DOI 10.34185/1562-9945-5-166-2026-22
УДК 004.65:502.51

О.Г. Рибальченко, А.М. Гриценко, С.В. Білашенко, В.С. Сорокін

ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА МОДЕЛІ ДАНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

Анотація. Управління екологічними даними на підприємствах здебільшого здійснюється вручну та децентралізовано, що суттєво ускладнює оперативне виявлення наднормативних скидів та підвищує ймовірність значних фінансових ризиків. Проблема полягає у виникненні архітектурного конфлікту під час створення системи моніторингу: жорсткі вимоги екологічного комплаєнсу щодо збереження безперервного аудиторського сліду суперечать потребі швидкого генерування аналітичних звітів, що вимагає денормалізації даних. Метою дослідження є розробка архітектури та моделі даних системи, здатної розв'язати суперечність між юридичною незмінністю ретроспективних масивів та високою швидкодією аналітики. У роботі застосовано методи системного аналізу, декомпозиції предметної області, бітемпорального моделювання, а також архітектурний патерн CQRS. Запропоновано концептуальну модель на основі стандарту бітемпоральних таблиць, яка запобігає незворотній втраті історичних станів та підтримує транзакційну цілісність під час зміни нормативів. Для прискорення просторово-часових об'єднань використано кластерні стовпчикові індекси з алгоритмами відсікання сегментів. Імплементація CQRS через матеріалізовані представлення фізично ізолювала аналітичне навантаження від операційного. Розроблена архітектура мінімізує ризик транзакційних блокувань та деградації продуктивності, формуючи технологічне підґрунтя для функціонування системи як інструменту оперативного контролю водокористування.
Ключові слова: архітектура бази даних, бітемпоральне моделювання, екологічний моніторинг, CQRS, матеріалізовані представлення, аудиторський слід, кластерні стовпчикові індекси, інтервальна алгебра.

Постановка проблеми. Станом на 2026 рік процеси екологічного моніторингу на підприємствах характеризуються глибокою децентралізацією. Управління інформацією здебільшого спирається на локальні електронні таблиці та паперові носії. Відсутність інтеграції з державними реєстрами зумовлює необхідність ручного пошуку актуальних екологічних норм безпосередньо у законодавчих актах. Підготовка звітності та перевірка дотримання квот вимагають ручного агрегування показників із численних розрізнених лабораторних журналів. Як наслідок, існуюча децентралізована обробка екологічних даних призводить до критичних затримок в ідентифікації наднормативних скидів забруднювачів, що суттєво ускладнює оперативне реагування на інциденти та створює значні фінансові ризики для підприємств.

© Рибальченко О.Г., Гриценко А.М., Білашенко С.В., Сорокін В.С., 2026
Copyright for this paper by its authors. Use permitted under License CC BY 4.0.
ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Під час проєктування централізованої інформаційно-аналітичної системи для розв'язання цієї проблеми виникає фундаментальний архітектурний конфлікт. Вимоги екологічного комплаєнсу диктують необхідність збереження безперервного аудиторського сліду, що передбачає зберігання кожної версії дозвільного документа та кожного внесеного результату вимірювання без права на фізичне видалення чи модифікацію, гарантуючи юридичну незмінність історичного контексту водокористування. Це зумовлює необхідність побудови суворо нормалізованих структур збереження інформації.

Водночас, управління екологічними ризиками потребує швидкої перевірки дотримання лімітів гранично допустимих скидів, що вимагає безперервної агрегації розрізнених ретроспективних масивів. Збереження великих обсягів історичних даних у нормалізованому вигляді спричиняє значне зниження швидкодії під час генерації складних багатовимірних аналітичних звітів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження в галузі інженерії програмного забезпечення фіксують необхідність переходу від децентралізованого ручного обліку екологічних даних до централізованих реляційних архітектур. Традиційне використання електронних таблиць та ізольованих лабораторних журналів не гарантує дотримання властивостей ACID, що забезпечують транзакційну цілісність баз даних, і генерує критичні аномалії модифікації даних. Праці з управління водними ресурсами обґрунтовують міграцію інформаційних потоків водокористувачів до систем планування ресурсів підприємства (ERP) та систем екологічного менеджменту (EMS) [1, 2]. Проєктування нормалізованих реляційних схем із застосуванням жорстких декларативних обмежень на рівні ядра системи управління базами даних (СУБД) мінімізує структурну гетерогенність та забезпечує надійну валідацію [3, 4].

Основоположною вимогою екологічного комплаєнсу є забезпечення юридичної значущості інформації через незмінний аудиторський слід. Використання класичної реляційної алгебри з деструктивними операторами оновлення та видалення призводить до втрати ретроспективного контексту водокористування. Сучасні інженерні підходи розв'язують цю проблему шляхом впровадження бітемпорального моделювання, яке оперує двома ортогональними вимірами: часом дійсності та транзакційним часом [5]. Заміна операцій фізичного оновлення на логіку генерації нових версій записів забезпечує збереження посилальної цілісності між усіма історичними ітераціями дозволів та результатами лабораторного контролю [6].

