
Розділ 1. Екологічна безпека

УДК 577.4;556.18 (282.2)

О.С. Волошкіна, д-р техн. наук, проф.

Київський національний університет будівництва і архітектури

МОДЕЛІ І МЕТОДИ ПРОГНОЗУ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

Стаття присвячена обґрунтуванню моделей та методів прогнозу стану річкових басейнів для забезпечення їх достатнім рівнем екологічної безпеки. Наведено системну модель комплексного прогнозу екологічного стану річкових басейнів в залежності від рівня антропогенного навантаження на них, можливості використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та ГІС-технологій для водних об'єктів, гідродинамічну модель гідрографічної мережі в умовах надзвичайних ситуацій, обумовлених аварійними скидами різного походження, математичні моделі режимів руху рідини для оцінки впливу забруднення басейнів річок підземними водами.

Ключові слова: екологічна безпека, математичні моделі, гідродинамічна модель, річкові басейни, забруднення водних об'єктів, прогноз екологічного стану, антропогенне навантаження.

Стан водних об'єктів і водозабірних басейнів України свідчить про те, що подальший розвиток господарства вже неможливий на базі традиційних екстенсивних методів використання водоресурсного потенціалу. Для досягнення балансу між попитом на воду і відновлювальною спроможністю водних ресурсів, забезпечення відповідного рівня екологічної безпеки в річкових басейнах виникає необхідність мати в наявності розвинуту науково-методичну базу прогнозу їх стану.

Сучасні методи прогнозу дають змогу реалізувати тільки окремі варіанти кількісних оцінок рівня антропогенного навантаження на річкові басейни та стосуються вивчення стану поверхневих або підземних вод без врахування їх належної взаємодії. Із існуючих найбільш розповсюджені поширені та ефективні методи прогнозу, які ґрунтуються на реалізації математичних моделей, що базуються на рівняннях математичної фізики та роблять такі прогнози працездатними тільки для окремих локальних ділянок, що розглядаються, через складність їх математичного обґрунтування та розробок.

Питаннями прогнозу стану формування якості водних ресурсів у річкових басейнах в різний час займалися багато вітчизняних та зарубіжних авторів: В.Е. Бруяцький,

Е.В. Єременко, О.Я. Олійник, В.Л. Поляков, В.Б. Мокін, В.С. Кремез, В.І. Лаврик, М.І. Железняк, В.А. Большаков, О.Б. Стелі, W.E. Dobbins, T.R. Camp, E.B. Phelps та ін. Ними зазначено, що моделі трансформації забруднюючих речовин у водотоках можуть розв'язувати тільки певне вузькоспеціальне коло задач, а саме: аналізувати закономірності процесів трансформації забруднюючих речовин; прогнозувати трансформації забруднюючих речовин і їх взаємодії на короткому інтервалі часу і на визначеній ділянці водотоку та використовуватися як математичне забезпечення у складі деяких задач автоматизованого управління.

Проте, якщо ставити задачу довгострокового прогнозу стану річкових басейнів, то, як відмічалось в роботах ряду авторів (П.І. Ковальчук, Є.П. Бочаров, С. Рінальді, А.Б. Качинський, Л.М. Бойчук та ін.), розглянуті методи можуть використовуватися тільки у сукупності з іншими методами, як окремі елементи в складних системах моделювання і прогнозу на базі системного підходу та із залученням новітніх технологій і методів.

Системний підхід в екологічному моделюванні, який направлений на координацію і інтеграцію використання наукових методів, цілісне охоплення явищ, що вивчаються, і в той же час на поглиблення вивчення максимальної кількості факторів в їх взаємодії і взаємозв'язку при вирішенні завдань водокористування розглядався в роботах А.В. Яцика, Б.О. Акішина, П.І. Ковальчука, B.S. Yangell та інших авторів.

Таким чином, на основі проведеного аналізу зроблено висновок, що на сучасному етапі розвитку соціально-економічних відносин в Україні екологічне моделювання повинно, перш за все, задовольняти потреби суспільства в надійних оцінках антропогенного навантаження на водні екосистеми, як в цілому, так і по певних їх підсистемах в рамках басейнового принципу та регіональних особливостей одиниць адміністративного устрою України, а задачу прогнозу екологічного стану річкових басейнів необхідно ставити як задачу середньо- та довгострокових змін параметрів їх стану в умовах сучасних темпів антропогенного тиску на них.

