

Міністерство освіти і науки України
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
Фізико-математичний факультет
Кафедра комп'ютерних наук

Дипломна робота

бакалавра

з теми: **«МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ЗАДАЧ ДЛЯ МАЛИХ РІЧОК
НА ПРИКЛАДІ РІЧКИ СМОТРИЧ»**

Виконав: студент 4-го курсу,
групи KN1-B18
спеціальності 122 Комп'ютерні науки
Гончар Фаррух Шухратович

Керівник: Щирба Віктор Самуїлович,
кандидат фізико-математичних наук,
доцент

Кам'янець-Подільський – 2022

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ	7
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РІЧКИ СМОТРИЧ.....	22
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН У МАЛИХ РІЧКАХ.....	30
ВИСНОВКИ.....	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40
ДОДАТОК.....	45

ВСТУП

Актуальність проблеми. У нашому буденному житті ми досить часто розглядаємо задачі, де актуальними виступають не стільки обмеження, пов'язані з кількістю запасу певного виду ресурсів, скільки важливими є якісні характеристики цього ресурсу, що обумовлено безпекою їх використання. Мова йде не лише про те, що запаси різного роду продукції чи сировини є обмеженими і потрібно економити їх використання, але й про необхідність враховувати, що зміна їх якості призводить до сумніву можливості використання таких життєво важливих ресурсів. В своїй більшості такі задачі в глобальному масштабі пов'язані з проблемами екології та захисту навколишнього середовища.

З аналізу стану водних ресурсів України (див. розділ 1) чітко видно особливу потребу в дослідженні екологічних задач, пов'язаних з використанням питної води. Не дивлячись на те, що централізоване водопостачання населення забезпечується в основному за рахунок поверхневих джерел, більшість із яких припадає на малі річки, аналіз їх стану практично не проводиться. Відносно постійні дослідження проводяться регіональними колективами екологів. У нашому регіоні таку досить різнопланову роботу проводять науковці кафедри екології нашого університету та співробітники національного природного парку «Подільські Товтри» (адреса: пл. Польський ринок, 6; E-mail: npptovtry@ukr.net), але їх, зазвичай, статистичні дані потребують системного аналізу.

Системний аналіз з використанням математичних моделей є однією з найбільш поширених концепцій в науково-технічних дослідженнях. Він має в своєму розпорядженні великий набір порівняно нових математичних методів. До них відноситься сіткове моделювання, аналіз функцій відгуку, стохастичне моделювання, дослідження стійкості, теорія графів, теорія ігор, математичне моделювання, імітаційне моделювання, лінійне програмування, теорія

управління і т.д. Застосування системного аналізу до екології відоме під назвою «системної екології».

Моделювання екологічних систем вже пройшло через період дискусій щодо тенденцій його подальшого розвитку і вступило в новий етап, який припускає широке використання методів теорії систем.

Загострення екологічних проблем здебільшого зумовлене хімічним забрудненням річок внаслідок викидів і скидів з промислових об'єктів забруднювальних речовин, повсюдним використанням добрив і пестицидів, що потрапляють у прісну воду. Для прогнозування якості води річок і водоймищ використовують найрізноманітніші методи, за допомогою яких надається можливість запобігати зниженню якості води нижче від санітарно-гігієнічних нормативів (гранично-допустимих концентрацій – ГДК).

З'ясування хімічного складу води річок є одним з найважливіших завдань гідроекологічних досліджень, оскільки в результаті ми отримуємо суму кількісних параметрів, що репрезентують сукупність процесів внутрішньої динаміки гідроекосистеми. Використання методичних підходів статистико-аналітичного аналізу дає змогу окреслити не лише цілісну картину гідроекологічного стану аквальної системи у її довільному конкретно-часовому вимірі, а й можливість виявлення наявних тенденцій сезонно-багаторічної ритміки, а також просторово-часової трансформації гідроекосистеми за досліджуваний період, внаслідок природних та антропогенно-зумовлених впливів.

Кількісна оцінка закономірностей формування, поширення і режиму трансформації розчинених у річкових водах речовин, з урахуванням впливу на їх склад техногенних чинників, є необхідною передумовою практичного розв'язання ключових завдань науково регламентованого раціонального природокористування на регіональному рівні. Адже саме склад, вміст і співвідношення розчинених хімічних елементів зумовлюють санітарну і екологічну якість природних вод, їх властивості, безпосередньо впливають на

діяльність гідробіонтів, а відтак, — на загальний гідроекологічний стан водотоків.

Проведення комплексних моніторингових досліджень водотоків за гідрохімічними показниками дозволить обґрунтовувати основні напрямки екологічно безпечного ведення господарства в басейнах річок, регулювати надходження стічних вод та сприяти розробці екологічних нормативів антропогенного навантаження з врахуванням усіх особливостей даного регіону та стратегії раціонального і безпечного водокористування.

Об'єктом дослідження даної роботи є гідрогеологія поверхневих водних ресурсів України, що зосереджена на проблемах безпечного використання ресурсів малих річок.

Розглянуто загальну базу моделей перенесення речовин водним середовищем, як однокомпонентним, так і багатоконпонентним. Взято до уваги і моделювання якості води озер та водосховищ, в ракурсі моделювання якості водного середовища у водоймах з стоячою водою, математична база яких відрізняється від бази моделей проточних водоймищ.

Предметом дослідження виступає математична модель розрахунку розповсюдження забруднювальних речовин у річках в одновимірному випадку з урахуванням турбулентної дифузії, швидкості течії та швидкості розпаду речовини (самоочищення потоку).

При цьому особливу увагу звернута на ознайомлення з метою вибору типу і структури математичної моделі, на основні показники явища, які необхідно реалізувати у прийнятій моделі при її математичній формалізації. Зокрема, зусилля необхідно направити на пошук більш доцільної вербальної моделі для подальшого створення математичної моделі, яка більш точно відображає реальні процеси, наприклад, формування дощового схилового стоку та виносу ним речовин.

Ефективний вибір вербальної гідроекологічної моделі і її перетворення в математичну модель можна зробити тільки тоді, коли ґрунтовано досліджено положення про природні гідроекологічні процеси, які, на перший погляд, лише

дотиково стосуються теми дослідження. Тому у роботі чимало місця відведено дослідженню гідроекологічних процесів.

Робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку, що містить лістинг комп'ютерної програми для розрахунків.

У першому розділі проводиться загальний аналіз стану водних ресурсів України. Встановлено, що за запасами місцевих водних ресурсів Україна є однією з найменш забезпечених країн у Європі. Для побудови екологічної моделі зазначено, що оцінка якості води має статистичний характер за кожним з показників, яких дуже багато. Узагальненої оцінки якості води не існує. Проблему для математичного моделювання становить і точність вимірювання статистичних даних.

У другому розділі дається загальна характеристика показників про річку Смотрич, які можна використовувати про побудові концептуальної моделі. Встановлено, що це типовий представник малих річок. При моделюванні потрібно враховувати наявність ставків, фактичну відсутність точкових джерел забруднення та ряд інших важливих для моделювання факторів.

У третьому розділі будуються математичні моделі і проводиться комп'ютерне дослідження.

За результатами дослідження з доповіддю «Математичне моделювання розповсюдження забруднювальних речовин у малих річках» виступав на науковій конференції студентів і магістрантів за підсумками науково-дослідної роботи у 2021-2022 навчальному році. Подано статтю до збірника наукових праць студентів та магістрантів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ

На початку XXI сторіччя сучасний світ зіштовхнувся із проблемою деградації екологічних систем і поступового виснаження природних ресурсів, в першу чергу водних, від яких залежить існування людства на Землі. Досить гостро стоїть ця проблема і для України.

За запасами місцевих водних ресурсів (1 тис. м³ на 1 особу) Україна вважається однією з найменш забезпечених країн у Європі (Швеція – 2,5 тис. м³, Великобританія – 5, Франція – 3,5, Німеччина – 2,5 тис. м³).

Існує декілька шляхів забезпечення населення питною водою, при цьому масово використовують лише два. Найнадійніше захищеним від антропогенного впливу джерелом питного водопостачання є артезіанські підземні води. Оскільки вони забезпечують лише мінімальні потреби (менше 30 відсотків), то його можна вважати другорядним, резервним варіантом.

Іншим широко розповсюдженим у світі джерелом питного водопостачання є поверхневі прісні води. Та, на жаль, тут проблема полягає в тому, що вони є найбільш вразливими з екологічної точки зору і заходи для їх збереження є досить важливими.

У постанові Верховної Ради „Про основні напрямки державної політики у галузі охорони довкілля, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки” визначені найбільш актуальні екологічні проблеми природних вод на території України:

- надмірне антропогенне навантаження на водні об’єкти внаслідок інтенсивного способу ведення водного господарства призвело до кризового зменшення само відтворюючих можливостей річок та виснаження водоресурсного потенціалу;
- значення забруднення водних об’єктів внаслідок невпорядкованого відведення стічних вод від населених пунктів, господарських об’єктів і сільськогосподарських угідь;

- широкомасштабне радіаційне забруднення басейнів багатьох річок внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС;
- погіршення якості питної води внаслідок незадовільного екологічного стану джерел питного водопостачання;
- недосконалість економічного механізму фінансування і реалізації водоохоронних законів;
- відсутність автоматизованої постійно діючої сітки моніторингу в системі водокористування тощо.

Названі екологічні проблеми є актуальними для всіх водних басейнів України.

Це також стосується в першу чергу Дніпра, водні ресурси якого становлять близько 80% водних ресурсів України і забезпечують водою понад 32 млн. населення та 2/3 господарського потенціалу країни. За статистичними даними, наприклад, в кінці ХХ століття найбільшу кількість забруднювальних речовин водокористувачі скинули до Дніпра 757 тис. т. (32 % від усіх скидів); 60 % території басейну Дніпра розорано, на 35 відсотках земля сильно ерозована, на 80 відсотках трансформовано первинний природний ландшафт. Водосховища на Дніпрі стали акумуляторами забруднювальних речовин. Значної шкоди північній частині басейну завдана катастрофа на Чорнобильській АЕС; в критичному стані перебувають малі річки басейну, значна частина яких втратила природну здатність до самоочищення.