Накопичення незмінних історичних масивів інформації спричиняє деградацію продуктивності під час виконання просторово-часових об'єднань. Аналітичні запити для перевірки дотримання квот на спеціальне водовикористання виконуються з низькою ефективністю за допомогою класичних B-Tree індексів через специфіку інтервальної алгебри [7]. Для подолання цього структурного конфлікту обґрунтовано застосування архітектурного патерна розділення відповідальності за команди та запити CQRS (Command Query Responsibility Segregation). Фізичне розділення нормалізованої бітемпоральної моделі запису (для збереження аудиту) та денормалізованої моделі читання

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

на базі матеріалізованих або віртуальних представлень забезпечує високопродуктивну агрегацію без блокування транзакцій [8, 9].

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка архітектури та моделі даних інформаційно-аналітичної системи підприємства, яка забезпечить перехід від децентралізованого ручного обліку екологічних показників до централізованої реляційної структури з розширеними можливостями ретроспективного аналізу. Головне завдання полягає у збалансуванні архітектурного конфлікту між вимогою збереження юридичної незмінності історичного контексту водокористування та необхідністю високої швидкодії під час генерації багатовимірних аналітичних звітів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Проєктування архітектури сучасної інформаційно-аналітичної системи екологічного моніторингу вимагає подолання високої структурної складності предметної області. Управління водними ресурсами характеризується високою складністю бізнес-правил та паралельним функціонуванням різних нормативно-правових вимог (національних гранично допустимих концентрацій забруднювальних речовин ГДК та європейської нормативної бази екологічних стандартів якості середовища EQS). Для забезпечення ізоляції бізнес-правил та управління складністю концептуальну модель системи декомпозитовано на чотири семантично ізольовані простори: довідковий, топологічний, нормативний та транзакційний.

Довідковий блок (Рис. 1) містить фундаментальні структури даних, що характеризуються низькою частотою змін, високою частотою зчитування та слугують централізованим сховищем еталонних даних для системи. Ключовим елементом є реєстр забруднювальних речовин (Pollutant), ідентифікація в якому базується на складеній системі міжнародних та національних кодів: CasNumber, EuNumber та StateCode. Реалізовано механізм часткової унікальності, який унеможливлює дублювання записів навіть за відсутності одного з кодів. До складу блоку також інтегровано довідник галузей економіки (IndustryBranch), де для підтримки ієрархічної класифікації застосовано реляційний патерн списку суміжності. Просторова гідрологічна ієрархія забезпечується довідником річкових басейнів (RiverBasin). Нормативні коефіцієнти втрат води фіксуються у класифікаторі видів робіт водокористування (WaterManagementWork).

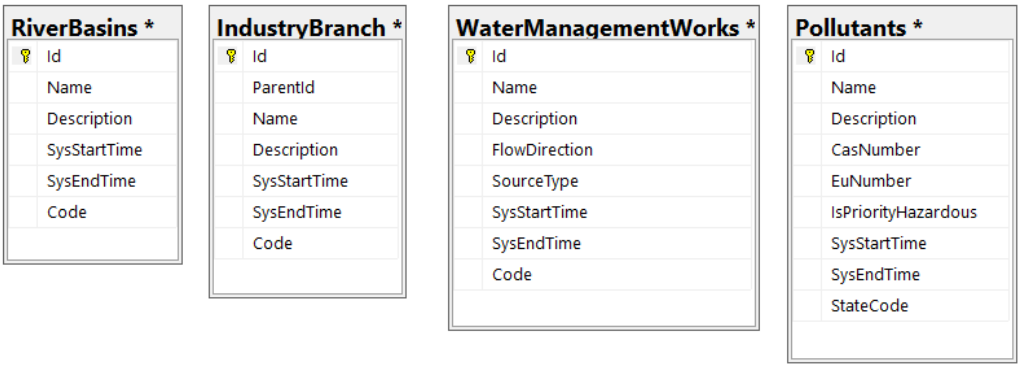


Рисунок 1 - ER-діаграма концептуальної моделі довідкового блоку

Топологічний блок (Рис. 2) моделює фізичну та адміністративну мережу екологічного контролю, розмежовуючи юридичних осіб та фізичні локації впливу на довкілля.

Підприємства-водокористувачі (MonitoringSubject) виступають базовою сутністю для всієї подальшої звітності. Цілісність цих даних забезпечується алгоритмічною перевіркою контрольної суми ідентифікатора EdrpouCode та географічною нормалізацією через код адміністративно-територіальної одиниці KatottgCode. Фізичні водні об'єкти (MonitoringObject), такі як водозабори чи випуски, зберігають географічні координати, що дозволяє системі управління базами даних виконувати просторові запити для розрахунку зон впливу. Кожен об'єкт має обов’язкову структурну прив'язку до гідрографічної мережі, забезпечуючи точну топологічну маршрутизацію забруднень.

