

Потенційні фактори регіонального розвитку небезпечних геофільтраційних процесів водокористування у басейнах підземних вод України


Євгеній Яковлев¹

д. тех. н., відділ досліджень навколишнього середовища,

¹ Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна,
e-mail: igorudalov8@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-6562-4015>;

Ігор Удалов²

д. геол. н., професор, кафедра фундаментальної та прикладної геології,

² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна,
e-mail: igorudalov8@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-3844-6481>

Стаття присвячена потенційним факторам регіонального розвитку небезпечних геофільтраційних процесів при використанні підземних вод питної якості в Україні. Оцінено, що більшість поверхневих джерел внаслідок військових дій та техногенезу класифікуються як забруднені і брудні (IV, V клас якості), тому перехід на підземні джерела є безальтернативним. В статті виконано аналіз екологічного стану підземних вод питної якості. Обґрунтовано додаткові критерії сталого підземного господарсько-питного водопостачання. Проаналізовані дані моніторингу стану підземних водозаборів України свідчать, що їх довгострокова експлуатація супроводжується розвитком комплексу небезпечних літодинамічних процесів (НЛДП), що мають гідрогеофільтраційне походження. В статті виділено 3 провідних еколого-гідрогеологічних НЛДП: дифузія мінералізованих порових розчинів із слабопроникних шарів у експлуатаційні горизонти, фільтраційна компресія водоносних комплексів і суфозійний перенос водоносних порід з локальним зменшенням їх об'єму та, як наслідок, провальними осіданнями земної поверхні. В роботі зроблено висновок, що при будь-якій схемі формування депресійної лійки дифузійно-конвективний рух солей і мікрокомпонентів із порових розчинів слабопроникного (розділяючого або водотривкого) шару є стабільним просторово-часовим фактором впливу на гідрогеохімічний склад вод експлуатаційних водоносних горизонтів. За результатами досліджень найбільш суттєвою є фільтраційна компресія водоносного горизонту, яка спостерігається при зниженнях рівня на десятки метрів і більше при переважно піщано-пиловатому складі водонасиченого породного масиву. Крім того, в загальному плані величина осідання земної поверхні корелюється зі зниженням рівня в експлуатаційному водоносному горизонті і в більшості випадків складає 1,0-2,5 % його величини. Встановлено, що основними факторами розвитку процесів суфозії, фільтраційної компресії та деформацій земної поверхні в межах депресійної лійки за умови активного підземного водовідбору є: перше - наявність пухких порід – глини, суглинків, супісків, пісків, алевритів, лесів у геологічному розрізі зони активного водообміну (ЗАВ); друге - гранулярна неоднорідність пухких відкладів та більш щільних порід, що їх підстилають в межах ЗАВ (або наявність в них порожнин) – пісковиків, вапняків, мергелів, черепашників, сланців; третє - вертикальна циркуляція підземних вод, що сприяє низхідній міграції пилово-глиняних часток у експлуатаційні підземні водоносні горизонти.

Ключові слова: водоносний горизонт, техногенез, суфозія, фільтраційна компресія, якість підземних вод.

Як цитувати: Яковлев Євгеній. Потенційні фактори регіонального розвитку небезпечних геофільтраційних процесів водокористування у басейнах підземних вод України / Євгеній Яковлев, Ігор Удалов // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 60. – С. 109-123. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-08>

In cites: Yakovliev Yevhenii, Udalov Ihor (2024). Potential factors of regional development of dangerous geofiltration processes of water use in underground water basins of Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (60), 109-123. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-08> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. За рівнем раціонального використання та якості поверхневих і підземних водних ресурсів, включаючи діючі очисні споруди, Україна, за даними ЮНЕСКО, серед 122 країн світу посідає 95 місце. Такий стан водно-ресурсного потенціалу країни обумовлює, перед усім, великі труднощі у розв'язанні проблеми безпеки питного водопостачання, особливо якою в Україні є 75 % забезпечення з поверхневих джерел. Виконані дослідження свідчать [1, 2], що більшість поверхневих водних ресурсів за умови зростаючого впливу техногенезу, глобальних змін клімату (ГЗК) (потепління, нерівномірність опадів і ін.) та наслідків російської агресії (військові викиди забруднень, гео-

хімічне забруднення водозбірних ландшафтів, руйнування очисних споруд та ін.) класифікується як забруднена і брудна (IV, V клас якості). Як наслідок, за якістю вони не відповідають технологічній спроможності діючих систем водопідготовки (одно-двоступеневе очищення). Крім того, поверхнева гідросфера України має аномальне зарегулювання поверхневих водних об'єктів (більше 70 %) внаслідок будівництва 1160 водосховищ та 52 тис. ставків, що за умови критичного уповільнення водообміну суттєво підсилює негативний вплив ГЗК.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В статті виконано порівняння сучасних підходів в оцінці вразливості ґрунтів до суфозії. Суфозія

як явище характеризується тим, що дрібні фракції можуть рухатися всередині ґрунтового скелета. На практиці автори оцінюють вразливість ґрунтів до суфозії в два етапи. Спочатку аналізується геометрична можливість тонкого руху. Якщо частинки ґрунту рухливі, гідравлічні умови стають у центрі уваги як сила, що приводить в дію ці процеси. У статті автори зосереджуються на геометричних критеріях, які використовуються в сучасній практиці інженерно-геологічного проектування. На додаток автори використовують статистичні та стохастичні методи.

Внутрішня ерозія (або суфозія) структур ґрунту є важливою проблемою для вивчення і розуміння процесів, що виникають при довготривалій експлуатації земляних конструкцій, які знаходяться під впливом надмірного обводнення або інфільтрації вод. При суфозії пористість ґрунтів збільшуються, а об'ємна щільність зменшується. Наслідками цього є зниження стійкості ґрунтів до зовнішнього навантаження, просідання, а також значна зміна стану порового тиску [10]. Залежно від місця, де може виникнути суфозія Ziems [34] виділяє три її типи: внутрішня суфозія, зовнішня суфозія та контактна суфозія. Відзначено, що механіка процесу дуже схожа. Основна увага в цій статті зосереджена на явищі внутрішньої суфозії.

Внутрішня суфозія, як локальне явище, може бути просторово обмежена. Існує можливість, коли рухливість дрібних фракцій буде знижуватися залежно від розміру частинок і гідродинамічних сил (кольматація). Більшість дослідників, які зосереджуються на суфозійних ґрунтах, мотивовані на створення сумішевих фільтрів у насипних дамбах. Тому вони працювали над розробкою оптимальних співвідношень сумішей. Концепція досліджень була в напрямку створення ґрунтів з мінімальною пористістю. Для цього використовувався досвід розробки бетонних сумішей.

Проблема, яка розглядається в статті для світу не нова. Особливу важливість вона має для Китаю. Китайські учені із кількох місцевих університетів дослідили 82 міста, зокрема мегаполіси з населенням понад 2 мільйони осіб. Автори використовували супутникові дані для вимірювання вертикальних рухів суші по всій території Китаю.

У своїй роботі вчені проаналізували період з 2015 по 2022 рік, і змогли визначити, що майже половина (45 %) міських територій просідають більш ніж на 3 мм на рік. Близько 16 % міст зовсім просідають із жахливою швидкістю – близько 10 мм на рік.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Аналіз екологічного стану

підземних вод питної якості в Україні виконаний авторами в попередніх дослідженнях дозволив виділити і обґрунтувати додаткові критерії сталого підземного господарсько-питного водопостачання.

Ресурси підземних вод України складають 22,5 млрд. м³, з яких 70 % припадає на захищені або умовно захищені артезіанські води питної якості [1-3], (рис. 1, 2, табл. 1).