При розробці такого комплексного методу повинна бути застосована система оцінки та прогнозу, в якій виділяється комплекс задач, що властиві окремим підсистемам об'єкту, і яка націлена на досягнення комплексного прогнозу стану басейну в цілому. Базовою моделлю для такого соціо-екологічного прогнозу стану басейну має стати системна модель у вигляді ієрархічної структури зв'язків, де за рівнями декомпозиції вирішуються певні характерні завдання [10]. Метою прогнозуючої системи є виконання двох основних операцій: формування множини альтернатив станів об'єкту прогнозу; вибір і порівняння цих альтернатив.

Треба відзначити, що модель, яка побудована за таким принципом використання нормативно-пошукового прогнозу, базується на теоретичних положеннях, які націлені на вирішення завдання захисної спроможності річкових басейнів та на оцінку допустимої межі антропогенного навантаження на них.

Інформаційні моделі, які синтезуються за допомогою космічних знімків високої роздільної здатності та електронних карт місцевості і включають цифрові моделі її рельєфу, набувають останнім часом все більшого застосування.

Моделі регіонального рівня, що містять картографічні зображення водних об'єктів і джерел їх забруднення і які синтезовані за допомогою даних космічного моніторингу в поєднанні з ГІС-технологіями, розглянуто в роботах В.А. Петросова, С.О. Довгого, О.М. Трофимчука, Г.Я. Красовського, О.Д. Федоровського, В.І. Лялька, Л.Д. Грекова та інших авторів. Вони, у свою чергу, дозволяють користувачу встановити принципово нові закономірності, зв'язки і характеристики організації водокористування в регіоні та подальшого розвитку досліджень стосовно проблеми їх практичного застосування для оцінок і прогнозу якості вод в річкових басейнах в системах прийняття управлінських рішень на регіональному та об'єктному рівнях.

Головна мета таких досліджень – забезпечення підтримки прийняття ефективних управлінських рішень, пов'язаних з реалізацією функцій питного та технічного водопостачання на регіональному рівні, а також управління надзвичайними ситуаціями в річкових басейнах.

Технологія застосування космічних знімків високої роздільної здатності складається з трьох етапів: збір даних, обробка даних і екологічне моделювання на основі отриманої бази даних, яка постійно оновлюється. Засобами Arc View синтезуються моделі техногенного навантаження на поверхневі води. Відповідні ГІС впроваджуються у природоохоронні органи, що дає змогу оптимізувати управління природокористуванням і ресурсами та забезпечити підтримку управлінських рішень на обласному рівні. Ефект від впровадження полягає в підвищенні оперативності і достовірності даних для екологічних експертиз існуючих та розробки нових природоохоронних програм вказаних областей. Тематичні карти як індикатори довкілля входять до складу відповідної ГІС.

Для кожного джерела забруднення поверхневих вод, як постійно діючого, так і того, що має потенційну загрозу аварійних або надзвичайних ситуацій, у відповідних файлах зберігається інформація, яка описує їх із заданим ступенем повноти. Вона дозволяє спостерігати всі зміни кожного об'єкту у часі і дає можливість моделювати їх сукупний вклад при прогнозуванні поверхневих вод на будь-якій ділянці гідрографічної мережі області. Цей вклад необхідно розглядати на фоні впливу на еколого-санітарний стан водних об'єктів стоку з поверхневих водозборів.

Оцінити складову забруднень, які надходять у водойми з поверхневим стоком, досить складно. Якщо організовані джерела можна описати точною математичною моделлю, то для неорганізованих або дифузних джерел забруднення необхідна та чи інша статистична модель.

З метою оперативного управління якістю водних ресурсів необхідно мати об'єктивну інформацію, що характеризує вказані локальне та площадне розміщення дифузних джерел забруднення водних об'єктів, до яких зазвичай відносять різні ділянки водозбору, поверхневий стік з яких надходить у водний об'єкт. Ідентифікація дифузних джерел виконується спеціальними алгоритмами обробки космічних знімків високої роздільної здатності, котрими синтезуються тематичні картографічні моделі.