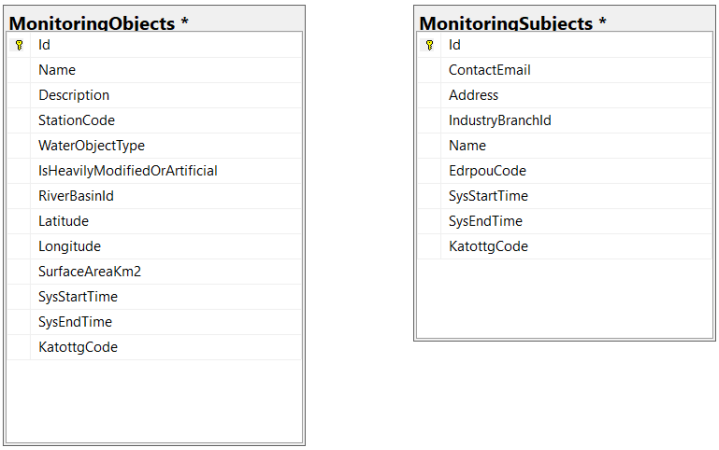


Рисунок 2 - ER-діаграма концептуальної моделі топологічного блоку

Нормативний блок (Рис. 3) визначає гранично допустимі параметри впливу на довкілля. Архітектура сутності державних екологічних стандартів якості (EnvironmentalQualityStandard) спирається на темпоральну модель даних. Підтримка часової дійсності нормативів реалізована через атрибути ValidFrom та ValidTo, що забезпечує збереження історії змін і дозволяє системі відтворювати розрахунки для минулих періодів. Сутність екологічного дозволу (EcologicalPermit) містить набір індивідуальних нормативів (лімітів забору чи скиду), які підпорядковані документу.

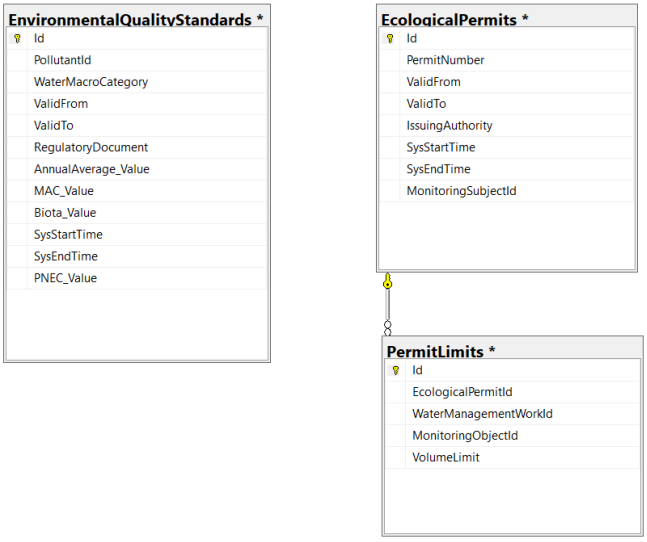


Рисунок 3 - ER-діаграма концептуальної моделі нормативного блоку

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Транзакційний блок (Рис. 4) консолідує масиви операційних вимірювань і розрахунків, блокуючи редагування записів після їх фіксації на рівні застосунку для збереження аудиторського сліду. Лабораторні протоколи (WaterQualityProtocol) агрегують метадані процедури та колекцію результатів вимірювань якості води. Звіти водоспоживання (WaterUsageReport) об'єднують дані державного статистичного спостереження, гарантуючи недоторканність поданих історичних показників.