Підвищений потенціал захищеності водоносних горизонтів від техногенного забруднення формує значні резерви безпечного еколого-технологічного розвитку систем господарсько-питного водопостачання, особливо в регіонах комплексного забруднення річкових вод (Донбас, Причорномор'я, Приазов'я та ін.).

В той же час, аналіз даних моніторингу підземних водозаборів засвідчив, що їх довгострокова експлуатація супроводжується розвитком комплексу небезпечних літодинамічних процесів (НЛДП), що мають гідрогеофільтраційне походження при експлуатації водозабірних (дренажних) споруд. Виконані дослідження фахівцями Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору (ІТГП) НАН України дозволили виділити 3 провідні еколого-гідрогеологічні НЛДП: дифузія мінералізованих порових розчинів із слабо проникних (водотривких) шарів у експлуатаційні горизонти, фільтраційна компресія водоносних комплексів і суфозійний перенос водоносних порід з локальним зменшенням їх об'єму та місцевими (провальними) просіданнями земної поверхні.

Метою статті є аналіз потенційних факторів регіонального розвитку небезпечних геофільтраційних процесів у басейнах підземних вод України при довгостроковому водокористуванні.

Виконана авторами систематизація НЛДП водокористування у басейнах підземних вод України, дозволила виділити 3 процеси, на які майже не звертали уваги: 1). дифузія мінералізованих порових розчинів із слабопроникних (водотривких) шарів у експлуатаційні водоносні горизонти; 2). фільтраційна компресія водоносних горизонтів під впливом тривалих відкачок підземних вод; 3) фільтраційна суфозія. Розглянемо кожен з цих процесів.

Зниження рівня підземних вод в експлуатаційному горизонті, прилеглих слабопроникних (розділяючих) шарах або водотривах (різного ступеня досконалості за розділяючою здатністю проникністю) та суміжних водоносних горизонтів є основними факторами техногенезу гідрогеофільтраційної системи (ГГФС) в зоні впливу водозабору [2-5].

У спрощеному вигляді фоновий напружений стан ГГФС в елементарному елементі експлуата-

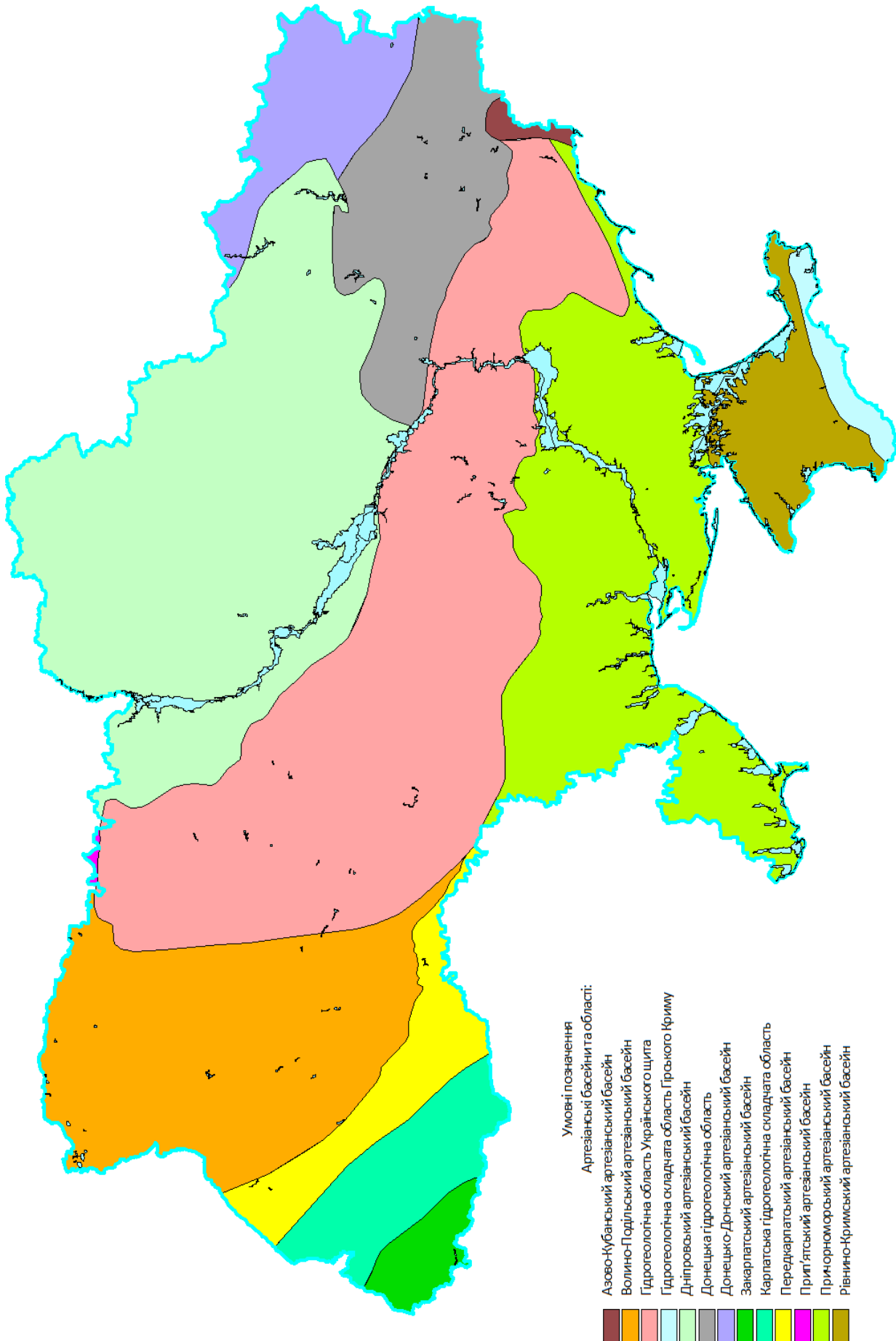


Рис. 1. Карта гідрогеологічного районування території України (артезіанські басейни та гідрогеологічні області) /
Fig. 1. Map of hydrogeological zoning of the territory of Ukraine (artesian basins and hydrogeological regions)