Інформативність таких картографічних моделей достатня для вирішення наступних завдань: дати порівняльну оцінку потенційної здатності різних ділянок водозбору «віддачі» з поверхневим стоком забруднюючої речовини; визначити координати водотоків, що впадають у водний об'єкт при формуванні поверхневого стоку, а також контури відповідних водозборів; в межах виділених водозборів ранжувати сільськогосподарські підприємства та ділянки їх земельного фонду за ступенем впливу поверхневого стоку, що формується на них; отримати оцінки ефективності окремих ділянок водоохоронних зон, а також заходів, спрямованих на зниження рівня забруднення водних об'єктів поверхневим стоком; за критерієм мінімізації кількості забруднюючих речовин, що надходять у водний об'єкт з поверхневим стоком, призначити оптимальну локалізацію ділянок поверхневого водозбору для проведення першочергового комплексу водоохоронних заходів; рекомендувати оптимальний комплекс заходів щодо перехоплення талих та дощових вод для окремої ділянки поверхневого водозбору; виділити водні об'єкти або їх ділянки, що зазнають додаткового навантаження біогенними речовинами від окремих промислових і сільськогосподарських об'єктів.

Розвиток процесів водної ерозії ґрунтів характеризується картосхемами ерозійних зсувів та змитості. При практичних застосуваннях до цих схем ставиться досить широкий спектр вимог, головні з яких полягають в ступені необхідної деталізації та оперативності. Загальна схема визначення дифузних джерел забруднення поверхневих вод зводиться до оконтурювання ділянок поверхневого водозбору з квазіоднорідними характеристиками ерозійної стабільності ґрунтів, розрахунку кількості ґрунту, що змивається в середньому за рік з оконтуреної території, та визначенню тієї частки, яка надходить безпосередньо до водних об'єктів [1, 3].

Використовуючи картографічні моделі, можна вибрати оптимальну інженерну схему розміщення захисних споруд, дати оцінку розподілу навантаження на річкові басейни твердим стоком, біогенними речовинами та залишками агрохімікатів.

Проведені дослідження в ІТГП НАНУ, ДНВЦ «Природа», Національному космічному агентстві України та ряді наукових та науково-виробничих установ щодо практичного застосування методів дистанційного зондування з космосу дали змогу суттєво підвищити ефективність управління водокористуванням у регіонах України.

Методика прогнозу стану річкових басейнів залежно від рівня антропогенного навантаження на них відповідно до басейново-галузевих принципів водокористування розроблена в НДІ водогосподарсько-екологічних проблем. Методика прогнозу заснована на оцінці якісних та кількісних аспектів господарської діяльності в межах річкового басейну, встановленні існуючих закономірностей в окремих підсистемах та їх формалізації (рис. 1). Але цей прогноз в басейнах річок носить середньо- та довготерміновий характер.

Але дуже часто ми маємо ситуацію, коли внаслідок аварії або надзвичайної ситуації в річковому басейні постає потреба у визначенні розповсюдження забруднюючих речовин в річковому потоці та оцінці розмірів їх впливу за досить короткий проміжок часу.