В катастрофічному стані знаходяться притоки нижнього Дніпра, де щорічно ускладнюється санітарно-епідемічна ситуація, зменшується вилов риби та бідніє біотичне різноманіття.

Варто зазначити, що в наступні роки ці показники дещо зменшуються, але лише через спади економічного виробництва.

Не в кращому, а подекуди і в гіршому стані перебувають басейни інших річок України. Наприклад, у 1998 році було скинуто забруднювальних речовин у: Сіверський Донець – 588 тис. т. (18 % від загальної маси); Дністер – 78 тис. т. (2,4 %); Чорне море – 61,6 тис. т. (1,9) та Азовське море – 148 тис. т. (4,6).

До основних причин, що зумовлюють таких екологічний стан природних вод України належить:

- скидання неочищених та недостатньо очищених комунально побутових і промислових стічних вод безпосередньо у водні об'єкти та через систему міської каналізації;
- надходження до водних об'єктів забруднювальних речовин у процесі поверхневого стоку з забруднювальних територій та сільськогосподарських угідь, ерозії ґрунтів на водозабірній площі тощо.

Тому питання екологічної оцінки якості природних вод в Україні є дуже актуальним.

Для поліпшення такого стану розроблені екологічні класифікації та нормативи якості вод, методики їх екологічної оцінки, в тому числі з використанням картографічного методу дослідження .

Існуючі розробки з картографування забруднення та якості природних вод можна узагальнити наступним чином:

- карти створюються для сезонних, річних і багаторічних періодів;
- оцінка якості води виконується за окремими показниками та їх комплексами у вигляді різних індексів, наприклад ІЗВ;
- використані при картографуванні класифікації і системи оцінок залежить від завдань дослідження і способів їх досягнення;
- використовується, як правило, два способи зображення компонентів забруднення – значками, локалізованими до пунктів спостереження, що характеризують кількісні та якісні характеристики водного об'єкту, і спосіб знаків руху вздовж його русла.

Особливо недостатньо вивченими і вирішеними залишаються питання обґрунтування принципів відбору і узагальнення показників картографування, встановлення принципів поєднання і комплектування показників на одній карті і багато іншого. Із всіх розроблених нині класифікацій найбільш обґрунтованою для картографування є оцінка ступеня забруднення водойм за індексами.

Звичайно, всі оцінки є формалізованими, в основі їх лежить сумування результатів хімічного аналізу проб води.

Прикладом такої оцінки можна назвати розроблену і видану в Інституті географії НАН України за участю фахівців з інших установ карту „Україна. Екологічна оцінка якості поверхневих вод” в масштабі 1:1000000 (1996 р.).

Оцінку проведено за трьома блоками показників: А – сольовий склад, Б – трофо-сапробіологічні показники, В – специфічні показники токсичної і радіаційної дії. Загальний екологічний індекс „Е” розрахований як середнє арифметичне значення трьох факторних індексів.

Ця екологічна оцінка якості поверхневих вод проведена з урахуванням гідробіологічних критеріїв, які не заперечують гігієнічних норм, а доповнюють, сприяють збереженню цілісності водних екосистем.

Є ще інша методика оцінки якості води, що базується на санітарно-гігієнічному підході і стосується самої людини.

Вона використана для розробки карти „Україна. Забрудненість поверхневих вод” в масштабі 1:2000000.

Для характеристики стану водних об’єктів аналізувалися результати дослідження поверхневих вод на пунктах господарсько-питного, культурно-побутового та рекреаційного водокористування.

Ця оцінка в пунктах водопостачання проводилась на основі державних санітарних правил і норм „Вода питна. Гігієнічні вимоги для якості води централізованого господарсько-питного водопостачання”, що затверджені наказом Міністерства охорони здоров’я України № 383 від 23.12.96. Гігієнічна класифікація водних об’єктів за ступенем забруднення передбачає оцінку якості води за органолептичними, токсикологічними, загально санітарними (санітарним режимом) і бактеріологічними показниками.

Органолептичні показники визначалися за запахом, смаком, кольоровістю, мутністю, завислими речовинами, рН, лужністю, загальною жорсткістю, загальною мінералізацією, сухим залишком, вмістом магнію, марганцю, заліза, хлоридів, сульфатів, нафтопродуктів тощо. Перевищення їх

концентрації в 4 – 8 і більше разів ГДК оцінюється в 3 – 4 бали (норма 2), що є перешкодою для питного використання води. Стосовно будь-якого виду водокористування головне значення має питання про мінералізацію води і складу головних іонів.

Небажаною і навіть шкідливою є питна вода з дуже високою (більше 1000 мг/куб. дм.), так і з дуже низькою (менше 100 мг/куб. дм.) мінералізацією.

Вода з мінералізацією 50 – 100 мг/куб. дм. і менше не має доброго смаку і сприймається як дуже прісна.

Питна вода не повинна містити сірководень і метан, що надають їй неприємний запах і смак.

Вміст кальцію і магнію обумовлює жорсткість води. Загальна жорсткість повинна бути не менше 7 мг/л, а в особливих випадках до 10 мг/л.

Для питання може використовуватись відносно жорстка вода, через те, що вміст солей кальцію і магнію не дуже шкідливий для здоров'я людини.

Однак в дуже жорсткій воді погано розварюється м'ясо і овочі, прання білизни пов'язане з додатковою витратою води, тканини зношуються, фарби тьмяніють.

Взагалі, дуже м'яка вода як і надзвичайно велика загальна її жорсткість погано відбивається на здоров'ї людини.

На екологічну якість води впливають й інші органолептичні показники води, а саме: запах, смак, прозорість, мутність.

Вони не тільки впливають на естетичне сприйняття, але й сприймаються людиною як доказ вмісту у воді шкідливих для її здоров'я речовин.

Вимоги до таких органолептичних властивостей води наступні: запах і смак не повинні бути більше 2 балів, кольоровість менше 20 градусів, прозорість більше 30 см, мутність менше 2 мг/куб. дм.

Чиста вода при малому шарі води – безкольорова, при великому шарі – має блакитний відтінок.

Решта відтінків кольору вказує на вміст домішок. Так, солі заліза зафарбовують воду в червонуватий (іржавий) колір, дрібні частинки піску та глини – в жовтий.

Гумусні речовини (продукти розпаду трави, листя, кори і інше) надають воді кольори від жовтого до коричневого.

Чиста вода не має смаку, смак їй надає забруднення.

Розрізняють чотири види смаку: солоний, гіркий, кислий, солодкий. Солоний смак води залежить від хлоридів натрію, гіркуватий – хлоридів магнію, кислий: надлишку кислот, солодкий: органічні речовини.

Важливим екологічним показником є прозорість води, від якої залежить інтенсивність фотосинтезу і глибина проникнення світла в товщу води.

Прозорість тісно пов'язана з мутністю, тобто з вмістом завислих мінеральних часток.

Для питної води оптимальною є її температура від 8 до 15⁰С.

Вода з більш високою температурою не має освіжаючої дії на організм людини і погано тамує спрагу, а з більш низького температурного може бути причиною застудних захворювань (ангіни, грипу, бронхіту).

Важливим в екологічному значенні є і водневий показник рН природної води.

Водневий показник або концентрація вільних іонів водню визначає ступінь кислотності або лужності води.

При значенні рН від 6,5 до 7,5 води нейтральні, нижче – кислі, а вище названої величини – лужні.

Більшість поверхневих вод суші має нейтральну або слабокислу реакцію (рН від 6,0 до 8,0).

Чітко виражену кислу реакцію мають болотяні води.

При рН менше 5,5 в прісних водоймах починає зменшуватися видова різноманітність гідробіонтів, набувають розвитку гриби.

Токсикологічні властивості визначалися за вмістом азоту (аміаку, нітратів, нітритів), фтору, СПАВ, фенолу, ціаніду, міді, свинцю, цинку, хлору, нікелю, цезію-137, стронцію-90.

Використання води із концентрацією шкідливих речовин більше ГДК в 3 – 5 разів може призвести до виникнення початкових хворобливих симптомів серед населення через 1 – 2 місяці; в 10 разів – через 2 – 4 тижні; в 100 разів – через декілька діб. Специфічний вплив виявляють на організм нітрати.

Для нітратного азоту встановлена велика ГДК – 10 мг/куб. дм., оскільки самі по собі вони не шкідливі для людини.

Однак під дією деяких шкідливих бактерій при високих дозах нітрати можуть перейти в нітрити– отруйну речовину, що сполучаючись з гемоглобіном крові переводять його у форму метгемоглобіну, що перешкоджають проникненню кисню по кровоносній системі організму.

Санітарний режим природних вод оцінювали за розчином кисню, БПК₅ і БПК₂₀, окислюваність і ХПК.

До цієї групи належать важливі характеристики вмісту у воді розчинених органічних речовин і мікроорганізмів, бактерій, що розкладають органіку до мінерального складу.

Похідним показниками концентрації органічних речовин у воді служить біохімічна потреба кисню за 5 і 20 діб; перманганатна і біхроматна окислюваність.

Перші два показники дають уяву переважно про вміст у воді органічних речовин тваринного походження, тому широко використовуються при оцінці господарсько-побутових стічних вод. Біхроматна окислюваність або (ХПК) характеризує всі органічні речовини, а перманганатна окислюваність – переважно легко окислювальні хімічні речовини (вона близька до вмісту вуглецю).

Бактеріологічні показники визначалися через індекси ЛКП (через бактерії групи кишкової палички).

Відомо багато тисяч видів бактерій. Всі вони розподіляються на дві великі групи – сапрофітні (нешкідливі для людини, інколи навіть корисні) і патогенні (хвороботворні).

Виділити патогенні бактерії із всієї маси мікроорганізмів складно, тому при оцінці якості води обмежуються мікробним числом (загальна чисельність бактерій в 1 куб. см води) і колі-індексом (кількість кишкових паличок в 1 куб дм води). Інколи замість колі-індексу використовуються колі-титр (об'єм води в 1 куб см), що приходить на одну кишкову паличку.