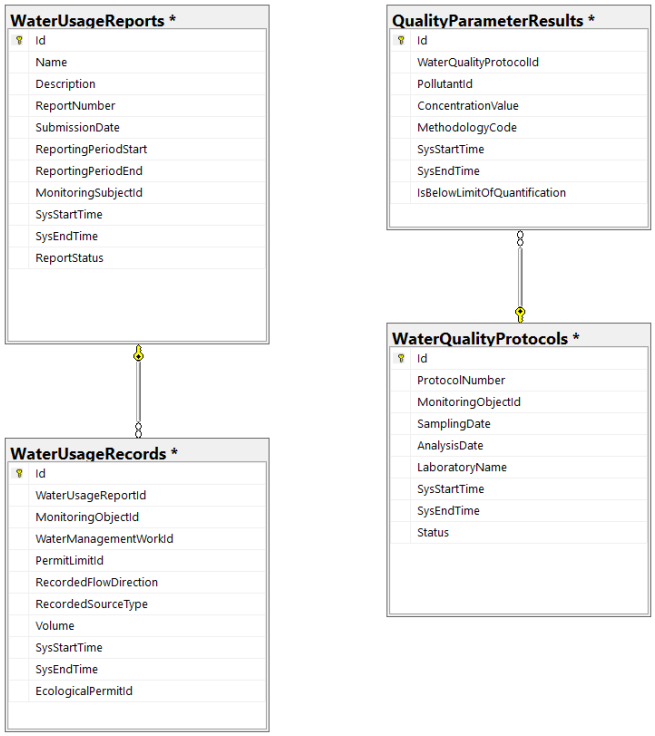


Рисунок 4 - ER-діаграма концептуальної моделі транзакційного блоку

Екологічний моніторинг оперує даними, що мають юридичну та фіскальну значущість, тому фізичне видалення записів із бази даних є неприпустимим. Використання стандартної операції DELETE призводить до безповоротної втрати інформації, що унеможливлює проведення довгострокового аудиту та руйнує історію змін, необхідну для перевірок.

Для розв'язання цієї проблеми технічна реалізація моделі даних спирається на стандарт бітемпоральних реляційних таблиць [10]. У межах спроєктованої архітектури даних кожне відношення фізично розділяється на дві структури: актуальну таблицю (поточний стан) та історичну таблицю. Будь-яка ініційована операція модифікації стану бази даних автоматично перехоплюється СУБД, яка фіксує попередню версію запису в історичній таблиці з точними мітками початку та кінця транзакції. Це дозволяє системі гарантувати повне алгоритмічне відтворення стану бази даних на будь-який момент часу в минулому.

Для довідкового простору застосовується унітемпоральна модель (лише System Time). У разі виконання команд оновлення або видалення (UPDATE або DELETE) СУБД автоматично здійснює зсув рядків таблиці. Наприклад, при видаленні тестового запису (ID 3) та оновленні статусу небезпеки для запису (ID 1), актуальна таблиця

(Таблиця 1) міститиме лише дійсні сутності, тоді як історична (Таблиця 2) збереже повний аудиторський слід знищених та змінених даних із точними транзакційними мітками закриття періоду (SysEndTime).

Таблиця 1

Актуальна таблиця

Id	CasNumber	IsPriorityHazardous	SysStartTime	SysEndTime
1	7440-43-9	TRUE	10.05.2026 14:00	31.12.9999 23:59
2	7439-97-6	TRUE	12.05.2026 9:15	31.12.9999 23:59

Таблиця 2

Історична таблиця

Id	CasNumber	IsPriorityHazardous	SysStartTime	SysEndTime
1	7440-43-9	FALSE	01.01.2026 10:00	10.05.2026 14:00
3	Test	FALSE	15.02.2026 11:30	10.05.2026 14:05

Окрім збереження транзакційної історії через механізми логічного видалення, архітектура бази даних має адекватно обробляти динаміку зміни екологічного законодавства, що реалізується шляхом застосування концепції темпоральності для нормативної бази. Екологічні нормативи, зокрема стандарти якості середовища та гранично допустимі концентрації для конкретних забруднювальних речовин, підлягають регулярному перегляду та оновленню в контексті імплементації європейських водоохоронних директив та національних нормативно-правових актів. Пряма модифікація існуючих значень екологічних лімітів у таблицях нормативів призвела б до непоправної фальсифікації результатів верифікації для історичних лабораторних протоколів, порушуючи семантичну цілісність минулих розрахунків та нівелюючи доказову базу системи.

Для гарантування консистентності ретроспективної аналітики в умовах зміни законодавства використовується механізм системного версіонування, реалізований через темпоральну модель даних. Архітектура сутності екологічних стандартів якості розширюється атрибутами визначення періоду валідності, що формують закритий часовий інтервал, протягом якого конкретне числове значення нормативу вважається юридично чинним. Коли державні органи затверджують нові ліміти, адміністративний модуль системи не здійснює деструктивного перезапису; натомість попередньому нормативу встановлюється точна дата завершення дії шляхом оновлення атрибута ValidTo, і паралельно формується новий запис із актуальними числовими показниками нормативів та відповідною датою набуття чинності в атрибуті ValidFrom.

При зміні нормативу з 1.5 мг/л на 1.0 мг/л, СУБД виконує транзакцію, що обмежує час дійсності (ValidTo) старого запису датою набрання чинності новим законом та створює новий запис (Таблиця 3). Одночасно автоматично генерується аудиторський слід в історичній таблиці (Таблиця 4).

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Таблиця 3

Бітемпоральна актуальна таблиця лімітів

ID	Pollutant_ID	Limit_Value	ValidFrom	ValidTo	SysStartTime	SysEndTime
1	42	1.5	01.01.2024	01.08.2026	28.07.2026 10:30	31.12.9999 23:59
2	42	1.0	01.08.2026	31.12.9999	28.07.2026 10:30	31.12.9999 23:59

Таблиця 4

Бітемпоральна історична таблиця лімітів

ID	Pollutant_ID	Limit_Value	ValidFrom	ValidTo	SysStartTime	SysEndTime
1	42	1.5	01.01.2024	31.12.9999	15.01.2024 9:00	28.07.2026 10:30

Ця хронологічна безперервність дозволяє системі виконувати просторово-часові запити, застосовуючи релевантне значення нормативу для оцінки факту перевищення, навіть якщо дата відбору проби припадає на період дії старих законодавчих норм. Таким чином забезпечується точність автоматизованих інспекційних висновків.