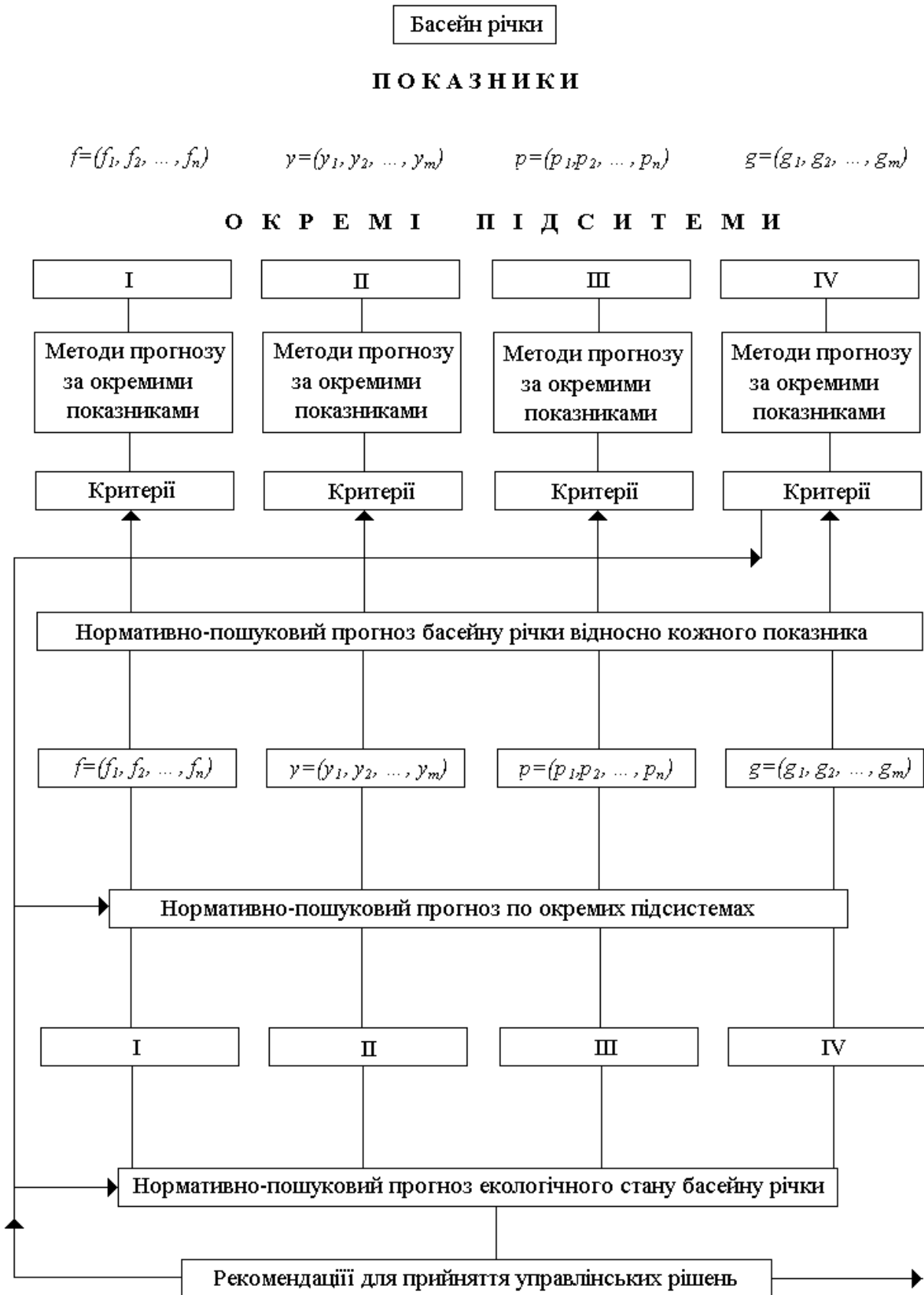


Рис. 1 – Блок-схема системи розрахунку антропогенного навантаження на басейн річки та прогнозу його стану

Аварійні скиди стічних вод, які містять велику кількість забруднюючих речовин, можуть у певних умовах скласти серйозну загрозу для екосистеми річки. Математична модель, яка дозволяє оцінити динаміку забруднення річок у часі, складається з двох взаємопов'язаних блоків – гідродинамічного і динаміки розповсюдження забруднень у водному середовищі. Гідродинамічний блок складається із відомої системи рівнянь Сен-Венана, записаних для нестационарного руху рідини у відкритих руслах (Ж.А. Кюнж, Ф.М. Холлі, А. Вервей).

$$b \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

де x – незалежна змінна по довжині русла; t – час; $Q(x,t)$ – витрати води у руслі; $y(x,t)$ – відмітка глибини води у руслі; $q(x,t)$ – розподілений боковий приток; A – площа живого перерізу; $b(y)$ – ширина потоку по вільній поверхні води; S_f – ухил тертя; g – прискорення вільного падіння; $\alpha(y)$ – коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкості по поперечному перерізу.