Вміст названих вище компонентів оцінювали шляхом порівняння їх з ГДК, а сумарний їх вміст – за допомогою індексного принципу, що дозволило привести всі показники окремих забруднювачів до єдиної системи вимірювання та їх зіставлення.

При цьому виконувався відбір і узагальнення забруднювачів за табличною схемою, запропонованою фахівцями-медиками. Вона була надалі доопрацьована з урахуванням специфіки їх картографічного дослідження: оскільки була складність у визначенні індексу забрудненості за оцінювальними показниками (в межах однієї лімітуючої дії є декілька забруднюючих речовин), тому введена додаткова шкала оцінки, а саме – кратність перевищення нормативних величин.

Використовувалася також додаткова шкала оцінювання – підвищена забрудненість як середньоарифметичне значення між помірним і високим її значеннями.

В межах лімітуючих показників шкідливості визначалась для всіх забруднювачів середня кратність перевищення фактичного забруднення їх відповідних ГДК.

Ці середні кратності сумувалися і в результаті одержали індекси забруднення. За одержаними індексами забрудненості оцінювався якісний стан води за ступенем забрудненості: допустима (індекси від 0 до 5); помірна (5 – 10); підвищена (10 – 15); висока (15 – 20) і дуже висока (більше 20). Ці градації оцінки стосуються водойм 1 і 2 категорій водокористування.

Якщо водойма служить одночасно для господарсько-питного водокористування (1 категорія) і культурно-побутового (2 категорія), то її оцінюють на основі градацій показників (за винятком бактеріологічного) для першої категорії.

Вода з допустимими рівнем забрудненості (індекси від 0 до 5) мають екологічну оцінку якості води – чиста. Вона не викликає несприятливого впливу на людину і може використовуватися без обмеження.

Вода з помірним забрудненням (індекс від 5 до 10) свідчать про помірну ступінь забрудненості і часткове порушення водокористування, при цьому існує ризик несприятливого впливу забрудненої води на стан здоров'я населення, але це умовно чиста вода.

Решта градацій гігієнічної оцінки води характеризують її з екологічної точки зору як забруднену (шкідливу для вживання). При забрудненні, що відповідає індексу від 10 до 15 (підвищена забрудненість) вода при водокористуванні потребує санітарної очистки. Вода з індексом забруднення від 15 до 20 (висока забрудненість) вказує на виражену забрудненість і повну непридатність водойм для всіх видів водокористування, оскільки викликає погіршення здоров'я населення.

Вода з дуже високим забрудненням (індекси більше 20) також непридатна для водокористування і, навіть, короткотривалий контакт з водою може викликати несприятливі наслідки для здоров'я населення.

Така екологічна оцінка якості води виконана в межах басейнів річок, а також на водомірних постах. Перша оцінка виконана на основі усереднення оцінюючих даних водомірних постів. Спосіб зображення – картограма в межах басейнів річок.

В цілому для водомірних постів України переважають показники помірної забрудненості води, тобто умовно чиста вода.

За результатами оцінки екологічно чиста вода виявлена в Закарпатській, в південній частині Вінницької, на південному сході Харківської і заході Одеської областях та південно-західній частині Автономної республіки Крим.

Підвищена забрудненість води на карті відмічена у Львівській, Одеській, Запорізькій, Дніпропетровській та Донецькій областях; висока забрудненість – в північній частині Донецької області, а дуже висока забрудненість – на значній частині Херсонської області.

Малі річки забруднені на порядок більше, ніж великі, що пов'язане не тільки з водністю рік, а також з тим, що великим річкам приділяється більше уваги щодо будівництва очисних споруд, ніж малим річкам і інше.

Важливий для еколого-географічного дослідження ще й інший показник якості води, що характеризує природний потенціал її стійкості. Маючи карти забрудненості і стійкості води, можна буде, деякою мірою, оцінити стан забрудненості на перспективу, а значить планувати різні водоохоронні і інші заходи.

В міру зростання забрудненості водного об'єкту послаблюється біологічних механізмів самоочищення. Переважно розвиваються нижчі або примітивні форми життя (синьо-зелені водорості, анаеробні бактерії й інші), поступово зникають вищі форми життя. Найбільше ця проблема стосується малих річок. Вони мають, з одного боку, високе забруднення, а з іншого – невелику стійкість або потенціал самоочищення. А це означає, що більшими темпами відбувається деградація малих річок у порівнянні з іншими. На їх охорону в першу чергу необхідно направляти зусилля державних органів. Показники стійкості розраховані за кількістю днів з температурою води понад $+16^{\circ}\text{C}$, індекси кольоровості води і середньою багаторічною витратою води в куб. м. за секунду.

Оцінка якості води виконана на водомірних постах в межах басейнів основних рік України. Спосіб зображення – районування за кількісною ознакою.

Забруднення поверхневих вод значною мірою впливає на якість підземних вод, які активно використовуються для пиття та інших цілей.

Внаслідок господарської діяльності якість підземних вод постійно погіршуються.

Це пов'язане з існуванням на території України близько 3000 фільтруючих накопичувачів стічних вод, а також з широким використанням мінеральних добрив та пестицидів.

Як свідчать карти, найбільш незадовільний якісний стан підземних вод на півдні України, а саме: в Одеській, Миколаївській, Херсонській, Запорізькій областях та Автономної республіки Крим.

На карті виділяють осередки підземних вод, що забруднені пестицидами та нітратами. Пестицидне забруднення вище за нормативні величини спостерігається у Вінницькій, Житомирській, Луганській, Миколаївській областях та Автономної республіки Крим. Особливо таке забруднення характерне для Одеської області. Нітратне забруднення більше ГДК спостерігається практично на всій території України, за винятком її західних областей.

Як свідчить порівняльний аналіз розглянутих карт, високе забруднення поверхневих і підземних вод територіально співпадають. Це становить велику екологічну небезпеку для населення даних регіонів, якщо не вжити певних природоохоронних заходів.

Отже, картографування якості природних вод дозволило виявити деякі її територіальні закономірності, які можуть мати певне значення при плануванні заходів щодо поліпшення якісного стану природних вод. В основі цього аналізу лежить оцінка якості води за показниками ІЗА. Вона дозволила провести порівняльну оцінку якості води різних водних об'єктів між собою (незалежно від присутності різних забруднюючих речовин) виявити тенденцію змін якості води за роками, спростити і значно поліпшити форму представлення інформації, в тому числі й у вигляді карт. ІЗВ небажано використовувати для проектних розрахунків, встановлення гранично допустимих скидів, накладання штрафних санкцій та інших випадків, коли для розрахунків використовуються концентрації окремих речовин.

Поняття чистої чи забрудненої води – умовні.

Все залежить від водокористування й відповідних діючих нормативів якості води. Під забрудненням води необхідно розуміти погіршення якості води внаслідок дії антропогенних і природних факторів, які роблять воду малопридатною або взагалі непридатною хоча б для виду водокористування.

Для регіонів високої і дуже високої забрудненості необхідно розробляти крупномасштабні карти, за якими можуть плануватися заходи з охорони водних об'єктів конкретних регіонів. Такі регіони в першу чергу потребують водоохоронних заходів, спрямованих на зменшення забрудненості води. Розробка крупномасштабних карт потребує детальної вивченості рік: в межах території картографування кожна річка повинна мати як мінімум два пункти спостереження на достатній відстані один від одного. Це дає змогу простежити тенденції змін санітарно-гігієнічного характеристик природних вод. Виявлення таких забруднених ділянок водних об'єктів будуть сприяти розроблені нами дрібномасштабні карти екологічної якості природних вод.

В Україні централізоване водопостачання здійснюється в основному за рахунок поверхневих джерел (близько 70%), більшість із яких припадає на малі річки.

Мала річка – це природний водотік, що має стік впродовж усього року або він переривається на короткий час, живиться атмосферними опадами та підземними водами.

Класифікація річок України залежно від водозбірної площі басейну на великі, середні та малі здійснюється згідно з статті 79 Водного Кодексу України 1995 року.

Відповідно до неї, малі річки мають поверхню водозбору до 2 тисяч квадратних кілометрів, середні – від 2 до 50 тисяч квадратних кілометрів, великі – понад 50 тисяч квадратних кілометрів.

Відповідно до цієї класифікації на території України є понад 63 тисяч малих річок із сумарною довжиною близько 185,8 тисяч кілометрів. Більшість, а саме 94,9 % малих річок (59,8 тис.), мають довжину до 10 кілометрів.

Відповідно у решти, тобто в 3,2 тисячах малих річок, довжина становить понад 10 кілометрів.

Найбільше малих річок у басейнах Дунаю (17,6 тис.), Дніпра (15,4 тис.) та Дністра (14,9 тис.). На малих річках в Україні збудовано понад 49,4 тисячі ставків, тобто в середньому по дві тисячі у кожній області.

Відповідно до «Водної рамкової директиви» (ВРД) ЄС (2000), положення якої імплементуються у водне законодавство України, площа водозбору малих річок складає 10–100 квадратних кілометрів. Тому за цією директивою в Україні нараховується всього 19,8 тисяч малих річок з сумарною довжиною 59,2 тисяч кілометрів, з них з довжиною понад 10 кілометрів – 1746 з сумарною довжиною 24,3 тисяч кілометрів. Інші річки, очевидно, вважають потічками, які не заслуговують на особливий розгляд і вони не входять у статистичні дані.

Гідрологічний режим малих річок рівнинної частини території України характеризується весняною повінню, низькою літньою меженню з окремими дощовими паводками, незначним осіннім підвищенням водності, низькою зимовою меженню, яка досить часто порушується паводками під час відлиг. За весняну повінь проходить від 40 до 80 %, а на деяких малих річок на півдні України – до 90 і навіть 100 % річного стоку.

Малі річки люди з давніх часів використовували для питного водопостачання, вилову риби, влаштування водяних млинів, згодом – малих ГЕС. Унаслідок посилення антропогенного впливу значна кількість малих річок деградувала, а багато з них зовсім зникли.

Ступінь забруднення малих річок значно вищий порівняно із середніми і великими, оскільки вони мають нижчу самоочисну здатність. Малі річки несуть забруднену воду в річки, в які вони впадають.