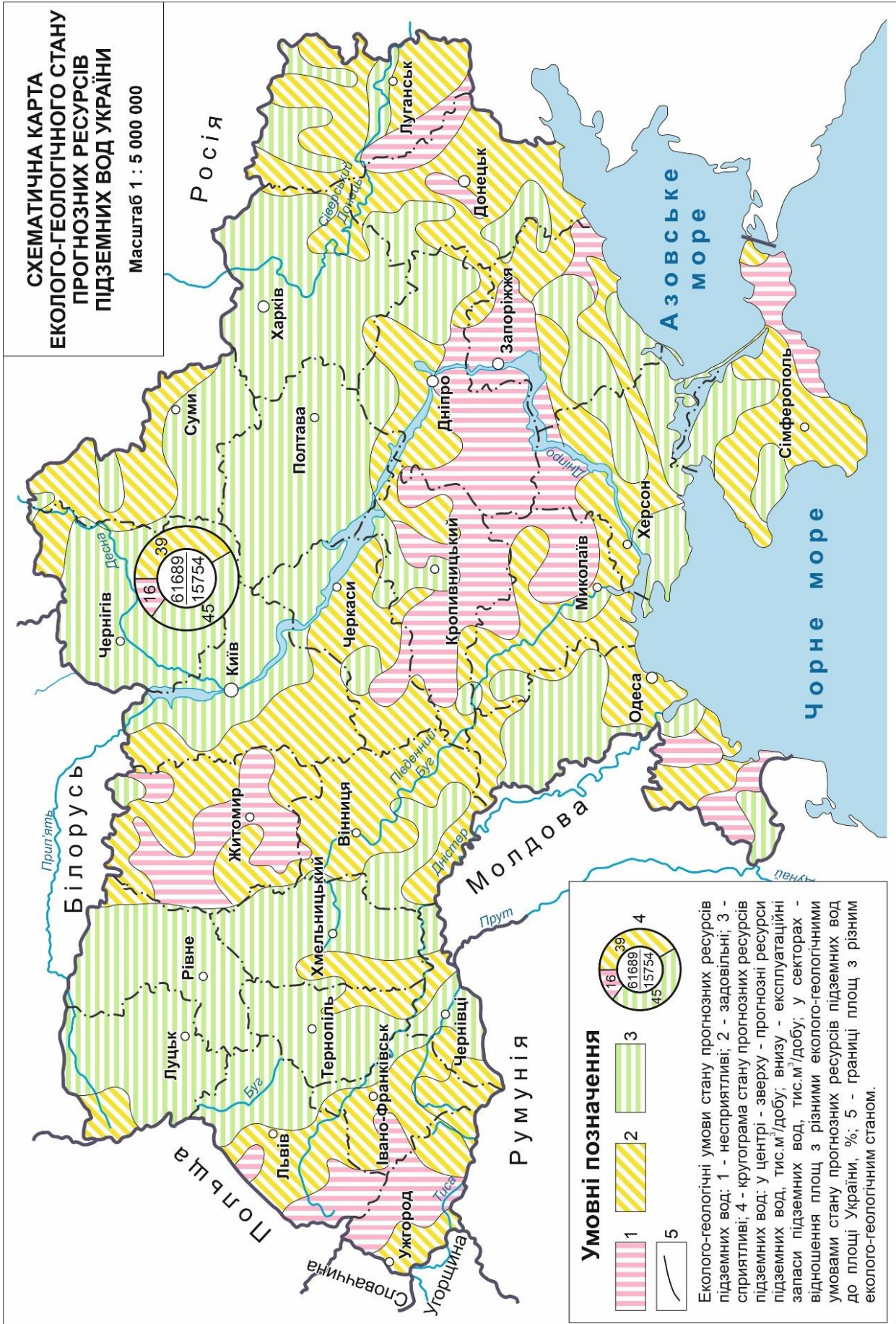


Рис. 2. Схематична карта еколого-геологічного стану прогностичних ресурсів підземних вод України (джерело: Державна служба геології та надр України, 2000 р.) / Fig. 2. Schematic map of the ecological and geological state of forecast underground water resources of Ukraine (Source: State Geology and Subsoil Service of Ukraine, 2000)

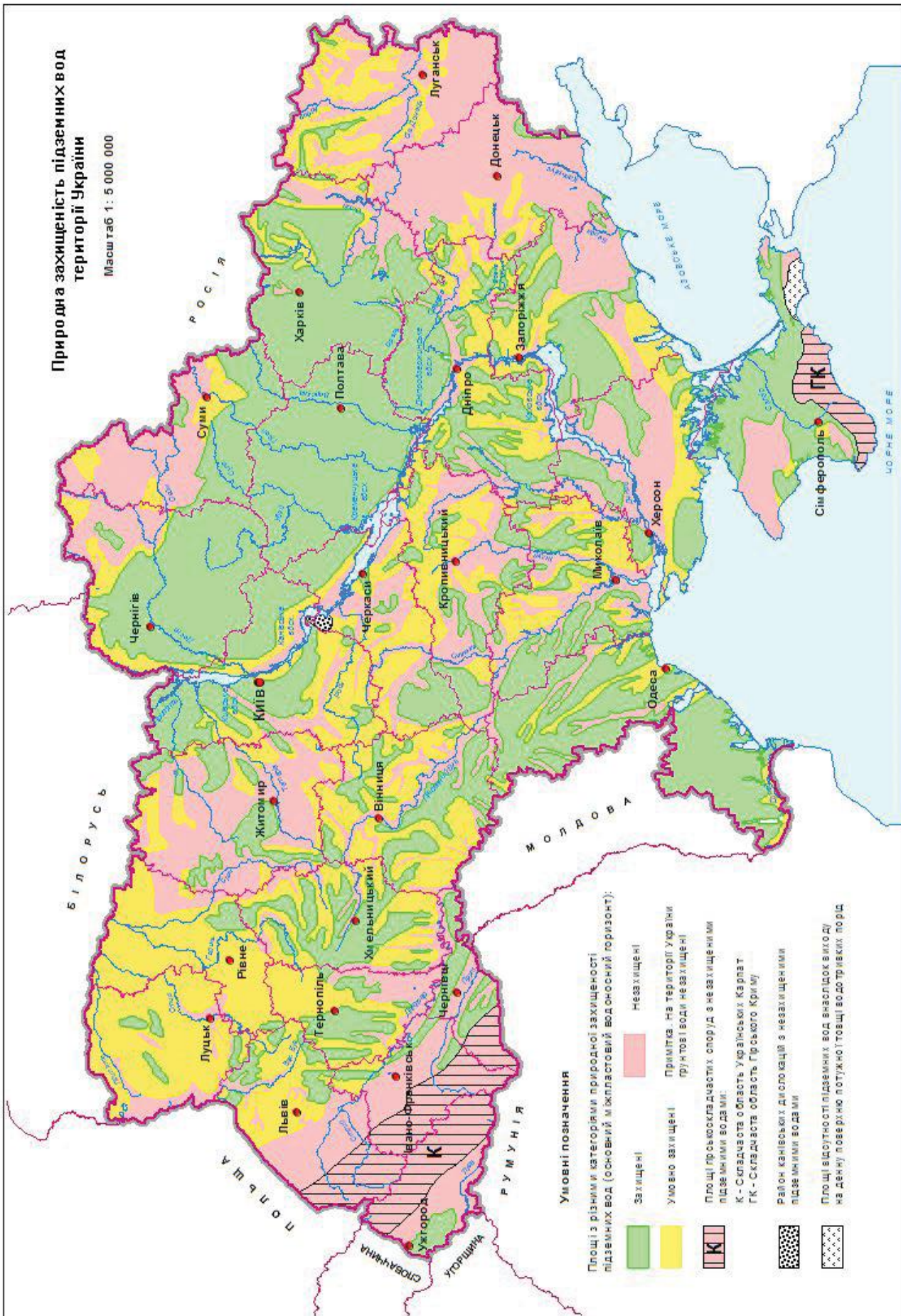


Рис. 3. Схематична карта природної захищеності підземних вод території України /
Fig. 3. Schematic map of the natural protection of underground waters of the territory of Ukraine

Регіональний розподіл ресурсів підземних вод питної якості (станом на 01.01.2000 р.) /
Regional distribution of groundwater resources of drinking quality (as of January 1, 2000)

Область	Підземні води, тис. м ³ /добу		
	Прогнозні	Розвідані	Використані $Q_{\text{під}}$
Вінницька	885,5	147,5	181,9
Волинська	2586,3	340,2	309,8
Дніпропетровська	1092,6	693,0	223,7
Донецька	2464,0	1069,1	558,3
Житомирська	628,6	205,8	233,8
Закарпатська	1081,6	339,3	216,7
Запорізька	1550,7	325,7	312,7
Івано-Франківська	754,4	273,3	198,0
Київська	4215,3	1959,0	637,5
Кіровоградська	404,6	218,7	270,8
Луганська	4790,0	1792,3	1416,5
Львівська	3644,1	1323,3	941,7
Миколаївська	441,6	79,3	236,2
Одеська	736,7	340,9	419,8
Полтавська	4288,9	807,0	408,7
Рівненська	3602,5	459,3	325,8
Сумська	3432,2	577,8	368,7
Тернопільська	2206,0	262,8	307,3
Харківська	4109,8	1031,8	431,6
Херсонська	4970,8	923,3	1075,4
Хмельницька	1963,7	435,5	327,8
Черкаська	1806,5	291,1	301,1
Чернігівська	8326,7	514,8	341,0
Чернівецька	405,3	171,0	104,3
АР Крим	1300,8	1153,4	755,0
Всього по Україні:	61690,0	15728,0	10974

ційного горизонту можна описати наступною залежністю:

$$P_{\text{вг}} = P_{\text{ск}} + P_{\text{в}} \quad (1),$$

де $P_{\text{вг}}$ - гідравлічний тиск в експлуатаційному водоносному горизонті за умови напруженого гідрогеодеформаційного стану;

$P_{\text{ск}}$ та $P_{\text{в}}$ - рівноважний гідравлічний тиск мінерального скелету та порової води.