Блок динаміки розповсюдження забруднення складається із рівняння транспорту і балансу, записаного відносно масової концентрації консервативних домішок та процесів турбулентної дифузії:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (QC) + f(x,t) \quad (3)$$

де $C(x,t)$ – масове осереднення по поперечному перерізу концентрацій забруднювачів; $D(x)$ – коефіцієнт турбулентної дифузії (коефіцієнт поздовжньої дисперсії); функція $f(x, t)$ – характеризує розподілені та зосереджені джерела забруднення.

Для визначення дефіциту розчиненого кисню у воді рівняння транспорту запишеться дещо у іншому вигляді, де замість концентрації C береться різниця між фоновією та реальною концентраціями кисню, що спостерігається. Необхідність таких розрахунків виникає у випадку, коли найбільша загроза для екосистеми річки полягає не стільки у збільшенні концентрації забруднюючих речовин, скільки у погіршенні кисневого режиму річки.

Процес розрахунку транспорту забруднень проходить у два етапи. На першому етапі розраховуються витрати води в руслі та глибина, на другому – обчислюються концентрації забруднень.

Програмний розрахунковий комплекс по цих рівняннях носить модульну структуру і може бути адаптований до конкретних умов і видів забруднювачів.

Для визначення забруднення річок підземним стоком у районах хвостосховищ та складування твердих побутових відходів застосовується рівняння усталеної фільтрації, яке у загальній формі має вигляд:

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right) = f(x, y, z) \quad (4)$$

де h – напір ґрунтових вод; k – коефіцієнт фільтрації ґрунту.

Дана модель дає змогу запропонувати розв’язки інженерних задач із врахуванням руху води в ґрунті при повному та неповному вологонасиченні. Так, на основі цієї моделі здійснено розрахунок виносу забруднення за запропонованою методикою комунальних очисних споруд Канівського р-ну Черкаської обл. (В.С. Дейнека, О.С. Волошкіна).

Геометрична область розбивалася на 28 зон відповідно до фізичних властивостей ґрунтів. У вологоненасиченій зоні коефіцієнт фільтрації обчислювався за формулою (В.І. Аравін, С.М. Нумеров):

$$k(Q) = k \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_{II} - \theta_0} \right)^{3,5} \quad (5)$$

де $\theta = \theta_0 + (\theta_{II} - \theta_0) e^{\frac{\varphi}{1,5}}$, $\varphi = \frac{P}{\rho q} P$, p – тиск і щільність рідини; q – прискорення вільного падіння; $\theta_0 = 0,25$, $\theta_{II} = 0,48$, коефіцієнт k приймався рівним коефіцієнту фільтрації відповідно до кожної зони. “Ґрунтово-рослинний” шар, потужність якого 0,4–0,6 м, задавався як тонке включення.

На тонкому включенні задавалися умови спряжіння виду:

$$\left\{ \sum_{l=1}^2 k_1 \frac{\partial h}{\partial x_1} \cos(n, x_1) \right\}^- = \left\{ \sum_{l=1}^2 k_1 \frac{\partial h}{\partial x_1} \cos(n, x_1) \right\}^+ = r[h] \quad (6)$$

де h – напір; $r = \frac{k_0}{d}$, k_0 – коефіцієнт фільтрації включення товщини d .

На ділянці височування задавалися умови першого і другого роду при $k = 0,75$, $d = 0,6$, $r = 1,25$ і розбитті області на 1 676 трикутних елементи.

Розв’язок стаціонарної задачі притоку ґрунтових вод у Кременчуцьке водосховище з очисних споруд Канівського р-ну (с. Пекарі) дав змогу зробити висновок, що забруднення у водосховище поширюється через ґрунтові води.

Відсутність технологій захисту ґрунтових вод на звалищах відходів провокує інтенсивне забруднення першого водоносного горизонту продуктами деструкції відходів.

На стадії проектування для обґрунтування вибору раціональних типів захисних екранів залежно від складу ґрунтів, гідрологічних умов, динаміки підземних вод виникає необхідність у кількісній оцінці фільтраційних витрат через ці захисні екрани.