У 1988–1994 роках в Україні здійснювалася спроба паспортизації малих річок, але було обстежено лише 2,5 тис. водотоків (4 %).

Стан більшості малих річок України оцінюють як критичний, основними причинами якого вважають:

- забруднення господарсько-побутовими, промисловими та сільськогосподарськими стічними водами;
- розорювання водозборів;
- замулювання русел;
- високу зарегульованість стоку;
- осушення боліт, які є джерелами живлення багатьох малих річок.

Для збереження малих річок прийнято низку нормативних актів, зокрема заборонено змінювати рельєф на водозборі малих річок, випрямляти русло, розорювати заплаву, вести будівництво на відстані до 25 метрів від урізу води тощо, передбачено створення водоохоронні смуги.

Висновки. Питання забезпечення питною водою населення України є досить злободенним, оскільки за запасами місцевих водних ресурсів (1 тис. м³ на 1 особу) Україна вважається однією з найменш забезпечених країн у Європі (Швеція – 2,5 тис. м³, Великобританія – 5, Франція – 3,5, Німеччина – 2,5 тис. м³). В Україні централізоване водопостачання здійснюється в основному за рахунок поверхневих джерел (близько 70 відсотків від потреб), більшість із яких припадає на малі річки.

Проблема полягає в тому, що поверхневі води є найбільш вразливими з екологічної точки зору і заходи для їх збереження є досить важливими.

На державному рівні вироблено основані напрямки політики у галузі охорони довкілля, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки, визначені найбільш актуальні екологічні проблеми природних вод на території України. Для поліпшення екологічного стану проводяться систематично вимірювання, розроблені екологічні класифікації та нормативи якості вод, методики їх екологічної оцінки, складаються карти забрудненості.

Гігієнічна класифікація водних об'єктів за ступенем забруднення є досить багатогранною і, зокрема, передбачає оцінку якості води за органолептичними, токсикологічними, загально санітарними (санітарним режимом) та бактеріологічними показниками.

Наприклад, органолептичні показники, в свою чергу, визначаються за запахом, смаком, кольоровістю, мутністю, завислими речовинами, рН, лужністю, загальною жорсткістю, загальною мінералізацією, сухим залишком, вмістом магнію, марганцю, заліза, хлоридів, сульфатів, нафтопродуктів тощо. Аналогічно, багатогранними є токсикологічні, загально санітарні і бактеріологічні показники.

Екологічна оцінка якості води виконується в межах басейнів річок, а також на водомірних постах. Вона має статистичний характер за кожним з **показників**, яких **дуже багато**. Поняття чистої чи забрудненої води – умовні. **Узагальненої оцінки якості води не існує**. При цьому обчислюють середні значення в межах певного регіону, або за певний проміжок часу. Отже, ці **значення є досить умовними**. Проблему для математичного моделювання становить і **точність вимірювання** статистичних даних, які подають екологічні служби.

РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РІЧКИ СМОТРИЧ

Річку Смотрич можна назвати типовим представником малих річок Західної та Центральної України. Довжина річки становить 169 кілометрів, сточище (ділянка суходолу, з якої надходять води в дану річкову систему) 1800 квадратних кілометрів. Річище звивисте. Переважна ширина річища 10—15 метрів, найбільша — 40 метрів. Долина переважно вузька, в багатьох місцях каньйоноподібна. Похил річки 1,3 м/км. Заплава часто переривчаста, завширшки до 0,6 кілометрів; подекуди звужується до 20—50 метрів. У басейні річки створено численні ставки для рибальства і зрошування.

Смотрич бере початок з джерел поблизу села Андрійківці. Тече переважно на південь Подільською височиною. Води його поповнює значна кількість великих та менших приток – Сквила, Тростянка, Чорноводка, Лисогірка, Дібруха. Саме ж живлення річки з притоками переважно снігове та дощове. На своєму шляху Смотрич минає багато містечок та сіл, долина його густо заселена.

На її берегах розташовано два міста: Городок і Кам'янець-Подільський. У петлях Смотричу розташовані Старе місто, Польські фільварки та Руські фільварки міста Кам'янця-Подільського. Безпосередньо на берегах Смотричу розкинулися вулиці: на лівому березі — Білановецька набережна, Смотрицька, Онуфріївська, Річна, на правому березі — Зінковецька набережна, Видрівка (колись — село), Руська, Карвасари (колись — містечко).

Крім того на берегах Смотричу лежить велика кількість сіл. Зокрема, (за попереднім адміністративним поділом Хмельницької області)) села Городоцького району: на північ від Городка — Варівці, Остапківці, Шишківці, Кузьмин, Новосілка, Бедриківці; на південь від Городка — Лісогірка, Купин, Мала Левада, Велика Левада, Великий Карабчіїв, Грицьків. На берегах річки у Дунаєвецькому районі: село Ріпинці, смт. Смотрич, село Михівка. На берегах річки у Чемеровецькому районі села: Карачківці, Черче, Залуччя. Нижче по течії на берегах Смотричу лежать села Кам'янець-Подільського району: на

північ від Кам'янця-Подільського — Думанів, Киселівка, Великозалісся, Голосків, Пудлівці; на південь від Кам'янця-Подільського — Смотрич, Цибулівка, Зубрівка, Панівці, Шутнівці, Цвіклівці Перші; при впадінні в Дністер — Устя.

Колись Смотрич був могутньою рікою, зараз же русло ріки зменшилось майже удвічі. Навіть ще на початку ХХ століття води Смотрича були дуже чистими. Настільки, що по кольору криги вгадували, звідки її принесло.

На сьогодні факти свідчать про те, що екологічна ситуація річки є досить складною. Основним фактором погіршення ситуації є антропогенне та техногенне навантаження: кар'єрні розробки, нагромадження сміття, ведення сільського господарства на схилах каньйону. Основною проблемою досліджуваної території є ерозія, а саме водна та вітрова ерозії, які у більшості випадків поєднуються і посилюють процеси руйнування.

Численні екологічні дослідження дали змогу виявити велику різноманітність їх прояву: транспортну, зоогенну, агротехнічну, хімічну та техногенну.

Кар'єри є найяскравішим прикладом таких ландшафтних руйнувань. На території Смотрицького каньйону розміщені 3 кар'єри: Пудлівецький та Кубачівський належать до заводу будівельних матеріалів, Зюбрівський – до асфальтного, у користуванні останнього перебуває устаткування, яке одразу переробляє камінь на щебінь. Руйнування порід пришвидшує майже всі види ерозії, особливо дефляцію. Хаотично залишений камінь піддається руйнівному обробленню вітром, дрібні фракції разносяться на значну відстань, внаслідок чого рослинні покриті товстим шаром пилу. Тривале перебування у кар'єрі є небажаним – повітря в цьому районі забруднене пиловими часточками, які ускладнюють дихання. Водній ерозії територія піддається в період найбільш інтенсивних дощів та танення снігів. Через порушення цілісності порід ймовірними також є обвали.

Сумним прикладом є територія села Цибулівка. Більш як 25 років тому відкрито кар'єр з добування будівельного каменю. Зараз береги Смотрича на півкілометровому відрізку зруйновані.

Але останнім часом найбільш небезпечним для стану цієї екосистеми є саме засмічення. Рослини засипають побутовим сміттям, заливають стічними водами, випалюють. Найтипівішим є механічне руйнування екотопів: розкопування земельних ділянок, засаджування хвойних рослин, під покривом яких усі степові види гинуть. Діяльність людини під час використання природного середовища провокує антропогенну (прискорену) ерозію.

Значущою проблемою є сміттєзвалища, спричинені безвідповідальним господарюванням. Такі явища характерні для тих територій, де розташовані населені пункти. Внаслідок гравітаційних процесів сміття зсувається у р. Смотрич, оголюючи незахищений рослинністю чорнозем, де розпочинаються інші види ерозії (водна, вітрова). Наприклад, у районі Жовтневого масиву, Польських і Руських фільварків, Старого міста різними відходами захарашені цілі ділянки каньйону. А це сприяє сильному росту бур'янів, антисанітарії та погіршенню стану довкілля.

На березі р. Смотрич також досі є залишки хімічних складів заводу "Електроприлад". Насичені різними хімічними сполуками ґрунтові шари не були дезактивовані і вивезені з прибережної зони. У межах каньйону відбувається також скидання комунально-побутових та тваринних фекальних стоків від неканалізованих осель, які також призводять до забруднення ґрунтів. На території міської зони відзначено скельне утворення, де ці стоки, вступаючи у взаємодію з вапняковою породою, утворили своєрідні зі жовтуватого-голубим забарвленням сольові потоки.

На схилах р. Смотрич (села Цибулівка, Кубачівка, Татариска, Підзамче, Пудлівці) розробляють городні ділянки не тільки на рівнинних ділянках, але й на крутосхилах, у прирусловій зоні. Населення проводить різноманітні агротехнічні заходи, які призводять до зміни структури ґрунту і провокують руйнування та знесення ґрунтового шару водними потоками, видування вітром.

Зазначимо, що викладачами нашого університету, зокрема кафедри екології, та співробітниками Подільського національного природного парку ведеться значна робота з дослідження екологічного стану довкілля у нашому регіоні, зокрема річок, в тому числі і річки Смотрич. Наведемо частину інформації з таких досліджень. Наведені нижче дані отримано ще на початку ХХІ століття, але нас не цікавить конкретика. За цими даними можна визначити характер дослідження, види показників і, зокрема, порівняти екологічний стан річки Смотрич з іншими річками Поділля.