За умов експлуатаційного зниження $P_{\text{в}}$ відбувається збільшення $P_{\text{ск}}$, частина деформації стискання якого переважно передається на покривельний слабопроникний (розділяючий) шар у вигляді початкового розуцільнення і наступного часткового стискання (ефект Болтона-Джексона).

За балансовими оцінками багатьох дослідників (проф. Бочевер Ф. М., проф. Мироненко В. І., проф. Язвін Л. С., проф. Бабушкін В. Д., проф. Гольдберг В. М., д. г. н. Сухоребрій А. О.,

проф. Огняник М. С.), вплив вищезазначених змін напруженого стану ГГФС сягає 1-2 % її загального об'єму. Але при довгостроковій експлуатації водозабору (10-20 років і більше) формується стійкий дифузно-конвективний перенос солей порових розчинів із водотривного шару. Величина мінералізації порових розчинів в 10-20 разів і більше може перевищувати мінералізацію вод експлуатаційних горизонтів (рис. 4).

Більшість експлуатаційних водоносних горизонтів в межах басейнів підземних вод (БПВ) України (рис. 1) має розвинуту зону активного водообміну (ЗАВ) з формуванням регіонально розповсюдженої ГГФС.

До попереднього: "витриманий водотрив (розділяючий слабопроникний шар) – експлуатаційний горизонт" (проф. Язвін Л. С., акад. Шестопалов В. М. та ін.). При цьому більшість розді-

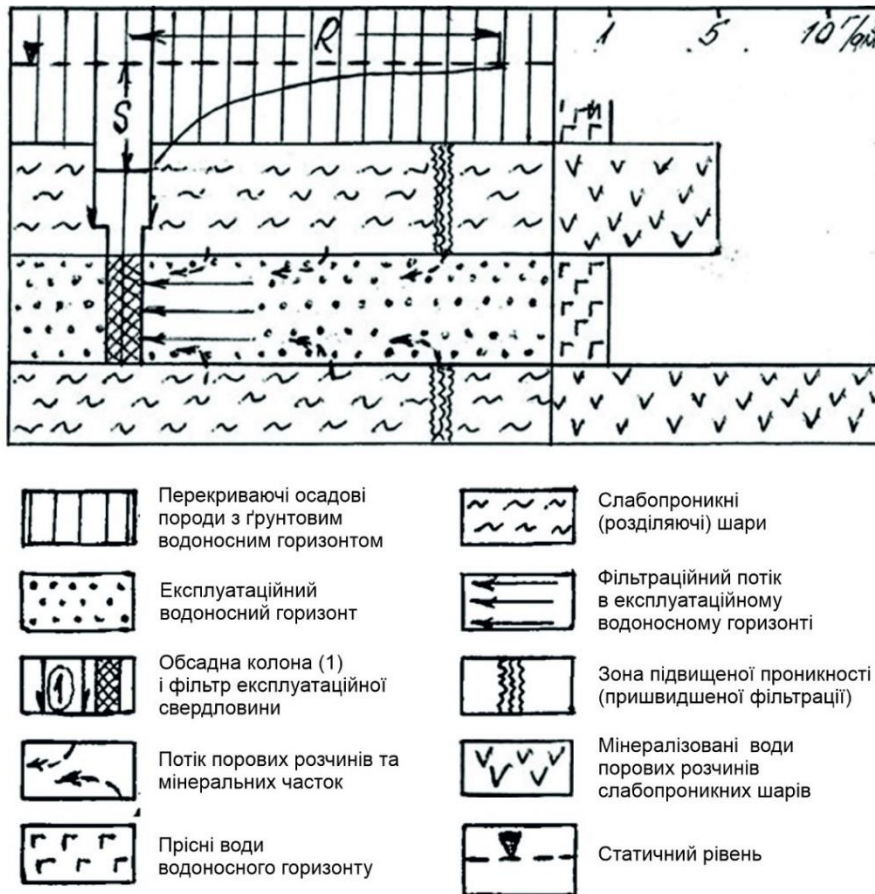


Рис. 4. Схема гідрогеохімічно-дифузійної та суфозійно-компресійної взаємодії експлуатаційного водоносного горизонту та прилеглих слабопроникних піщано-глинистих (розділяючих) шарів / Fig. 4. Scheme of hydrogeochemical-diffusion and suffusion-compression interaction of the operational aquifer and adjacent poorly permeable sand-clay (separating) layers

ляючих слабопроникних шарів в межах ЗАВ за регіональними даними [3-7] вміщують до 10 % фізично зв'язаної води (плівкова, куточків пор, субкапілярна та ін.) з середнім вмістом солей до 10 г/дм³ і має умовно активну пористість $n_0 \approx 10^{-3}$.

Нижче наведено розрахунок гідрогеохімічного балансу типової свердловини з дебітом $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{добу}$, щорічним збільшенням мінералізації $\Delta M = 10 \text{ мг/дм}^3$ (10 г/м³) та проектним періодом експлуатації $t = 10^4$ діб ($t \approx 27,4$ р.)

За цих умов кількість дифузійно-конвективної міграції солей із слабопроникного (розділяючого) шару за розрахунковий час у водовідбір експлуатаційної свердловини складе:

$$G = \Delta M \cdot Q \cdot t = 1.0 \cdot 10^5 \text{ кг} \quad (2)$$

В той же час при функціонуванні ГГФС експлуатаційної свердловини кількість солей G_0 в порових розчинах товщі слабопроникного покривного розділяючого шару середньою товщиною розділяючого шару, $m_0=50,0$ в межах депресії буде дорівнювати:

$$G_0 = \pi R^2 \cdot m_0 \cdot n_0 \cdot M_0 \quad (3),$$

де n_0 - об'ємна кількість фізично зв'язаної

води у породному масиві розділяючого шару, $n_0=0,10$;

R - середня величина радіусу депресії окремої свердловини;

M_0 - типове значення мінералізації порового розчину на рівні "рихлосв'язаної" води;

$$M_0 = 10 \text{ кг/м}^3$$

(дослідження проф. Гольдберга В. М., д. г. н. Сухореброго А. О., проф. Крайнова С. Р., проф. Куликова Г. В. та ін.) [4,6,7,8].

За наведеними даними

$$G_0 = 3,14(2000)^2 \cdot 50 \cdot 0,10 \cdot 10 \approx 6,3 \cdot 10^8 \text{ кг} \quad (4)$$

Таким чином, відносний конвективно-дифузійний винос солі σ із порових розчинів слабопроникного покривного розділяючого шару в межах депресії за 30 років проектної експлуатації свердловини складе

$$\sigma = \frac{G}{G_0} = 1.0 \cdot \frac{10^5}{6,3} \cdot 10^8 \approx 1.6 \cdot 10^{-4} \quad (5)$$

В цілому результати вищенаведених розрахунків дозволяють зробити наступні методичні висновки:

1) конвективно-дифузійна міграція солі з порових розчинів слабопроникного покривного

розділяючого шару в експлуатаційний водоносний горизонт має стійкий просторово-часовий характер впливу на якість підземного водовідбору;

2) мінералізовані порові розчини, з початкової фази розвитку депресії приймають участь у формуванні хімічного складу водовідбору;

3) низька проникність і висока сорбційна здатність глинистих порід слабопроникних розділяючих регіональних шарів обумовлюють дуже обмежений вплив мінералізованих порових розчинів на експлуатаційний водовідбір при умові відсутності геомеханічних порушень ГГФС (підземне будівництво, гідравлічні розриви та ін.).