Транзакційні таблиці, які акумулюють первинні результати вимірювань, зберігають дані без можливості фізичного видалення на рівні прикладного застосунку, виконуючи роль аудиторського сліду. Якщо виникає необхідність виправити технічну помилку у затвердженому протоколі якості води, система відхиляє пряму модифікацію значень. Замість перезапису генерується новий транзакційний запис з інкрементованою версією, який за допомогою вказівника логічно пов'язується з попередньою версією протоколу. Це забезпечує збереження історії змін та унеможливлює приховану фальсифікацію ретроспективних масивів через інтерфейс системи.

Інформаційно-аналітичні системи моніторингу водних ресурсів характеризуються значною асиметрією навантажень на читання та запис. Традиційний підхід на основі базових універсальних операцій створення, читання, оновлення та видалення даних використовує єдину доменну модель як для модифікації стану системи, так і для формування багатовимірних вибірок. Використання такої універсальної моделі генерує структурний конфлікт: масиви даних, оптимізовані для безпечного транзакційного запису та збереження цілісності, виявляються неефективними під час виконання складних аналітичних агрегацій. Для розв'язання цього конфлікту у спроєктованій БД застосовано архітектурний патерн CQRS, який забезпечує незалежну оптимізацію операцій запису та читання, підвищуючи стійкість системи під навантаженням.

Обґрунтування розділення системи на два незалежних компоненти базується на необхідності розмежування життєвих циклів даних, де модель команд проєктується з орієнтацією на предметну область і відповідає за виконання модифікації стану системи. Її головним завданням є прийом вхідних даних, валідація формальних вимог та перевірка ключових бізнес-правил та обмежень доменної моделі. Модель запитів функціонує паралельно та незалежно, оперуючи структурами даних, оптимізованими для швидкої агрегації звітів. Розділення моделей запису та читання вирішує проблему асиметричного навантаження та усуває транзакційні блокування під час формування звітності. У

традиційній архітектурі виконання складних аналітичних запитів призводило б до блокування таблиць, перешкоджаючи паралельному збереженню нових даних.

Логічне розділення операцій вимагає механізму маршрутизації для взаємодії між зовнішніми інтерфейсами та ядром системи. Для цього в архітектуру інтегровано диспетчер повідомлень на базі патерна Mediator. Таке рішення забезпечує слабку зв'язність між точками входу та прикладною бізнес-логікою, централізуючи взаємодію компонентів. Використання патерна Mediator забезпечує абстрагування презентаційного шару. Робота точок входу зводиться до отримання запиту, його перетворення на повідомлення та передачі до шини маршрутизації. Це звільняє зовнішній рівень від логіки валідації та умовних розгалужень. Уся бізнес-логіка зосереджена в ізольованих обробниках, кожен з яких виконує окремий сценарій використання. Інфраструктурні аспекти (авторизація, управління транзакціями) винесено у перехоплювачі, що дозволяє обробникам працювати виключно з предметною логікою.

Хоча застосований патерн CQRS вирішив проблему асиметрії навантаження для регламентованої звітності, він не усунув фундаментальної обчислювальної складності під час первинної генерації матеріалізованих представлень або виконання нерегламентованих ретроспективних аудитів. Для виконання цих завдань необхідно здійснювати просторово-часові об'єднання за правилами інтервальної алгебри. Пошук історично достовірного нормативу в бітемпоральній моделі вимагає перевірки часових перетинів у двох вимірах: часі дійсності та транзакційному часі (за умови виконання нерівностей $ValidFrom \leq t \leq ValidTo$ та $SysStartTime \leq t \leq SysEndTime$). Оскільки класичні індекси B-Tree призначені для одновимірних діапазонів, їх застосування для складних багатовимірних перетинів інтервалів у бітемпоральній моделі є неефективним і створює значне навантаження при обробці багаторічних архівів.

Для ефективної обробки інтервальних запитів в архітектуру інтегровано механізми індексування. При пошуку перетинів у двох часових вимірах для історичних таблиць застосовано кластерні стовпчикові індекси (Clustered Columnstore Index). Під час виконання аналітичних агрегацій оптимізатор запитів використовує алгоритм відсікання сегментів на основі метаданих про мінімальні та максимальні часові межі кожного блоку. Це дозволяє ядру СУБД ігнорувати нерелевантні історичні періоди та обробляти відфільтровані масиви у векторному режимі. Такий підхід запобігає повному скануванню таблиць і забезпечує стабільну швидкодію реляційних об'єднань незалежно від накопиченого обсягу аудиторського сліду.