Показники можна поділити на дві категорії: первинні і гідрохімічні. Первинні оцінки якості води проводились для визначення фізичних та органолептичних властивостей: температура, запах, прозорість, вміст завислих речовини, (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

**Органолептичні властивості води основних річок
НПП “Подільські Товтри”**

Місце відбору проб		Температура, °С	Запах, бал.	Прозорість, м	Завислі речовини (ГДК ≤ 0,25 мг/л)
р. Збруч	сmt. Сатанів	20,0±1,5	1	0,32±0,026	8,6±0,75
р. Збруч	с. Іванківці	19,0±1,2	1	0,30±0,027	9,4±0,82
р. Збруч	с. Романівка	19,8±1,5	1	0,27±0,023	9,7±0,83
р. Збруч	с. Ісаківці	20,0±1,7	1	0,26±0,020	10,2±0,94
р. Дністер	с. Малинівці	18,0±1,4	1	0,26±0,019	10,8±0,87
р. Дністер	с. Устя	20,0±1,5	1	0,27±0,020	12,3±1,10
р. Дністер	сmt. Стара Ущиця	19,0±1,6	1	0,26±0,017	11,0±0,96
р. Жванчик	с. Івахнівці	19,5±1,1	1	0,32±0,025	8,4±0,72
р. Жванчик	сmt. Чемерівці	21,0±1,7	1	0,28±0,023	10,0±0,86
р. Жванчик	с. Жванець	22,0±1,5	1	0,26±0,019	9,5±0,79
р. Смотрич	м. Кам'янець-Подільський	21,0±1,8	1	0,27±0,023	10,5±0,87
р. Смотрич	с. Устя	21,0±1,7	1	0,27±0,021	11,2±0,93
р. Мукша	с. В. Слобода	22,0±1,4	1	0,26±0,018	16,0±1,12
р. Мукша	с. Лисогірка	21,0±1,3	1	0,24±0,016	18,0±1,45
Кугаївецька притока	с. Андріївка	21,5±1,4	1	0,54±0,043	5,3±0,41
Кугаївецька притока	с. Кугаївці	22,0±1,8	1	0,48±0,041	6,2±0,43

Хоча норми, що визначають температуру води, крім Європейського Союзу (<25°C) ніхто не наводить (у рекомендаціях Всесвітньої організації охорони здоров'я сказано лише, що температура води “повинна бути

прийнятною”), але температура води є важливим фактором, від якого залежать фізичні, хімічні, біохімічні та біологічні процеси, що відбуваються у водоймах і безпосередньо впливають на процеси самоочищення.

У результаті підвищення температури води знижується вміст кисню, тоді як потреба у ньому зростає, що призводить до порушення структури рослинних угруповань водойм. Водорості, які характерні для холодної води замінюються на більш теплолюбиві види, виникають сприятливі умови для масового розвитку у водоймах синьо-зелених водоростей – так зване “цвітіння водойм”.

Однією із значних екологічних проблем природних водотоків є нагрівання природних вод під час використання їх для охолодження виробничих процесів. Так, на теплових електростанціях використовують пряму подачу прісної води з малих річок для охолодження, з подальшим поверненням її у водотоки без попереднього охолодження. Наприклад для електростанції потужністю 1000 МВт потрібна водойма площею 810 га з глибиною 8,7 м. Дещо менші за потужністю ТЕС знаходяться у басейнах досліджуваних річок Збруч (м. Сатанів), Жванчик (м. Чемерівці) і Мукша (м. Кам’янець-Подільський), до якої додатково скидаються підігріті води цементного заводу (ВАТ “Подільський цемент”).

Запах води спричинюють леткі речовини, що утворюються в результаті процесів життєдіяльності водних організмів, при біохімічному перетворенні органічних речовин в анаеробних і аеробних умовах, хімічній взаємодії компонентів, що містяться у водоймі, а також надходять зі стічними водами підприємств. Оскільки вид, інтенсивність і стійкість запаху залежить від складу речовин, температури, рН, ступеня забруднення водойм, то інтенсивність запаху в 1 – 2 бали за п’ятибальною шкалою, яка спостерігалася на всіх створах, де проводилась оцінка, свідчить про незначне антропогенне забруднення досліджуваних водойм.

Від прозорості та кольору води залежить кількісний і якісний склад світла, що проникає крізь воду, який є важливою складовою для нормальної життєдіяльності рослин. Прозорість води зменшується зі збільшенням вмісту в

ній завислих речовин, які надходять в водойму внаслідок ерозії русла та схилів (твердий стік), а також потрапляють зі стічними водами промислових та комунальних підприємств.

У холодний період (IV і I квартали) прозорість у середньому, вища, ніж у теплий (II і III квартали), коли розпочинається і триває активна вегетація занурених рослин, і становить від 0,24 м (річка Мукша, с. Лисогірка) до 0,54 м (Кугаївецька притока, с. Андріївка). Прозорість води в досліджуваних річках варіювала в досить вузьких межах і відповідала III і IV класу якості поверхневих вод.

Протягом усього періоду спостережень вода не відповідала гідрофізичним нормативам за вмістом завислих речовин. Причому, спостерігалася позитивна тенденція зменшення концентрації зважених речовин у водотоках, що, безперечно, пов'язано із зменшенням обсягів промислових стоків. Так, в найбільш забруднених за цим показником річках, Мукші (18,0 мг/л; с. Лисогірка) і Дністрі (12,3 мг/л; с. Устя) вміст завислих речовин відповідно у 2,3 і 1,9 разів перевищував це значення в Кугаївецькій притоці (5,3 мг/л; с. Андріївка), де практично відсутній антропогенний вплив. Одночасно, відбувалося зростання вмісту органічних складових завислих речовин.

Наведені характеристики лише опосередковано свідчать про забруднення води, тому необхідно враховувати ще й гідрохімічні показники.

Величина рН води – один з найважливіших показників її якості, від якого залежать хімічні та біологічні процеси у природних водах, розвиток та життєдіяльність водних рослин, сталість різних форм при міграції елементів. Зміна рН води також впливає на процеси перетворення різних форм біогенних елементів, змінює ступінь токсичності забруднюючих речовин. Тому зсув рН води в кислий чи лужний бік повинен привертати увагу до антропогенного забруднення водойми.

Ми обмежимося лише однією таблицею статистичних даних за один рік (табл.2.2). Такі таблиці складаються щорічно, що ще раз підкреслює важливість показника рН води.

Таблиця 2.2

**Показники рН води основних річок
НПІ “Подільські Товтри” (ГДК 6,5-8,5)**

Місце відбору проб		Місяць												Середнє значення
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
р. Збруч	смт. Сатанів	7,0± 0,66				7,0± 0,66				7,1± 0,64				7,0
р. Збруч	с. Іванківці	7,2± 0,67				7,2± 0,67				7,3± 0,69				7,2
р. Збруч	с. Романівка	7,0± 0,66				7,1± 0,65				7,0± 0,63				7,0
р. Збруч	с. Ісаківці		7,1± 0,66				7,2± 0,65				7,2± 0,64			7,2
р. Дністер	с. Малинівці		7,2± 0,63				7,3± 0,54				7,1± 0,59			7,2
р. Дністер	с. Устя		7,1± 0,59				7,2± 0,64				7,1± 0,54			7,1
р. Дністер	смт. Стара Ушиця			8,1± 0,73				8,0± 0,70				7,8± 0,63		7,9
р. Жванчик	с. Івахнівці	7,2± 0,65				7,3± 0,65				7,3± 0,61				7,3
р. Жванчик	смт. Чемерівці	7,2± 0,67				7,2± 0,66				7,1± 0,51				7,2
р. Жванчик	с. Жванець		7,2± 0,68				7,0± 0,60				7,1± 0,65			7,1
р. Смотрич	м. Кам'янець-Подільський				7,0± 0,58				7,0± 0,54				7,1± 0,57	7,0
р. Смотрич	с. Устя		7,3± 0,64				7,1± 0,58				7,2± 0,57			7,2
р. Мукша	с. Велика Слобода				7,1± 0,64				7,2± 0,65				7,2± 0,60	7,2
р. Мукша	с. Лисогірка				7,3± 0,68				7,3± 0,61				7,2± 0,63	7,3
Кугаївецька притока	с. Андріївка	7,4± 0,63					7,5± 0,62				7,5± 0,61			7,5
Кугаївецька притока	с. Кугаївці	7,3± 0,64					7,6± 0,56				7,7± 0,67			7,5

Іншим важливим показником є жорсткість природних вод, яка зумовлена наявністю певних іонів, переважно кальцію і магнію, які знаходяться у вигляді гідрокарбонатів, карбонатів, хлоридів, сульфатів та інших солей. За вмістом розчинених мінеральних речовин (еквівалентним переважанням основних іонів) вода досліджуваних річок інформація заносилася в таблицю, аналогічну до таблиці 2.2.

Зауважимо, що жорсткість поверхневих вод зазнає помітних сезонних коливань, зазвичай досягаючи найбільшого значення наприкінці зими і найменшого – в період повені.

Аналогічно, значення електропровідності природних вод є зручним сумарним індикаторним показником антропогенного впливу, що залежить в основному від концентрації розчинених мінеральних солей (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) і температури. Тут питома електропровідність подається в таблицях, аналогічних до таблиці 2.2.

Аналогічні таблиці склалися також відносно вмісту хлоридів, азотних і інших речовин.

Висновки. Річку Смотрич можна назвати типовим представником малих річок Західної та Центральної України. Річище звивисте. Довжина річки становить 169 кілометрів. Переважна ширина річки 10 — 15 метрів. Враховуючи незначні значення ширини, **достатньо обмежитися одновимірним випадком**, розглядаючи розподіл забруднюючих речовин лише по довжині русла.

У басейні річки Смотрич, як і в більшості малих річок, розташовано декілька ставків. Це зумовлює розглядати **два варіанти моделі** розповсюдження забруднюючої речовини: по течії річки та у стоячій воді.

Живлення річки з притоками переважно снігове та дощове. Течія не швидка і майже стала вздовж усього русла (не беручи до уваги ставки). Долина її густо заселена, що, з однієї сторони, екологічного стану річки є досить актуальним, а з іншого, існує численне забруднення побутовими відходами.

Основним фактором погіршення ситуації є: кар'єрні розробки, нагромадження сміття, ведення сільського господарства на схилах берегів. Отже, **розміщення джерел забруднення носить не точковий, а діапазонний характер.**

Систематичне дослідження екологічного стану Смотрича здійснюється лише в межах каньйону, що входить у заповідну зону Подільських Товтр. Чисельні значення того чи іншого показника забруднення сезонно визначають працівники заповідника «Подільські Товтри» та студенти нашого університету під час польових практик. Їх можна використовувати для уточнення моделі. Це дає підставу про розгляд **перспектив співпраці при дослідженні річки.**

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН У МАЛИХ РІЧКАХ

Концептуальний розгляд моделі поставленої задачі показує, що ми маємо справу з деяким природньо або штучно утвореним на поверхні землі резервуаром заповненим водою, яка піддається певним чином (довільним методом) зміні концентрації однією з фіксованих речовин. Зокрема, актуальною проблемою в усьому світі є забруднення поверхневих і підземних вод сполуками Нітрогену (амонієм, нітритами й, особливо, нітратами).