Згідно з існуючими гідрогеофільтраційними моделями у багатьох випадках розділяючі шари мають подвійну структуру порово-проникного простору внаслідок існування послаблених лінійних зон підвищеної проникності та стійких слабопроникних блоків [3-5]. За результатами газогеохімічних, дистанційних досліджень та даних з надглибоких свердловин відносна площа таких зон сягає $1 \div 10 \text{ м}^2/\text{км}^2$. В цілому за умови вертикального водообміну граничні ділянки вищезазначених зон можуть активізувати показники перетоку та молекулярної дифузії.

Вищенаведені експертні узагальнення дозволяють дійти висновку, що при будь-якій схемі формування депресійної лійки дифузійно-конвективний рух солей і мікрокомпонентів із порових розчинів слабопроникного (розділяючого) шару є стабільним просторово-часовим фактором впливу на гідрогеохімічний склад вод експлуатаційних водоносних горизонтів [2, 4, 6-8]. Вищезазначені експертні оцінки свідчать, що гідрогеохімічна еволюція експлуатаційних водоносних горизонтів на більшості артезіанських водозаборів України вимагає змін підходів до обґрунтування схем розташування експлуатаційних свердловин водозаборів та величин припустимих знижень рівнів в експлуатаційних горизонтах з урахуванням розвитку конвективно-дифузійної міграції мінералізованих порових розчинів із слабопроникних розділяючих шарів.

Вперше просідання земної поверхні, у зв'язку з інтенсивними відкачками підземних вод було зареєстровано в японських містах Токіо, Осака й Ніагата в 30-х рр. минулого сторіччя. До 60-х рр. максимальний сумарний відбір підземних вод тільки в м. Токіо перевищив 600 тис. $\text{м}^3/\text{добу}$, а загальне зниження напорів склало більше 150 м. В 1975 р. максимальна величина зниження поверхні землі в цьому місті досягла 4,0 м. У результаті частина міста виявилася нижче рівня моря, і для його захисту потрібно було побудувати 200 км захисних дамб.

Катастрофічних розмірів просідання земної

поверхні досягло в столиці Мексики – м. Мехіко, де його північно-східна частина опустилася на 9 м. Місто розташоване в міжгірній улоговині, у геологічній будові якої переважають слабо ущільнені монтморилонітові глини озерного походження, що перешаровуються з водоносними пісками, мулами й іншими пухкими породами. Швидкість просідання земної поверхні коливається від 10-20 мм/рік до 500 мм/рік (м. Мехіко).

Заходи, що попереджають появу й розвиток просідання земної поверхні у період відкачок підземних вод, зводяться, в основному, до регулювання кількості води, що відбирається.

Наприклад, у Японії діє закон «Правила (контроль) відбору підземних вод», що забороняє надмірний водовідбір. Практикується також нагнітання у водоносні шари стисненого повітря для підтримки й відновлення пластового тиску.

Накопичений досвід свідчить, що провідна причина просідання полягає в тривалому й інтенсивному підземному водовідборі, який призводить не тільки до значного зниження рівня води й зняття гідростатичного напору, але й до збільшення ефективного тиску на скелет дисперсного ґрунту, його ущільнення й, як наслідок, до осідання поверхні землі.

Початковий рівноважний напружений стан ГГФС експлуатаційного водоносного горизонту може бути описаний наступною залежністю:

$$P_{1вг} = P_{1м} + P_{1в} \quad (6)$$

де $P_{1вг}$ – геостатичний тиск товщі порід, що перекривають експлуатаційний водоносний горизонт;

$P_{1м}$, $P_{1в}$ - відповідно, розподіл геостатичного тиску між мінеральним скелетом і водною складовою ГГФС експлуатаційного водоносного горизонту.

Слід відмітити, що у зв'язку із тривалою відкачкою великих мас води зменшується внутрішньо-пластовий поровий тиск ($P_{2в} < P_{1в}$), і одночасно зростає напруження у мінеральному масиві порід експлуатаційного водоносного горизонту ($P_{2м} > P_{1м}$) з його наступним стисканням. У деяких випадках це може приводити не тільки до осідання земної поверхні, але й до утворення провально-суфозійних деформацій [6 - 10].

Величина осідання поверхні h внаслідок фільтраційної компресії при підземному водовідборі на експертному рівні оцінюється за наступною залежністю:

$$h = \frac{\delta m S}{1 + \varepsilon} a_v, \quad (7)$$

де δ – об'ємна вага порід, які перекривають експлуатаційний водоносний горизонт, $\text{кг}/\text{м}^3$;

m – товщина шару порід експлуатаційного водоносного горизонту, м;

S – зниження рівня в експлуатаційному во-

доносному горизонті (дренажної системи), H ;

ε - коефіцієнт пористості експлуатаційного водоносного горизонту;

a_v - коефіцієнт об'ємного стискання експлуатаційного водоносного горизонту для водонасичених пісків.

$$a_v \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 / H \quad (8)$$

За результатами багатьох досліджень інженерно-геотехнічно суттєвою є фільтраційна компресія водоносного горизонту, яка спостерігається при зниженнях рівня у десятки метрів і більше при переважно піщано-пилуватому складі водонасиченого породного масиву. Результати просторово-часового моніторингу фільтраційно-компресійних осідань земної поверхні у зонах депресійних лійок водозаборів великих промислово-міських агломерацій та дренажно-осушувальних систем кар'єрів та шахт на території України (Придніпров'я, Причорномор'я, Донбас, Полісся) свідчать, що величина осідання земної поверхні корелюється зі зниженням рівня в експлуатаційному водоносному горизонті і в більшості випадків складає 1,0-2,5 % його величини.

На території України масштабним прикладом прояву фільтраційної компресії породного масиву під впливом великого зниження рівня піщано-пилуватого напірного горизонту (>200 м) є Південно-Білозерське залізорудне родовище, яке розташоване на межі Українського кристалічного масиву та Причорноморського артезіанського басейну. Величина осідання земної поверхні із центром депресії біля шахтних стволів складала 2,5 м при загальній площі мульди осідання до 15 км². Зміна напружено-деформованого стану водно-породного комплексу призвела до додаткових небезпечних деформацій конструкцій шахтних стволів та необхідності їх додаткового зміцнення.

В цілому накопичений досвід експлуатації великих водозаборів (дебіт до десятків тис. м³/добу) у більшості напірних (артезіанських) водоносних горизонтах басейнів підземних вод свідчить про необхідність проведення спеціальних інженерно-гідрогеодинамічних досліджень у зоні їхнього впливу [6, 9-11]. Крім того, установлено, що осідання земної поверхні у зонах депресійних лійок підземних водозаборів нерідко супроводжується підтопленням і заболоченням території, деформаціями будівель і споруд інженерних комунікацій та ін. (Придніпровський, Причорноморський регіони та ін.).