Розв’язок інженерної задачі визначення витрат напору при проходженні фільтраційного потоку через екран проводиться за допомогою методики визначення витрат з облицьованих споруд в умовах підірної фільтрації, що встановилася, з використанням методу фільтраційних опорів (МФО).

Слід зазначити, що наведені дослідження, які пов'язані з визначенням процесів формування кількості і якості водних ресурсів в рамках басейнового принципу та регіональних особливостей одиниць адміністративного устрою України, мають важливе народногосподарське значення для функціонування та подальшого розвитку водних екосистем в Україні та забезпечення достатнього рівня існування та екологічної безпеки річкових басейнів.

Реалізація наведених моделей та методів різними математичними методами із залученням існуючих дослідних даних спостережень на реальних об'єктах дозволить створити надійну розрахункову базу в системі управління природокористуванням на державному, регіональному та об'єктовому рівнях.

Список використаної літератури

1. Волошкіна О.С., Красовський Г.Я. Інформаційні моделі космічного моніторингу водних екосистем // зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Е. Жуковського "ХАИ": "Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии". – Х., 2002. – Вип. 15. – С. 29–46.
2. Волошкіна О.С. Сучасні підходи до реалізації системи моніторингу поверхневих вод // Наук. вісн. буд. – Харків: ХДТУБА, 2003. – Вип. 20. – С. 129–134.
3. Волошкіна О.С., Красовський Г.Я., Трофимчук О.М. Картографічна модель дифузних джерел забруднення водних об'єктів // Зб. наукових праць «Екологія і ресурси». – К.: УІНСіР, 2002. – № 4. – С. 94–100.
4. Методика по розрахунку антропогенного навантаження і класифікації екологічного стану басейнів малих річок України / УНДІВЕЛ, 2-ге видання перероблене та доповнене. – К.: Полімед, 2007. – 71 с.
5. Василенко С.Л., Оленюк М.И. Моделирование качества воды в водотоках. – Харьков: Основа, 2006. – 232 с.
6. Лаврик В.І. Методи математичного моделювання в екології. – К.: Фітосоціоцентр, 1998. – 131 с.
7. Мокін В.Б., Мокін Б.І. Математичні моделі та програми для оцінювання якості річкових вод. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 152 с.
8. Системный подход к управлению водными ресурсами / Под ред. А. Бисваса: Пер. с англ. – М.: Наука, 1985. – 392 с.
9. Mannocchi F., Todisco F., Casadei S. An integrated model for water resources management at basin level // IAHS Publ. – № 268.– P. 215–222.
10. Yatsyk A., Kovaltchuk P., Voloshkina O., Petruk O. Prognosing of the ecological situation in the river basins on the ground of the system modeling // XVIIIth Conference of the Danube Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Dases of Water Management, dfnd19/2 – Graz, 1996. – P. 149–152.

Стаття надійшла до редакції 10.07.14 українською мовою

© Е.С. Волошкина

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Статья посвящена обоснованию моделей и методов прогноза состояния речных бассейнов для обеспечения их достаточным уровнем экологической безопасности. Приведена системная модель комплексного прогноза экологического состояния речных бассейнов в зависимости от уровня антропогенной нагрузки на них, использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и ГИС-технологий для водных объектов, гидродинамическая модель гидрографической сети в условиях чрезвычайных ситуаций, обусловленных аварийными сбросами различного происхождения, математические модели режимов движения жидкости для оценки влияния загрязнения бассейнов рек подземными водами.

© O.S. Voloshkina

MODELS AND METHODS FOR PREDICTION OF WATER POLLUTION

The papers deal with the scientific study and development of reliable and refined models and engineering calculation's methods of ecological state of river basins in Ukraine assessment and prediction as aim for ecological safety of territories and aquatories. The system's prediction's model of complex assessment and prediction of river basins state for difference anthropogenic loads was resulted; the maps informatics models with using of remote aerospace investigations and GIS-technology. The hydrodynamic model of hydrography net from municipal, industry and agricultural enterprises under abnormal conditions was developed; of groundwater pollution the method of calculation of work assessment of lining structure in the area of settling tank and waste dumps were worked out.