Зауважимо, що поставлена задача актуальна для будь-яких водоймищ: річок, ставків, озер і навіть колодязів. Наприклад, за 2009–2010 рр. в Україні, причому в різних регіонах, зафіксовані випадки гострого отруєння дітей, віком до одного року, водою із криниць індивідуальних господарств, у якій були виявлені нітрати в кількостях, що перевищували значення допустимих концентрацій, а стічні води із сільськогосподарських полів і тваринницьких ферм та деякі промислові містять у своєму складі багато органічних сполук фосфору.

Для кожного виду сполук дослідження потрібно проводити окремо, так само, як і для кожного окремо взятого водоймища.

Якщо розглядати водоймище як складну систему, де відбувається комплекс біо-фізико-хімічних процесів: забруднення, дифузії, самоочищення, то насамперед важливо знати, який характер має трансформація забруднювальних речовин, тобто одну з тенденцій:

- ✓ забруднення безперервно зростає (нестійкість системи);
- ✓ самоочищення й розведення компенсують надходження забруднювальних речовин (рівновага системи);
- ✓ відбувається зменшення концентрації тієї чи іншої речовини.

Загалом трансформацію забруднювальних речовин у водоймищах можна розглядати як деяку функціональну залежність (функцію)

$$F_j(\vec{S}) = L(F_j(\vec{S}), F_{j+1}(\vec{S}), \dots, F_{j+k}(\vec{S})) , \quad (1)$$

де: $F_j(\vec{S}), F_{j+1}(\vec{S}), \dots, F_{j+k}(\vec{S})$ – деякі вектор-функції у відповідних точках виміру; L – оператор трансформації якості води; \vec{S} – вектор вхідних змінних параметрів.

Розмірність вектор-функцій не обов'язково має просторовий тривимірний характер. Збільшення розмірності вектора в моделі може бути обумовлене зміною відповідного параметру у часовому або іншому вимірі і, навпаки, при дослідженні малих річок шириною та глибиною річки, крім хіба що при наявності ставків, зазвичай ігнорують, незважаючи, наприклад, на те, що течія води біля берегів чи по середині ріки суттєво відрізняється. Не враховують, зазвичай, і температуру води, хоча вона легко піддається вимірюванню і її зміни суттєво впливають на процес трансформації забруднювальних речовин у водоймищі. Ще одним важливим чинником виступають атмосферні явища, але на практиці їх враховувати дуже важко.

Характер перенесення й розщеплення речовин, інших біо-фізико-хімічних процесів визначається оператором L . Отже, математичне моделювання якості води має два етапи:

- визначення адекватної структури оператора L (вигляду рівняння (1));
- розв'язування цього рівняння за різних початкових і граничних умов та змінної функції джерела.

Структуру оператора L звичайно визначають на підставі вивчення фізичних закономірностей екологічних процесів, підтверджених лабораторними дослідженнями якості води. Так, зокрема, дифузію й розклад органічної речовини, що надходить у водоймище, можна описати рівнянням (1) або змоделювати методом Монте-Карло. При цьому натурні дані використовують для порівняння результатів моделювання і даних спостережень або для знаходження коефіцієнтів (ідентифікації) для заданої структури рівняння.

Проте в разі моделювання динаміки багаторічних змін у водоймищах під впливом стічних вод і скидів промислових підприємств простежити причинно – наслідковий зв'язок неможливо, оскільки ще треба враховувати різні фізичні, хімічні, біологічні процеси, які в більшості випадків носять хаотичний характер, тому взагалі не піддаються детальному спостереженню і їх можна виміряти хіба що на короткому інтервалі часу.

Не можна не згадати і про похибки вимірювальної роботи, які можуть звести нанівець процес побудови функціональних залежностей.

Отже, застосування зазначених методів, що описують функціональні закони, часто стає неможливим. У таких випадках застосовують прямі методи моделювання екологічних систем, пов'язані з процесами дифузії, які описуються рівняннями математичної фізики.

В такому випадку для побудови математичної моделі насамперед теоретично визначають у вигляді диференціального оператора процес забруднення водної екосистеми.

На річці Смотрич в районі Кам'янця-Подільського відсутні ставки. Невеличкий шлюз в районі ГЕС біля Старої Фортеці можна не брати до уваги, оскільки ширина річки в цьому місці практично не змінилася. За цієї умови поширення забруднювальних речовин у річках рівняння в частинних похідних має такий вигляд:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial c}{\partial x^2} + \lambda(t, x)C(t, x) - V(t, x) \frac{\partial c}{\partial x} + f(t, x), \quad (2)$$

з крайовими умовами:

$$\begin{aligned} C(t, x_0) &= x_0(t), \\ C(t, x_n) &= x_n(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Тут $C(t, x)$ – концентрація забруднювальної речовини; α – коефіцієнт турбулентної дифузії, м²/с; $V(t, x)$ – швидкість течії, м/с; $\lambda(t, x)$ – величина, що характеризує швидкість розпаду речовини (самоочищення потоку), 1/с; $f(t, x)$ – функція потужності джерела викидів, що лежить у початку координат

$$f(t, x) = \begin{cases} g(t) & \text{при } x = 0; \\ 0 & \text{при } x > 0. \end{cases} \quad (4)$$

Для природних водоймищ властивий період відновлення вод. Відомо, що підземні води відновлюються через 300 років, води в проточних озерах – через 3,5 роки; річкові – через півмісяця. Разом з тим малі річки забруднені значно більше, ніж великі, оскільки вони мають низький потенціал самоочищення. Отже, доданком $\lambda(t, x)C(t, x)$ в співвідношенні (2) можна нехтувати при дослідженні малих річок.

Турбулентна дифузія в значній мірі залежить від конкретної забруднюючої речовини. Наприклад, якщо шматочок цукру опустити на дно склянки з водою і воду не перемішувати, то пройде декілька тижнів, перш ніж розчин стане однорідним. Також вона залежить від характеру течії. Зокрема, якщо зустрічаються різкі перепади води (мініводопади), то швидкість дифузії значно зростає.

Для комп'ютерної реалізації поставленої задачі розіб'ємо ділянку досліджуваного русла ріки $[x_0, x_n]$ на n рівних частин точками $x_k = x_0 + hx_k$, де $h = (x_n - x_0)/n$ і виберемо крок за часом, що дорівнює τ . Зауважимо, що всі частини ділянки річки не обов'язково повинні бути рівними. Для замовника програмного продукту, зазвичай, це не суттєво. Кожна ділянка може характеризуватися власним значенням довжини але тоді дещо ускладниться кодова частина програми.

Відомі різні методи побудови різницевих схем вихідного диференціального оператора залежно від структури розв'язання, неперервності або розривності коефіцієнтів, які дають змогу побудувати різницевий аналог у вигляді співвідношення концентрації речовини забруднення у вузлах схеми (шаблону).

Замінивши в рівнянні (2) похідні частками відношення різниць значень параметрів на кінцях відрізків до довжини відрізків, дістанемо його різницевий аналог:

$$\frac{C_{k,m+1} - C_{k,m}}{\tau} = \alpha \frac{C_{k+1,m} - 2C_{k,m} + C_{k-1,m}}{h^2} - V \frac{C_{k+1,m} - C_{k-1,m}}{2h} + \lambda C_{k,m} + f_{k,m}. \quad (5)$$

Для одержання результатів числового експерименту залишається провести ідентифікацію алгоритму. В нашому випадку задача ідентифікації різницевого рівняння (5) – це знаходження числових значень (оцінок) коефіцієнтів α , V , λ .

Якщо коефіцієнт дифузії α , швидкість перенесення забруднень V ще піддаються оцінці при натурних спостереженнях, то $\lambda(x, t)$ – функція, що характеризує розпад забруднень за рахунок механічних і біологічних перетворень, визначається у природних умовах надто складно. Виходячи з різницевої схеми (5) одновимірного рівняння процесів дифузії, переносу й самоочищення (2), запишемо структуру різницевого оператора у вигляді [3]:

$$C_{k,m+1} = \alpha_{-1}C_{k-1,m} + \alpha_0C_{k,m} + \alpha_1C_{k+1,m} \quad (6)$$

де

$$\alpha_{-1} = \left(\frac{\alpha}{(\Delta x)^2} + \frac{V}{2\Delta x} \right) \tau, \quad \alpha_0 = \left(\frac{1}{\tau} - \frac{2\alpha}{(\Delta x)^2} + \lambda \right) \tau, \quad \alpha_1 = \left(\frac{\alpha}{(\Delta x)^2} - \frac{V}{2\Delta x} \right) \tau. \quad (7)$$

Якщо швидкість течії на модельованому відрізку річки вважати постійною, умови самоочищення також ідентичними, то синхронними вимірюваннями в три моменти часу $t = 0, \tau, 2\tau$ у точках концентрацій $C_{k-1,m}$, $C_{k,m}$, $C_{k+1,m}$ дістанемо матрицю спостережень X та вектор вихідної величини Y :

$$X = \begin{bmatrix} C_{k-1,0} & C_{k,0} & C_{k+1,0} \\ C_{k-1,1} & C_{k,1} & C_{k+1,1} \\ C_{k-1,2} & C_{k,2} & C_{k+1,2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

що дає змогу знайти невідомий вектор $\alpha^T = (\alpha_{-1}, \alpha_0, \alpha_1)$ з системи алгебраїчних рівнянь

$$(X^T X)\alpha = X^T Y. \quad (9)$$

Виходячи з рівнянь (7) за умови відомих значень α^T , можна визначити фізичні параметри: α – коефіцієнт турбулентної дифузії, V – швидкість течії, λ – швидкість розпаду речовини (самоочищення потоку).