Використання кластерних стовпчикових індексів для матеріалізованих представлень та історичних масивів не лише забезпечує векторну обробку просторово-часових запитів, але й реалізує стиснення інформації. Стовпчиковий формат зберігання забезпечує коефіцієнт стиснення до 10 разів порівняно з традиційними структурами B-Tree, що радикально зменшує вимоги до дискового простору. Додаткова оптимізація вартості апаратних ресурсів досягається шляхом секціонування історичних таблиць. Цей механізм дозволяє ізолювати масиви даних за хронологічним критерієм і фізично переміщу-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

вати архіви минулих років на дешевші носії, зберігаючи швидкодію системи під час обробки поточних операцій

Формування багатовимірних аналітичних звітів у системі вимагає перехресного з'єднання транзакційних масивів із бітемпоральною нормативною базою, що також створює ресурсоємне навантаження СУБД. Щоб мінімізувати це навантаження, модель читання патерна CQRS фізично реалізована через систему матеріалізованих представлень. Вони зберігають агреговані екологічні показники у вигляді денормалізованих вибірок, мінімізуючи потребу в динамічних реляційних з'єднаннях під час обробки запитів фахівців-екологів.

Оскільки затверджені документи формують незмінний аудиторський слід, алгоритм синхронізації матеріалізованих представлень у системі розділено на два незалежні процеси. Для завершених розрахункових періодів, масиви яких є незмінними, представлення генеруються одноразово із відключенням механізмів подальшої синхронізації, що звільняє ресурси СУБД. Для активних розрахункових періодів застосування синхронного оновлення представлень відхилено через ризик транзакційних блокувань на рівні моделі команд. Натомість інкрементальний перерахунок активного представлення ініціюється системою виключно асинхронно – у момент переведення нового транзакційного документа у статус затвердження. Цей алгоритм архітектурно ізолює навантаження на читання від навантаження на запис, гарантуючи сувору консистентність даних для минулих періодів та кінцеву узгодженість для поточних операцій.

Додаткове прискорення агрегації метрик у масштабах усього річкового басейну досягнуто за рахунок побудови матеріалізованих представлень на базі кластерних стовпчикових індексів. Замість порядкового читання, вони стискають дані по стовпцям і дозволяють рушію СУБД виконувати векторну обробку запитів (Таблиця 5).

Таблиця 5

Приклад структури матеріалізованого представлення

Reporting Year	**Reporting Month**	**WaterObject Name**	**Pollutant Name**	**TotalDischarged Mass_kg**	**Allowed Limit_kg**	**Exceedance_kg**	**IsViolation**
2026	7	Випуск №1 (р. Інгулець)	Залізо загальне	1250.5	1000.0	250.5	TRUE
2026	7	Випуск №1 (р. Інгулець)	Сульфати	4500.0	5000.0	0.0	FALSE

Структура повністю ізольована від нормалізованих транзакційних таблиць. Матеріалізоване представлення зберігає вже розраховані суми (TotalDischargedMass_kg), математичні дельти (Exceedance_kg) та готові булеві індикатори порушень (IsViolation). Відсутність атрибутів транзакційного часу чи часу дійсності свідчить про те, що правила інтервальної алгебри вже були застосовані на етапі генерації зліпка.

Проте асинхронний перерахунок активних представлень створює часову затримку, що спричиняє ризик розбіжностей під час одночасної генерації звітів і затвердження нових протоколів. Оскільки екологічний моніторинг оперує юридично значущими даними, для усунення ризику отримання неактуальної інформації реалізовано механізм відкладеного читання. Якщо користувач ініціює формування звіту в момент наявності необроблених транзакцій, система призупиняє видачу результату до завершення фонового оновлення матеріалізованого представлення. Для запобігання блокуванню процесу через паралельне введення даних іншими користувачами алгоритм фіксує мітку часу на момент створення запиту. Система очікує на агрегацію виключно тих протоколів, які передують цій мітці. Усі наступні транзакції ізолюються і не збільшують час поточного очікування.

Практична імплементація запропонованої архітектури спирається на реляційну СУБД з Microsoft SQL Server та інфраструктуру платформи .NET. Вибір цієї СУБД зумовлений комплексною підтримкою інструментів, необхідних для реалізації патерна CQRS. Нативна підтримка темпоральних таблиць дозволяє делегувати контроль неперервності аудиторського сліду базі даних, виключаючи необхідність реалізації механізмів версіонування на рівні прикладної бізнес-логіки мовою C#. Водночас наявність технології кластерних стовпчикових індексів із можливістю векторної обробки та підтримкою матеріалізованих структур на базі індексованих представлень формує технологічний фундамент для фізичної ізоляції моделі читання та усунення транзакційних блокувань під час багатовимірної просторово-часової агрегації.