Відомо, що під фільтраційною суфозією мають на увазі винесення гідрогеофільтраційним потоком депресійної лійки експлуатаційної свердловини (дрени) мілкозернистих (пилуватих) часток крізь пори більш крупнозернистого скелета. Як свідчить досвід довгострокової експлуатації водозабірних споруд на різнозернисті водо-

носні горизонти, винос дрібних часток може мати як обмежений характер, так і призводити до руйнування структури водоносного горизонту і перекриваючих порід та формування зон осідання земної поверхні. Численні дослідження [7-9, 11-13] свідчать, що активізація суфозії залежить, в першу чергу від коефіцієнту неоднорідності водоносного піщаного ґрунту K_n і гідравлічного градієнту I фільтраційного потоку.

За даними [6-9, 11] процеси суфозійного руйнування породного масиву неоднорідних водонасичених пісків (супісків) спостерігаються переважно при коефіцієнті неоднорідності ($K_n = \frac{d_{60}}{d_{10}}$) від 10 і більше (d_{60} , d_{10} - відповідно діаметр фракцій порід, що складають 60 % та 10 % водоносного горизонту).

Оцінки впливу гідравлічного градієнту фільтраційного потоку на прояви суфозії дозволяють дійти висновку, що її формування поблизу фільтрів водозабірних свердловин і на поверхні обводнених схилів може відбуватися при гідравлічних градієнтах $I = 0,1$ і більше [7-9, 11-13]. В інженерно-технологічному відношенні суфозійний процес у прифільтровій зоні часто призводить до пошкодження насосного обладнання та низхідного пристовбурного розвитку суфозії і осідання земної поверхні.

На регіональному рівні суфозійні процеси у багатьох регіонах України (Полісся, Прикарпаття та ін.) завдають значної шкоди фундаментам житлових і промислових будівель у низці промислово-міських агломерацій України [2, 7, 8, 13].

Явище суфозії широко поширене в межах півдня України, де розповсюджені лесово-суглинисті просадкові ґрунти з регіональним розвитком процесу підтоплення внаслідок масштабного зарегулювання поверхневого стоку (більше 80 %) та зрошування земель [6-9]. Переважно низхідний характер техногенних фільтраційних потоків призводить до розчинення цементуючих солей (сульфати, хлориди) і виносу дрібних пилувато-глинистих часток. Внаслідок зменшення об'єму ґрунтового-породної маси на поверхні землі з'являються різноманітні небезпечні форми просідання: воронки, провали, поди [6-9].

Активну роль у розвитку суфозійного процесу при експлуатації водозаборів і дренажних систем у більшості басейнів підземних вод України відіграють перешарування тріщинних (тріщино-карстових) піщаних різнозернистих водоносних горизонтів. Це сприяє формуванню зон підвищених гідравлічних градієнтів та прискореного руху гідрогеофільтраційного потоку на контактах тріщинуватих і піщано-пилуватих шарів і, як наслідок, активізації суфозії вздовж тріщин.

Таким чином, широкий розвиток на території України карстово-суфозійних процесів і пов'

язаних з ними проявів поверхневих і підземних форм (провалів, подів, западин та ін.) є наслідком не лише природних, а й активних техногенних чинників, перш за все, активного підземного водовідбору (Південний, Поліський регіони) з формуванням великих депресійних лійок та низхідних фільтраційних потоків з підвищеними

гідралічними градієнтами підземних потоків у контактних зонах пілувато-піщаних відкладів та водопроникних тріщин. Такі умови характерні для Волино-Подільського, Причорноморського та центральної частини Дніпровсько-Донецького артезіанських басейнів (рис. 2-4).

Аналіз свідчить, що слід очікувати активіза-

Таблиця 2 / Table 2

Регіональна характеристика потенційного розвитку НГЛП водокористування у басейнах підземних вод України

Regional characteristics of the potential development of NGLP water use in underground water basins of Ukraine

Найменування басейну підземних вод	Площа, тис. км ²	Потенційний розвиток небезпечних літодинамічних процесів водокористування		
		Дифузія мінералізованих порових розчинів	Фільтраційна компресія	Суфозія
Закарпатський	6,0	+	-	-
Карпатський	18,0	-	-	-
Передкарпатський	13,9	+	-	+
Волино-Подільський	87,0	+	+	+
Український басейн тріщинних вод	161,6	-	-	-
Дніпровський	120,5	+	+	+
Донецько-Донський	44,7	+	+	+
Донецький	25,9	+	-	-
Причорноморський	98,4	+	-	+
Азово-Кубанський	3,9	+	-	-
Рівнинно-Кримський	18,3	+	-	+
Гірсько-Кримський	4,8	-	-	-

ції суфозійних (карстово-суфозійних) процесів внаслідок впливу водно-господарської діяльності людини (будівництво водосховищ, шахтного і кар'єрного водовідливу, активізація підтоплення лесово-суглинистих і просадкових породних масивів). До нових сучасних факторів активізації суфозійних (карстово-суфозійних) процесів слід віднести вплив ГЗК (потепління, зростання нерівномірності та кількості опадів, підвищення висоти і частоти повеней і паводків, з якими пов'язана активізація взаємодії поверхневих і підземних вод), зміни фізико-хімічного стану та фізико-механічних властивостей лесово-суглинистих просадкових масивів у районах інтенсивної забудови та промислового освоєння [2, 6-9].

Відомо, що підземний водовідбір із свердловини обумовлює формування депресійної лійки, в межах якої просторова залежність зниження рівня має вигляд:

$$S_r = S_0 \frac{\lg(R/r)}{\lg(R/r_0)} \quad (9)$$

де R - радіус депресійної лійки (м) експлуатаційної свердловини при дебіті Q , м³/добу;

r_0 , r - відповідно, радіус фільтра (типова величина $r_0 \approx 0,1$ м) та відстань поточної точки депресії ($r_0 < r < R$), м.

Згідно наведеної залежності значення граді-

єнту рівня депресійної лійки у її будь-якому пункті

$$I = \frac{ds}{dr} = [S_0 / (\lg R / r_0)] \cdot (\lg R - \lg r),$$

після відповідних перетворень

$$I = [S_0 / (\ln R / r_0)] \cdot [\ln R - (\ln r - r)] \quad (10)$$

З метою спрощення розрахунку відстані формування критичного значення градієнту гідрогеофільтраційного потоку $I_{кр}$ у зоні депресійної лійки експлуатаційної свердловини пропонується спрощений метод оцінки стрімкості кривої депресії на прикладі типової свердловини підземного водозабору.

Наприклад, при дебіті свердловини $Q = 1000$ м³/добу, водопровідності експлуатаційного горизонту $KM = 250$ м²/добу та радіусі депресійної лійки $R \approx 2000$ м величина I в залежності від відстані r до фільтрової зони ($r_0 < r < R$) буде змінюватись наступним чином (табл. 3,4 та рис. 4).