Окремо треба ідентифікувати функцію джерела викидів $f(t, x)$, тобто залежність концентрації забруднювальних речовин у початковій точці як функцію викиду стічних вод за час τ , що вимірюється в м^3 ; витрат води точці в

річці, яка вимірюється в м³/с. Якщо швидкість течії або коефіцієнти самоочищення істотно відрізняються на різних ділянках річки, моделі необхідно ідентифікувати для кожної точки (створу) окремо.

Таким чином, для ідентифікації коефіцієнтів моделі, зокрема швидкості розпаду забруднювальних речовини, турбулентної дифузії та швидкості течії річки, необхідно провести збір даних натурних спостережень у k точках річки при трьох послідовних моментах часу. Задавши початкові умови $C_{k,0} = C_0$ та граничну умову $C_{k,m} = C_{k,m+1}$, можемо розрахувати концентрації забруднення в наступні моменти часу $m = 3\tau, 4\tau, 5\tau, \dots$ у визначених точках, що дасть змогу розробити інформаційну систему підтримки прийняття рішень щодо якості води з цієї річки у найближчому майбутньому.

Практично усі малі річки України характеризуються наявністю ставків. Не є виключенням, як зазначено вище, і річка Смотрич.

Попередні формули непридатні для дослідження динаміки зміни концентрації шкідливих речовин при наявності ставків. З іншої сторони, не враховувати їх вплив на екологічні процеси просто неприпустимо. У ставках процесам забруднення шкідливими речовинами протистоїть процес самоочищення, викликаний сукупністю гідродинамічних, біохімічних, хімічних і фізичних процесів, що приводять до зниження концентрації забруднюючих речовин аж до природного рівня.

Для визначення динаміки концентрації забруднюючих речовин у ставках, якщо початкова концентрація солей у ставку була c_0 , а рівень води у ньому не змінюється ($h_1=h_2$), фахівці у галузі математичного моделювання екологічних процесів рекомендують, наприклад, скористаємося формулою

$$c(t) = (c_0 - c_{пр}) \cdot \exp(-kt) + c_{пр},$$

де c_0 , $c(t)$ – концентрація речовини відповідно в початковий момент і в момент часу t ; $c_{пр}$ – природна концентрація речовини; k – коефіцієнт неконсервативності речовини, що характеризує інтенсивність процесу самоочищення.

Висновки. Для кожного виду сполуки дослідження потрібно проводити окремо, так само, як і для кожного окремо взятого водоймища.

Якщо застосування математичних методів, що встановлюють точні функціональні залежності, є неможливим, то застосовують прямі методи моделювання екологічних систем, пов'язані з процесами дифузії, які описуються рівняннями математичної фізики, зокрема, поширення забруднювальних речовин у річках на ділянках, які не містять ставків, описується рівнянням в частинних похідних, що має такий вигляд:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial C}{\partial x^2} + \lambda(t, x)C(t, x) - V(t, x) \frac{\partial C}{\partial x} + f(t, x)$$

з крайовими умовами:

$$C(t, x_0) = x_0(t),$$

$$C(t, x_n) = x_n(t).$$

Для комп'ютерної реалізації поставленої задачі розбиваємо ділянку русла ріки з відомими на її кінцях результатами екологічного вимірювання $[x_0, x_n]$ на n рівних частин точками $x_k = x_0 + hx_k$, де $h = (x_n - x_0)/n$.

Для комп'ютерних розрахунків нам потрібно мати на кінцях ділянки наступні значення:

- концентрації забруднювальної речовини;
- коефіцієнта турбулентної дифузії;
- швидкості течії;
- величину, що характеризує швидкість самоочищення потоку;
- функцію потужності джерела викидів, що лежить у початку координат.

На річці Смотрич, як зазначено у розділі 2, вимірювання проводяться в районі міста Кам'янець-Подільський та селі Устя.

Таблиця 3.1

Показники рН води у річці Смотрич

Місце відбору проб	Концентрація
м. Кам'янець-Подільський	85 мг/л
с. Устя	38 мг/л

Швидкість течії річки Смотрич між цими населеними пунктами у різних місцях русла коливається від 0,2 м/с до 0,6 м/с. У екологічних дослідженнях беруть середнє діапазонне значення (на ділянці 500 м) і вважають, що швидкість течії нашої річки між містом Кам'янець-Подільський та селом Устя є сталою і становить 0,4 м/с. Так само сталим вважають коефіцієнт турбулентної дифузії, що становить 0,5 м²/с. Самоочищення потоку на цій ділянці фактично не відбувається. Воно нівелюється функцією потужності джерел викидів, що носять діапазонний характер. Тому ці величини вважають рівними нулю. Оскільки система стабільна змінна по часу не враховується.

Конкретні числові величини для побудованої моделі є малоістотними. Їх значення важливе лише з позиції адекватності моделі.

Диференціальне рівняння (2) будемо апроксимувати різницевиими рівняннями у вузлах сітки x_i , $i = \overline{0, N-1}$ на шаблоні, визначеному двома точками x_{i+1} , x_{i-1} , виконавши відповідні заміни:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 c(x_i)}{\partial x^2} &= \frac{\frac{\partial c(x_{i+1})}{\partial x} - \frac{\partial c(x_{i-1})}{\partial x}}{h} = \frac{\frac{c(x_{i+1}) - c(x_i)}{h} - \frac{c(x_i) - c(x_{i-1}))}{h}}{h} \\ &= \frac{c(x_{i+1}) - 2c(x_i) + c(x_{i-1}))}{h^2} \\ \frac{\partial c(x_i)}{\partial x} &= \frac{c(x_{i+1}) - c(x_i)}{h}. \end{aligned}$$

Враховуючи екологічну стабільність річки, змінну по часу опускаємо.

Будемо вважати, що довжина русла між містом Кам'янець-Подільський і селом Устя орієнтовно 11 кілометрів (точну відстань ми не змогли знайти). Для одержання результатів комп'ютерного експерименту покладемо $h = 1$. Підставляючи числові значення у формулу (2) з врахування апроксимації, одержимо співвідношення:

$$0 = 0,25 \cdot \frac{c(x_{i+1}) - 2c(x_i) + c(x_{i-1}))}{1} - 0,4 \cdot \frac{c(x_{i+1}) - c(x_i)}{1}$$

або

$$0,15 c(x_{i+1}) - 0,1 c(x_i) + 0,25 c(x_{i-1}) = 0, i = \overline{1, 10}$$

$$c(0) = 85, c(11) = 38.$$

Наша модель звелася до системи 10-ти лінійних рівнянь з 10-ма невідомими, яку можна розв'язати одним з класичних методів. Програмний продукт для одержання результату наведено в додатку.

Одержані результати, в якійсь мірі, є малозначущими, але робити поспішні песимістичні висновки не варто. Це лише перше наближення до побудови ряду екологічних моделей. Воно дозволить, зокрема, уточнити модель.

Цікавою може бути і наступна перспектива. Кожну кілометрову ділянку можна розглядати як окремий діапазон забруднення, тобто як окреме джерело. Тоді ми матимемо десять джерел і можна розглянути оптимізаційну модель пошуку випадкового порушення екологічного балансу в річці наведеного в роботі [38], тобто виявлення випадкового джерела забруднення (наприклад, викинутий у річку предмет, який містить отруйну речовину), що змешить ділянку пошуку цього предмету.

В цьому я вбачаю практичне значення одержаних результатів.

Особливістю цієї задачі лінійного програмування є її велика розмірність і тому для її розв'язання потрібно використовувати чисельні алгоритми орієнтовані на задачі великої розмірності.

Для розв'язання такої багатовимірної задачі оптимального керування системами з частинними похідними необхідно скористатися методами внутрішньої точки [39], які не входять в предмет мого дослідження.

ВИСНОВКИ

Побудовано різницеву схему визначення концентрації забруднювальних речовин у річці для обрахунку динаміки процесу. Розроблено алгоритм визначення фізичних параметрів моделі, що дає змогу на основі експериментальних досліджень розрахувати концентрації забруднення в наступні моменти часу для кожної точки (створу).

Для ідентифікації коефіцієнтів моделі, зокрема швидкості розпаду забруднювальних речовини, турбулентної дифузії та швидкості течії річки, необхідно провести збирання даних натурних спостережень у фіксованих точках річки у послідовні моменти часу. Задавши початкові та граничні умови, можемо розрахувати концентрації забруднення в наступні моменти часу у визначених точках, що дасть змогу розробити інформаційну систему підтримки прийняття рішень щодо якості води з річки у найближчому майбутньому.

Наступним дослідження в цьому напрямку, може служити оптимізаційна задача виявлення місця розташування непередбачуваного джерела забруднення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арсан О. М., Ситник Ю. М., Шаповал Т. М., Кукля І. Г., Пасічна О. О., Магомедова З. Б. Еколого-токсикологічні дослідження внутрішніх водойм міста Києва // Наукові записки Тернопільського державного педагогічного університету ім. Володимира Гнатюка. Серія: Біологія. – № 3 (14). Спеціальний випуск: Гідроекологія. – 2001. – С. 176 – 177.
2. Афанасьєва С. А., Колесник М. П., Давиденко Т. В., Сидерский А. М., Шатохина А. В., Осадчая Н. Н., Цветкова А. М., Фриновская Т. В., Тарасова О. Г., Садовская С. Н. Санитарно-гидробиологическое состояние озер и заливов жилого массива Оболонь г. Киева // Гидроекологические проблемы внутренних водоёмов Украины. – Киев: Наукова думка, 1991. – С. 98 – 109.
3. Афанасьєва С. А. Некоторые принципы и мероприятия по улучшению состояния пойменных водоемов г. Киева // Вода и здоровье – 98. Материалы международной научно-практической конференции. 15 – 18 сентября 1998 г., г. Одесса. – Одесса: Астропринт, 1998. – С. 247 – 277.
4. Афанасьєва С. А. Характеристика гидробиологического состояния разнотиповых озёр г. Киева // Вестник экологии. – 1996. – № 1-2. – С. 112 – 118.
5. Афанасьєва С. А., Цыбульский А. И. Ихтиофауна водоемов рекреационной зоны Киева в устьевой области реки Вита // Экология городов и рекреационных зон. Материалы международной научно-практической конференции. 25-26 июня 1998г., г. Одесса. – Одесса: Астропринт, 1998. – С. 13 – 17.
6. Бейко І. В. Задачі, методи та алгоритми оптимізації / І.В. Бейко, П.М. Зінько, А.Г. Наконечний. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет». 2012. – 799 с.