Висновки. Запропонована концептуальна та фізична модель бази даних інформаційно-аналітичної системи спрямована на зменшення затримок в ідентифікації екологічних інцидентів, спричинену децентралізованим ручним обліком даних. Реляційна архітектура демонструє підхід до балансування конфлікту між суворими нормативними вимогами екологічного комплаєнсу та потребою швидкої генерації багатовимірної звітності.

Відмова від деструктивних операторів модифікації на користь бітемпорального моделювання гарантує формування безперервного аудиторського сліду, що забезпечує юридичну достовірність історії водокористування навіть в умовах динамічної зміни державних екологічних нормативів. Водночас ізоляція аналітичного навантаження шляхом формування денормалізованої моделі читання знижує ризик деградації продуктивності та ймовірність транзакційних блокувань під час ретроспективної перевірки квот на спеціальне водовикористання.

Спроєктована архітектура перетворює систему з пасивного сховища розрізнених документів на інструмент оперативного моніторингу, що створює передумови для мінімізації фінансових ризиків підприємства за наднормативні скиди забруднювальних речовин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кірейцева Г., Циганенко-Дзюбенко І., Замула І., Демчук Л. Аналіз стану та моніторинг поверхневих водних об’єктів чернігівської області. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. 2024. Вип. 1 (144). С. 84–91.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.11.
2. Joy-Camacho W., Thornhill I. Opportunities and limitations to environmental management system (EMS) implementation in UK SMEs. Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 367. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121749.
3. Васенко О., Брук В., Свиридов Ю. Екологічний моніторинг водних ресурсів. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 6, no. 10 (108). P. 6–13.
DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.219556.
4. Власова О., Шевченко І., Козицький О. Картографічне відображення екологічного стану поверхневих водних об'єктів Правобережжя України. Водна безпека: наукові рішення в умовах криз та трансформацій: збірник тез XIV Міжнародної наук.-практ. конф. (м. Київ, 19–20 берез. 2026 р.). Київ: ІВПІМ НААН, 2026. С. 58–60.
DOI: https://doi.org/10.31073/mivg2026.
5. Chau V. T. N., Chittayasothorn S. A Bitemporal SQL Database Design Method from the Enhanced Entity-Relationship Model. 2021 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST). Pattaya, Thailand, 2021. P. 85–90.
DOI: https://doi.org/10.1109/ICEAST52143.2021.9426270.
6. Гнедіна К. В. Сучасні підходи до управління водними ресурсами та механізми їх екологічного моніторингу. Екологічні науки. 2021. № 4 (37). С. 33–39.
DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.4-37.4.
7. Henneberg J., Schuhknecht F. M., Reutter P., Brast N., Spichtinger P. Northlight: Declarative and Optimized Analysis of Atmospheric Datasets in SparkSQL. Proceedings of the 34th International Conference on Scientific and Statistical Database Management (SSDBM '22). 2022. Art. 13. DOI: https://doi.org/10.1145/3538712.3538715.
8. Iraqi, O., El Kadiri El Hassani, M., & Zouine, A. (2025). Microhooks: A novel framework to streamline the development of microservices. Computers, 14(4), 139.
DOI: https://doi.org/10.3390/computers14040139.
9. Schuhknecht F. M., Henneberg J., May N., Tatbul N. Accelerating Main-Memory Table Scans with Partial Virtual Views. Proceedings of the 19th International Workshop on Data Management on New Hardware (DaMoN '23). 2023. P. 89–93.
DOI: https://doi.org/10.1145/3592980.3595315.
10. Kulkarni, K., & Michels, J.-E. (2012). Temporal features in SQL:2011. SIGMOD Record, 41(3), 34–43. DOI: https://doi.org/10.1145/2380776.2380786.

REFERENCES

1. Kireitseva, H., Tsyhanenko-Dziubenko, I., Zamula, I., & Demchuk, L. (2024). Analiz stanu ta monitorynh poverkhnevykh vodnykh obiektiv Chernihivskoi oblasti [Analysis of the state and monitoring of surface water bodies of Chernihiv region]. Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho, 1(144), 84–91.
DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.11.
2. Joy-Camacho, W., & Thornhill, I. (2024). Opportunities and limitations to environmental management system (EMS) implementation in UK SMEs. Journal of Environmental Management, 367, 121749. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121749.
3. Vasenko, O. G., Bruk, V. V., & Svyrydov, Y. (2020). Ekolohichnyi monitoryng vodnykh resursiv [Ecological monitoring of water resources]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(10(108)), 6–13. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.219556.