Виконані розрахунки свідчать, що небезпечний розвиток суфозійного процесу у прифільтровій зоні експлуатаційної свердловини на водоносний горизонт у різнозернистих пісках може сягати відстані 10-15 м (рис. 5). В той же час, в центральній зоні депресійної лійки групового або лінійного водозабору за умови взаємодії локальних свердловинних депресій, відстань роз-

Таблиця 3 Table 3

Розрахунок градієнтів рівня депресійної лійки типової свердловини підземного водозабору /
Calculation of gradients of the depression level of a typical well of an underground water intake

Відстань від фільтрової зони r_i , м	Зміна відстані Δr між точками розрахунку градієнту $\Delta r = r_{i+1} - r_i$, м	Зниження рівня депресії S_i , м	Зменшення зниження рівня ΔS депресії $\Delta S = S_i - S_{i+1}$, м	Градієнт фільтраційного потоку $I = \Delta S / \Delta r$
1.0	0.0	4.86	0.0	1.64
2.0	1.0	4.41	0.45	0.45
5.0	3.0	3.83	0.58	0.20
10.0	5.0	3.33	0.50	0.10
15.0	5.0	3.12	0.21	0.04
20.0	5.0	2.94	0.18	0.04

Таблиця 4 / Table 4

Критичні швидкості і критичні градієнти фільтрації за умови суфозійного переносу пісків різної зернистості [6,7,12,13] /
Critical velocities and critical filtration gradients under conditions of suffusion transport of sands of different grain sizes [6,7,12,13]

Діаметр зерен водонасиченого піску, мм	Критичні швидкості фільтраційного потоку, м/добу	Критичний градієнт фільтраційного потоку	Структура суфозійного потоку піску
0.57	800	6.67	Переважно низхідний рух у тріщинуваті зони
0.90	530	1.63	
1.35	300	0.54	
<0.1	10	≤ 0.1	Переважно латеральні зміщення

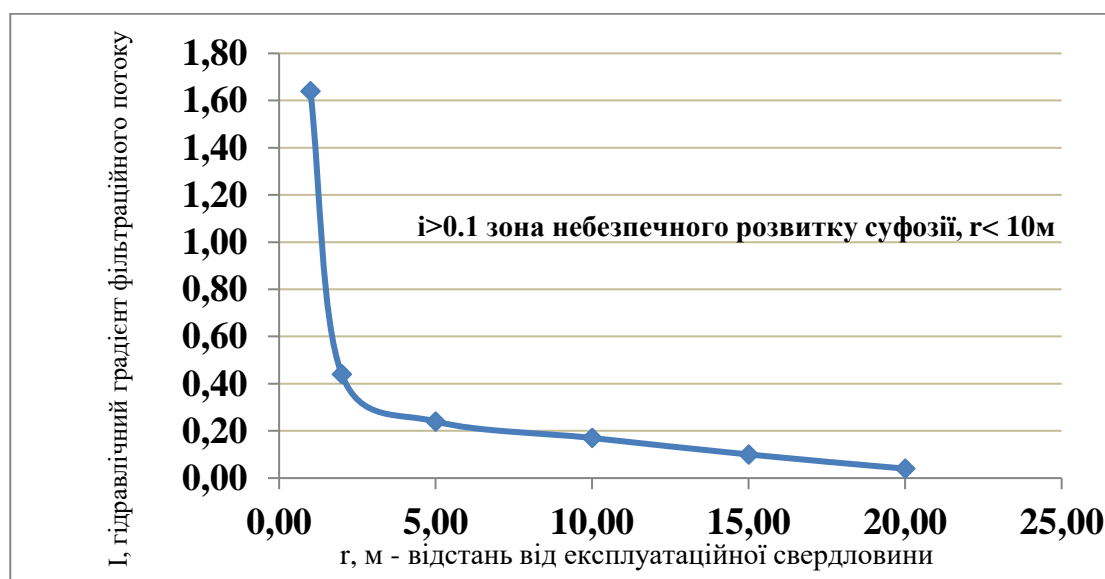


Рис. 5. Зміна гідралічного градієнту фільтраційного потоку з відстанню від експлуатаційної свердловини /

Fig. 5. Change in the hydraulic gradient of the filtration flow with distance from the production well

витку суфозійних деформацій земної поверхні може суттєво збільшуватися (до 3-5 разів) і погіршувати інженерно-геотехнічну стійкість експлуатаційних свердловин, насосного обладнання та інженерних мереж.

Провідним заходом попередження негативного впливу суфозійних процесів на безпеку підземного водовідбору є збільшення діаметру фі-

льтрів та використання фільтрової засипки із високопроникних матеріалів (гравій, крупнозернистий пісок) з метою зменшення гідралічних градієнтів фільтраційних потоків у присвердловинній зоні.

Виконаний аналіз змін геоморфологічних умов ділянок підземних водозаборів переважно у лісостеповій та степовій зонах України засвідчив

наявність ускладнень їх інженерно-геотехнічних умов внаслідок впливу суфозійних і фільтраційно-компресійних процесів. При цьому за результатами експедиційних досліджень 2016-2021рр. [6, 9, 11] встановлено геоморфологічний зв'язок вищезазначених процесів з розвитком подових і блюдцеподібних утворень земної поверхні.

За класифікацією д. г.-м. н. Молодих І. І. блюдця (поди) степові – це пологі, замкнені безстічні зниження округлої або овальної форми діаметром від 10–15 до сотень метрів, завглибшки від 1–1,5 до 3–4 м. Переважно розповсюджені на площах залягання лесів, лесових легких суглинків та супісків. Гідрогеофільтраційною особливістю подів і блюдців є наявність у верхній зоні геологічного розрізу зони активного водообміну (ЗАВ) до глибини від 3–4 до 7–30 м змін складу й фізико-механічних властивостей порід, зростання оглеєності, вологості, щільності. За результатами виконаних в ІТГПІ НАН України досліджень подово-блюдцеві утворення на території України найбільше трапляються на вододільних слабостічних рівнинних поверхнях, де вони є місцевими базисами ерозії, в межах високих терас середнього Дніпра та ін. терас рік басейну Сіверського Дінця, в північно-західній частині Причорноморської низовини. Вони утворюють полігональний мікрорельєф зі щільністю 14–84 форм на 1 км² (найбільша – між Чигирином і Черкасами). На даних територіях місцями займають 15–20 % площі межиріч. Тут вони розміщуються нерівномірно або лінійно на продовженнях улоговин стоку (лівобережжя Дніпра). Навесні та при зрошуванні у подово-блюдцевих депресіях місцевості утворюються невеликі озера, що активізує інфільтраційне живлення підземних вод і суфозійний перенос пилово-глиняних часток у зонах депресійних лійок підземних водозаборів.

В цілому встановлено, що основними факторами розвитку процесів суфозії, фільтраційної компресії та деформацій земної поверхні в межах депресійної лійки за умови активного підземного водовідбору є:

1) наявність пухких порід – глин, суглинків, супісків, пісків, алевритів, лесів у геологічному розрізі ЗАВ;

2) гранулярна неоднорідність пухких відкладів та більш щільних порід, що їх підстеляють в межах ЗАВ (або наявність в них порожнин) – пісковиків, вапняків, мергелів, черепашників, сланців;

3) вертикальна циркуляція підземних вод, що сприяє низхідній міграції пилово-глиняних часток у експлуатаційні підземні водоносні горизонти.

Як свідчать результати еколого-ресурсного

моніторингу стану ПГВ на території України відбувається стійке регіональне погіршення якості поверхневих вод внаслідок їх масштабного регулювання, зростаючого впливу ГЗК та наслідків російської агресії (геохімічне забруднення водозбірних ландшафтів, руйнування очисних споруд та ін.), комплексного впливу техногенного Донбасу у зоні затоплення шахт.

В той же час, узагальнена оцінка потенційного розвитку НГФП у басейнах підземних вод України дозволяє дійти висновку про можливість їх локальної активізації при суттєвому збільшенні водовідбору, який зараз складає менше 10 % прогнозних ресурсів (табл. 4).

Висока еколого-ресурсна стійкість підземного ПГВ обумовлена його високою захищеністю від впливу техногенних порушень поверхневої гідросфери, значним перевищенням природних об'ємів підземних вод в ЗАВ над середньорічним поверхневим стоком та можливістю оптимізації водовідбору за рахунок наближення до водокористувачів.

Таким чином, активне збільшення підземного водовідбору підземних вод питної якості є головним фактором підвищення еколого-ресурсної стійкості систем господарсько-питного водопостачання за умови зростання комплексного впливу ГЗК, водно-екологічних наслідків російської агресії та накопичених незворотних порушень екологічного стану поверхневої гідросфери [1, 2, 9-13].