7. Бейко І.В., Коробко Т.І. Побудова робочої моделі для прогнозування процесів перенесення екологічних забруднень у річкових басейнах // Вісник КНУ Кібернетика, № 3, – 2002, – С.15-16
8. Бурбело М. Й. Математичні задачі електроенергетики. Математичне моделювання електропостачальних систем: навчальний посібник / М. Й. Бурбело. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 185 с.
9. В. А. Барановський к. г. н. В. Г. Бардов д. м. н., член-кореспондент АМН України, С. Т. Омельчук к. м. н. Україна: Екологічні проблеми природних вод, Карту підготовлено до видання Київською військово-картографічною фабрикою в 2000р.
10. Гержук П. І. Екологічне дослідження річки Смотрич // Подільський національний природний парк: доцільність і проблеми створення. — Кам'янець-Подільський, 1993. — С. 34-36.
11. Голиков А.И. Применение метода Ньютона к решению задач линейного программирования большой размерности / А.И. Голиков, Ю.Г. Евтушенко, Н. Моллаверди // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. —2004. — Т. 44. № 9. — С. 1564—1573.
12. ГОСТ 2874-82 “Вода питьевая. Гигиенические требования, контроль за качеством”, ДСанПІН “Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання”, регистрационный № 136/1940 от 15.04.97 г., СанПиН 2.1.4.1074-01
13. Громова О. Ф. Структура сообществ зоопланктона устьевой области р. Вита в рекреационной зоне г. Киева // Экология городов и рекреационных зон. Материалы международной научно-практической конференции. 25 – 26 июня 1998 г., г. Одесса. – Одесса: Астропринт, 1998. – С. 38 – 40.
14. Губонина З.И., Алейник Н.С. Проблемы питьевой водоснабжения г. Дзержинская Новгородской области в сб.: “Экология и жизнь”. 5-й Международная научно практическая конференция, 2002. – Пенза, 2002. – С.112 – 124.

15. Дендюк М.В. Математичне моделювання розповсюдження забруднювальних речовин у річках / М.В. Дендюк, М.Ф. Сало, О.Л. Тарасюк // Науковий вісник НЛТУ України. – 2013. – Вип. 23.16 – С. 370-373.
16. Евтушенко Ю.Г. Применение метода Ньютона к решению задач линейного программирования / Ю.Г. Евтушенко, В.Г. Жадан, А.П. Черенков // Журнал вычислительной математики и математической физики. — Том 35, 1995. — №6. — С. 850–866.
17. Згуровский М. З. Системный анализ: проблемы, методология, приложения / М. З. Згуровский, Н. Д. Панкратова. — К. : Изд-во Наук. думка, 2011. — 728 с.
18. Іваненко О.Г. Математичне моделювання гідроекологічних систем: Навчальний посібник. – Одеса, Вид-во «Екологія», 2006. – 141 с.
19. Калиткин Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин, М. : Наука, 1978. – 512 с.
20. Кашук Л. П. Про екологічну обстановку в Україні та завдання статистики довкілля / Статистичний моніторинг екологічного стану регіону, галузі. Матеріали науково-практичного семінару 16 – 17 грудня 1997 р., м. Житомир. – Житомир-Київ, 1998. – С. 8 – 13.
21. Ковальчук П.І. Моделювання і прогнозування стану навколишнього середовища : навч. посібн. / П.І. Ковальчук. – К. : Вид-во "Либідь". – 2003. – 208 с.
22. Коржик В. П. Басейновий моніторинг в межах великого міста / Урбанізоване навколишнє середовище: охорона природи та здоров'я людини. – Київ, – Том 1. – С. 69 – 72.
23. Литвинов М.А., Дудка И.А., Методы исследования микроскопических грибов пресных и соленых водоемов. – Л: Наука, 1975. – 152с.
24. Мала річка (енциклопедія сучасної України)
https://esu.com.ua/search_articles.php?id=61035

25. Методы экспериментальной микробиологии. Справочник / под ред. В.И. Билай. – Киев: Наукова думка, 1982. – 550с.
26. Мокін Б.В. Новий підхід до моделювання якості води у розгалужених річкових системах з використанням засобів паралельних обчислень / Б.В. Мокін, В.Ю. Булига // Вісник Вінницького політехнічного інституту : зб. наук. праць. – 2011. – № 3. – С. 21-23.
27. Ортега Дж. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений / Дж. Ортега, У. Пул, М. : Наука. 1986. – 288 с.
28. Плигин Ю. В., Щербак В. И., Арсан О. М., Михайленко Л. Е., Матчинская С. Ф., Майстрова Н. В. Влияние поверхностного стока на биоту Каневского водохранилища в районе г. Киева и рекомендации по его очистке // Экология городов и рекреационных зон. Материалы международной научно-практической конференции. 25 – 26 июня 1998 г., г. Одесса. – Одесса: Астропринт, 1998. – С. 272 – 277.
29. Постанова ВР № 214/95-ВР від 06.06.95, ВВР, 1995, № 24, ст. 190.
30. Розміщення водних ресурсів України і їх економічна характеристика <https://works.doklad.ru/view/bYI7csv9Fy8.html>
31. Романенко В. Д. Водные ресурсы Днепра и его экологическое состояние // Гидробиологический журнал. – 1998. – 34, № 2. – С. 3 – 9.
32. Сергиенко И.В. Системный анализ многокомпонентных распределенных систем / И.В. Сергиенко, В.С. Дейнека. – Киев: Наук. думка, 2007. – 639 с.
33. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р.И. Трухаев. – М. : Изд-во "Наука". – 1981. – 257 с.
34. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р.И. Трухаев. – М. : Изд-во "Наука". – 1981. – 257 с.
35. Трухаев Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р.И. Трухаев. – М. : Изд-во "Наука". – 1981. – 257 с.
36. Федорчук І. В. Фітомоніторингові дослідження екологічного стану вод каньйону річки Смотрич. - Збірник наукових праць за підсумками Другої Міжнародної науково-практичної конференції «Кам'янець-Подільський у

- контексті українсько- європейських зав'язків». — Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський державний університет, інформаційно-видавничий відділ. - 2005 — С. 173-176.
- 37.Щепець М. С., Кузьменко М. І., Якушин В. М. Екологія водойм Києва // Вісник аграрної науки. – 1992. – № 7. – С. 45 – 46.
- 38.Щирба О. В. Моделювання дифузійних процесів та його реалізація методом внутрішньої точки / О.В. Щирба // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. – Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет, 2010. – Вип. 3. – С. 213 – 222.
- 39.Щирба О.В. Прикладні аспекти використання алгоритмів розв'язання задач лінійного програмування. // Збірник наукових праць молодих вчених Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. – Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2009. – Випуск 1. – 314 с. 145 – 146

ДОДАТОК

```

Public Sub Gauss()
    Dim i, j, k, l, s, bazisni(10000) As Integer

    'Перетворення матриці
    Dim R As Double
    s = 1
    For i = 1 To m_gauss
        While matrix_Gauss(i, s) = 0 'пошук розв'язуючого елемента
            k = i + 1
            While matrix_Gauss(k, s) = 0 And k <= m_gauss
                k = k + 1
            End While
            If k <= m_gauss Then 'перестановка рядків
                For j = i To n_gauss + 1
                    R = matrix_Gauss(i, j)
                    matrix_Gauss(i, j) = matrix_Gauss(k, j)
                    matrix_Gauss(k, j) = R
                Next
            Else
                s = s + 1 'перехід на наступний стовпець
                If s > n_gauss Then Exit For
            End If
        End While

        R = matrix_Gauss(i, s) 'ділення на розв'язуючий елемент в s-тому стовпці
        For k = s To n_gauss + 1
            matrix_Gauss(i, k) = matrix_Gauss(i, k) / R
        Next
        For j = 1 To m_gauss 'перетворення під i-тим рядком і s-тим стовпцем
            R = matrix_Gauss(j, s)
            If j <> i Then
                For l = s To n_gauss + 1
                    matrix_Gauss(j, l) = matrix_Gauss(j, l) - matrix_Gauss(i, l) * R
                Next
            End If
        Next
        s = s + 1
        If s >= n_gauss + 1 Then Exit For
    Next

    'шукаємо перший знизу рядок з ненулевим вільним членом
    k = m_gauss
    While matrix_Gauss(k, n_gauss + 1) = 0 And k > 0
        k = k - 1
    End While

    If k > 0 Then
        i = n_gauss
        While matrix_Gauss(k, i) = 0 And i > 0
            i = i - 1
        End While

        'система не сумісна
        If i = 0 Then
            MsgBox("система не сумісна")
            End 'вихід з програми
        End If
    End If

    'система однорідна
    For j = 1 To m_gauss

```

```

    x_Gauss(j) = 0
Next
' система має єдиний розв'язок
If k = n_gauss Then
    For j = 1 To m_gauss
        x_Gauss(j) = matrix_Gauss(j, n_gauss + 1)
    Next
Else
' система має безліч розв'язків
For j = m_gauss To 1 Step -1
    s = 1
    While matrix_Gauss(j, s) = 0
        s = s + 1
    End While
    If s <= n_gauss Then
        k = j
        Exit For
    End If

Next
For j = 1 To k
    s = 1
    While matrix_Gauss(j, s) = 0
        s = s + 1
    End While
    bazisni(j) = s
Next
For j = 1 To n_gauss
    x_Gauss(j) = 0.1
Next

Dim ss As Double
For j = 1 To k

    ss = 0
    If bazisni(j) < n_gauss Then
        For i = bazisni(j) + 1 To n_gauss
            ss = ss + x_Gauss(i) * matrix_Gauss(j, i)
        Next
    End If
    x_Gauss(bazisni(j)) = matrix_Gauss(j, n_gauss + 1) - ss
Next
ss = ss
End If
End Sub

```