з яких має свої параметри і характеристики $Ej(t)$, наприклад, рівень забруднення ресурсів.
- *Взаємодія відібраних груп агентів:* взаємодію між ключовими агентами проекту можна описати функцією $Iij(t)$, яка залежить від їхнього місця розташування і поведінки в певний момент часу:

$$Iij(t) = f(Si(t), Sj(t), Pi(t), Pj(t)) \quad (1)$$

- *Изменение поведения в процессе выбора агентом управленческого решения:* стан поведінки агентів змінюється в часі відповідно до правил поведінки та різного роду взаємодії з іншими агентами, які беруть

участь у реалізації ремедіаційного проекту території:

$$Si(t+1) = g(Si(t), \sum j Iij(t), Ej(t)) \quad (2)$$

Інтеграція різних гравців в агентно-орієнтовану модель ремедіації водних ресурсів забезпечує комплексний підхід до управління та розподілу води. Кожен гравець робить свій внесок у процес, що дає змогу враховувати різноманітні інтереси та досягати більш ефективних рішень.

C. Моделювання процесу ремедіації

Правила поведінки різних груп виділених агентів на основі розроблених та імplementованих алгоритмів поведінки для кожного типу агентів дають змогу максимально оптимізувати процес управління та координації процесом відновлення території. Наприклад, агенти, які безпосередньо реалізують ремедіаційні операції очищення водних ресурсів, можуть слідувати певним алгоритмам взаємодії з іншими групами агентів, відповідно до маршрутів і місць локалізації первинної або екстреної ремедіації забруднених ділянок. Агенти-населення в той же самий час реагують на описані вище заходи і приймають, у свою чергу, свої рішення.

D. Аналіз та оцінка результатів

Оцінювання результатів імплементації проекту агентно-орієнтованого моделювання ремедіації водних ресурсів Херсонської області може бути здійснено в розрізі сукупності параметрів і показників, що включають показники оцінювання ефективності управління процесом ремедіації, ефективністю взаємодії між учасниками цього процесу, а також ефективність використання всіх видів ресурсів, таких як фінансові, матеріально-технічні, трудові тощо, у співвідношенні часу та ступеня виконання поставлених завдань.

E. Оптимізація

Проведення серії симуляцій на початкових етапах імплементації проекту дасть змогу виявити додаткові можливості підвищення ефективності пропонуваного до впровадження проекту. Йдеться про виявлення найперспективніших варіантів інтеграції з передовими технологіями та розробками, такими як дрони, роботизована техніка, ГС тощо. Це дасть змогу підвищити загальну ефективність управління у рамках оптимізації стратегій ремедіації, моніторингу ситуації з метою ефективного оперативного і тактичного управління процесом як самої ремедіації, так і соціального реагування; визначення найефективніших маршрутів транспортної логістики та вибору раціональних методів ремедіації тощо.

На переконання автора, сучасні технологічні досягнення дають змогу значно розширити можливості агентного моделювання в контексті ремедіації територій. Роботизація, штучний інтелект, ГС, дрони, безпілотні транспортні засоби, технології розпізнавання та 3D-моделювання

зроблять пропонування для імплементації проєкт більш точним, адаптивним та ефективним.

Загалом, інтеграція описаних технологій вибірково і комплексно дадуть змогу досягти в умовах дефіциту часу і дефіциту ресурсів максимально можливих результатів.

IV. ВИСНОВКИ

Імплементація проєкту розгортання ремедіаційних робіт з ремедіації та відновлення водних ресурсів Херсонської області є життєво необхідним для відновлення регіону після руйнування греблі Каховської ГЕС. Сучасні умови вимагають, своєю чергою, застосування сучасних підходів до ліквідації проблем екологічного, економічного та соціального характеру. У дослідженні пропонується інноваційний підхід управління ремедіацією забрудненої території з використанням агентно-орієнтованої моделі. Реалізація цього проєкту сприятиме:

- відновленню екологічного балансу і зниженню забруднення території, насамперед - водних ресурсів;

- забезпеченню населення чистою питною водою та відновленню розвитку аграрного сектору національної економіки, який є ключовим драйвером розвитку країни загалом, зокрема Південного регіону України;

- модернізації інфраструктури відповідно до міжнародних стандартів та залучення інвестицій для досягнення цілей сталого економічного розвитку, що дасть змогу підвищити конкурентні позиції України;

- впровадженню передових технологій у пов'язані з водозабезпеченням сфери та галузі соціально-економічної системи, що нададуть їй гнучкість і адаптивність в умовах постійних змін.

Цей проєкт дасть змогу розв'язати не тільки критичні завдання відновлення, а й зможе закласти фундамент для розвитку країни в майбутньому, сприяючи підвищенню її резистентності до криз.

REFERENCES

- [1] Federle, J., & Schularick, M. (2024). The Price of War: Economic Fallout from the Conflict in Ukraine. Kiel Institute. URL: <https://www.ifw-kiel.de>
- [2] World Bank. (2024). Updated Ukraine Recovery and Reconstruction Needs Assessment Released. URL: <https://www.worldbank.org>
- [3] United Nations Economic Commission for Europe. (2023). UNECE convenes inter-agency group to coordinate assessment of environmental damage in Ukraine. UNECE. URL: <https://unece.org>
- [4] Hryhorczuk, Daniel & Levy, Barry & Prodanchuk, Mykola & Kravchuk, Oleksandr & Bubalo, Nataliia & Hryhorczuk, Alex & Erickson, Timothy. (2024). The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 19. DOI:10.1186/s12995-023-00398-y
- [5] Adeyemo, Oluwatoyin & Abos, Pro. (2024). Fundamentals of Agent-Based Modeling: Emergence and complex adaptive systems.
- [6] Eilers, Jacintha & Hoogendoorn, Mark & Wendt, David. (2010). An Agent-Based Modeling Approach to Investigate Emergent Patterns in Ecological Systems. *Proceedings - 2010 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, IAT 2010*. 2. 6 - 13.
- [7] Radosavljevic, Sonja & Sanga, Udit & Schlüter, Maja. (2024). Navigating simplicity and complexity of social-ecological systems through a dialog between dynamical systems and agent-based models.