4. Vlasova, O., Shevchenko, I., & Kozytskyi, O. (2026). Kartohrafichne vidobrazhennia ekolohichnoho stanu poverkhnevykh vodnykh obiektiv Pravoberezhzhia Ukrainy [Cartographic representation of the ecological state of surface water bodies of the Right Bank of Ukraine]. In Vodna bezpeka: naukovi rishennia v umovakh kryz ta transformatsii: zbirnyk tez XIV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (pp. 58–60). IVPIM NAAN.
DOI: https://doi.org/10.31073/mivg2026.
5. Chau, V. T. N., & Chittayasothorn, S. (2021). A bitemporal SQL database design method from the enhanced entity-relationship model. In 2021 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST) (pp. 85–90). IEEE.
DOI: https://doi.org/10.1109/ICEAST52143.2021.9426270.
6. Gnedina, K. V. (2021). Suchasni pidkhody do upravlinnia vodnymi resursami ta mekhanizmy yikh ekolohichnoho monitorynhu [Modern approaches to water resources management and mechanisms of their ecological monitoring]. Ekolohichni nauky, (4(37)), 33–39. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.4-37.4.
7. Henneberg, J., Schuhknecht, F. M., Reutter, P., Brast, N., & Spichtinger, P. (2022). Northlight: Declarative and optimized analysis of atmospheric datasets in SparkSQL. In SSDBM '22: Proceedings of the 34th International Conference on Scientific and Statistical Database Management (Article 13). Association for Computing Machinery.
DOI: https://doi.org/10.1145/3538712.3538715.
8. Iraqi, O., El Kadiri El Hassani, M., & Zouine, A. (2025). Microhooks: A novel framework to streamline the development of microservices. Computers, 14(4), 139.
DOI: https://doi.org/10.3390/computers14040139.
9. Schuhknecht, F. M., Henneberg, J., May, N., & Tatbul, N. (2023). Accelerating main-memory table scans with partial virtual views. In DaMoN '23: Proceedings of the 19th International Workshop on Data Management on New Hardware (pp. 89–93). Association for Computing Machinery. DOI: https://doi.org/10.1145/3592980.3595315.
10. Kulkarni, K., & Michels, J.-E. (2012). Temporal features in SQL:2011. SIGMOD Record, 41(3), 34–43. DOI: https://doi.org/10.1145/2380776.2380786.

Received 29.06.2026.
Accepted 28.08.2026.
Published 30.10.2026

Design of the architecture and data model for an information and analytical water resources monitoring system

Abstract. Environmental data management at enterprises is characterized by a high degree of decentralization, dominated by disjointed spreadsheets and manual aggregation of indicators. This approach significantly complicates the prompt detection of excessive discharges, increasing the risk of significant financial penalties for companies. When attempting automation, an architectural dilemma arises: ensuring environmental compliance requires maintaining a continuous audit trail in rigidly normalized structures, while risk management dictates the need for rapid generation of multidimensional analytical reports, the performance of which degrades under a high level of normalization.

An analysis of engineering approaches highlights the limitations of classical relational models with destructive operations for preserving historical context. Studies suggest using bitemporal modeling as a means of recording chronology. However, this encounters the problem of computational degradation during spatiotemporal joins, as classical indexes are not adapted to interval algebra. The application of the CQRS pattern is considered a way to sep-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

arate write and read operations. The aim of the work is to develop the architecture and data model of a centralized system that balances the trade-off between the requirement for the integrity of retrospective arrays and the need for high performance of analytical queries.

To achieve this goal, the problem domain was segmented into reference, topological, regulatory, and transactional spaces. The core of the architecture is the implementation of the bitemporal table standard. The variability of environmental legislation is handled through validity period attributes, ensuring the correctness of retrospective calculations. Asymmetric loading is distributed using the CQRS pattern and the Mediator dispatcher, which physically isolated transactions from analytics. To accelerate interval computations, clustered columnstore indexes were integrated. Segment elimination algorithms and batch processing minimized array scanning and ensured data compression. Reading is performed through materialized views with an asynchronous update mechanism. To reduce the risk of generating outdated reports, a deferred reading algorithm with a recorded query timestamp was developed.

The developed model establishes the technological foundation for utilizing the environmental monitoring system as an operational control tool. Abandoning destructive changes in favor of bitemporality ensures data traceability, and workload isolation minimizes the probability of transactional locks. This establishes an infrastructural foundation for timely response to incidents and the reduction of enterprise financial risks.

Keywords: database architecture, bitemporal modeling, ecological monitoring, CQRS, materialized views, audit trail, clustered columnstore indexes, interval algebra.

Рибальченко Олена Геннадіївна – ст. викладач кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8691-5401
Гриценко Андрій Миколайович – к.т.н., доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8665-853X
Білашенко Світлана Вікторівна – викладач кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4331-7425
Сорокін Віталій Сергійович – магістрант, кафедра моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.
ORCID: https://orcid.org/ 0009-0004-4899-5753

Rybalchenko Olena – Senior Lecturer at the Department of Modeling and Software Engineering, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8691-5401
Hrytsenko Andrii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Modeling and Software Engineering, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8665-853X
Bilashenko Svitlana – Lecturer, Department of Modeling and Software at the Department of Modeling and Software Engineering, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4331-7425
Sorokin Vitalii, Master's student, Department of Modeling and Software at the Department of Modeling and Software Engineering, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.
ORCID: https://orcid.org/ 0009-0004-4899-5753