Висновки. Виконаний аналіз потенційних факторів регіонального розвитку небезпечних геофільтраційних процесів водокористування у басейнах підземних вод України дозволяє обґрунтувати наступні висновки і рекомендації.

1. Аномальне регулювання поверхневого стоку провідних річкових басейнів України (більше 70 %, що в 2-3 рази вище показників держав ЄС), що обумовлює зниження активності водообміну поверхневої гідросфери і зростання небезпеки забруднення поверхневих джерел ПГВ (до 75 % загального водопостачання), в т. ч. внаслідок зростання впливу негативних факторів ГЗК.

2. Підземні води питної якості в межах практично усіх регіонів України (за виключенням гірських районів Карпат і Криму), є головним фактором національної безпеки господарсько-питного водопостачання за умови повоєнного відновлення України, подальшого впливу накопичених водно-екологічних наслідків техногенезу та ГЗК.

3. В межах усіх БПВ України при багаторічному збільшенні водовідбору існує загроза локального розвитку небезпечних геофільтраційних процесів, провідними серед яких є:

- дифузія мінералізованих порових розчинів із

слабопроникних (водотривких) шарів у експлуатаційні водоносні горизонти;

- фільтраційна компресія водоносних горизонтів під впливом тривалих відкачок підземних вод;
- фільтраційно-суфозійне винесення дрібнозернистих (пилюватих) часток гідрогеофільтраційним потоком експлуатаційної свердловини з небезпекою осідання земної поверхні.

Враховуючи вищенаведене, при формуванні оновленої моделі економічного розвитку України у повоєнний період та підвищення еколого-ресурсної безпеки системи господарсько-питного водопостачання на основі стійкого збільшення використання захищених від впливу техногенезу підземних вод представляється необхідним:

1) виконати переоцінку прогнозних ресурсів і експлуатаційних запасів підземних вод питної

якості, надати орієнтовні оцінки впливу конвективно-дифузійного переносу мінералізованих порових розчинів із слабопроникних (розділяючих) шарів на якість вод експлуатаційних горизонтів;

2) розробити методику вірогідної оцінки гідрогеохімічних і пружньо-ємностних параметрів слабопроникних розділяючих шарів та їх впливу на еколого-гідрогеологічні умови гідрогеофільтраційних систем, "слабопроникний (розділяючий) шар – експлуатаційний водоносний горизонт";

3) розробити наукові основи гранично-припустимих знижень рівнів в експлуатаційних водоносних горизонтах з урахуванням впливу дифузійно-конвективної міграції мінералізованих порових розчинів слабопроникних (розділяючих) шарів.

Список використаних джерел

1. Шестопалов В.М., Огняник Н.С., Дробноход Н.И. и др. Водобмен в нарушенных условиях //В кн.: Водобмен в гидрогеологических структурах Украины. - К.; Наук. думка, 1991. - 528 с.
2. Шехунова С.Б., Яковлев Е.О., Стадниченко С.Н., Алесеенкова М.В. Проблемы природопользования на территориях ликвидированных солерудников в пгт. Солотвино (Закарпатье, Украина). Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, «Актуальные проблемы наук о Земле. Исследование трансграничных регионов». 2019, с. 277-282.
3. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2022 р. Мінрегіонрозвитку України, Київ, 2023, 664 с.
4. Яковлев Е.О. Оцінка впливу порових розчинів регіональних слабопроникних шарів на формування якості ресурсів питних підземних вод. Мінеральні ресурси України, №1, 2011, с. 37-46
5. Сухоребрій, А. О. Порів розчини слабопроникних порід платформних артезіанських басейнів України: автореф. дис. д-ра геол. наук: 04.00/19, 64с.
6. Триснюк В.М., Трофимчук О.М. Моделирование природно-технической системы гидроресурсов для безопасности объектов критической инфраструктуры. Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування. Матеріали Восьмої міжнародної науково-практичної конференції (9-12 жовтня 2023 р., м. Львів), с. 516-522. https://conf.dkz.gov.ua/files/2023_materials_net.pdf
7. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. М., "Недра", 1974, 305 с.
8. Огняник Н.С., Рудаков В.К., Рибин В.Ф., Ситников А.Б. Охрана подземных вод в условиях техногенеза. К., "Вища школа", 1985, 223 с.
9. Удалов И.В. Трансформация геологической среды под влиянием техногенных процессов (в условиях северо-восточного Донбаса). Харьков, ХНУ им. В.Н. Каразина, 2016, 176 с.
10. Ye. Yakovlev, Ser. Chumachenko. Ecological Threats in Donbas, Ukraine. Canada, Centre for Humanitarian Dialogue, 2017, 60 p.
11. World Bank. Sustainable land management. Challenges, opportunities and trade offs. Washington D.C.: World Bank Publications, 2006.
12. Goldewey W.G., Wesche D., Rudolph T., Melchers C. Methods for evaluating the hydraulic barriers effects of the Escher Marl following cessation of German Hard Coal Mine. An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges. Proceedings of the 12th Congress of International Mine Water Association, p.p. 693-698, 2014.
13. Giao P.H., Phien-waj. N.A/FEM Program for the land subsidence analyses. Proc. Intl. Workshop – Hanoi Geoinforming, Vietnam National University Publishing House, 2014, p.p. 77-82.
14. Burenkova V. V. Assessment of Suffosion in Non-Cohesive and Graded Soils. In J. Brauns, U. Schuler, and M. Heibaum, editors, Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering on the First International Conference Geo-Filters, Karlsruhe, 20-22. Oktober, pages 357-367, Rotterdam, 1992, Balkema.
15. R. P. Chapuis, Similarity of Internal Stability Criteria for Granular Soils. Canadian Geotechnical Journal, 29: 711-713, 1992.
16. Fannin R. J. Karl Terzaghi: from theory to practice in geotechnical filter design. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134: 267-276, 2008. Scour and Erosion, 261 p.
17. Homberg U., Binner R., and Prohaska S. Determining geometric grain structure from x-ray micro-tomograms of graded soil. In K. J. Witt, editor; Workshop Internal Erosion, volume 21 of Schriftenreihe Geotechnik, Witt, K. J., Nov. 2008.

18. Kenney T. C. and Lau D. *Internal Stability of Granular Filters*. *Canadian Geotechnical Journal*, 22: 32-43, 1985.
19. Kenney T. C. and Lau D. *Internal Stability of Granular Filters: Reply*. *Canadian Geotechnical Journal*, 23: 420-423, 1986.
20. Kezdi A. *Soil physics - selected topics*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1979.
21. Li M. and Fannin R. J. *A comparison of two criteria for internal instability of granular soils*. *Canadian Geotechnical Journal*, 45: 1303-1309, 2008.
22. Mehlhorn T., Prohaska S., and Slowik V. *Modelling and analysis of part icle and pore structures in soils*. In K. J. Witt, editor, *Workshop Internal Erosion, volume 21 of Schriftenreihe Geotechnik*. Witt, K. J., Nov. 2008.
23. Milligan V. *Internal stability of granular filters: Discussion*. *Canadian Geotechnical Journal*, 23: 414-418, 1986.
24. MSD. *Merkblatt: Standsicherheit von Dammen an Bundeswasserstral3en*. *Technical Report, Bundesanstalt fur Wasserbau*, 2005.
25. Muckenthaler P. *Hydraulische Sicherheit von Staudammen*. *PhD thesis, TU Munchen, 1989. Bericht Nr. 61*.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Potential factors of regional development of dangerous geofiltration processes of water use in underground water basins of Ukraine

*Yevheniï Yakovliev*¹

¹ Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,

*Ihor Udalov*²

DSc (Geology), Professor, Department of Fundamental and Applied Geology,

² V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

ABSTRACT

It is indicated that surface water resources under the conditions of growing technogenesis and the consequences of military actions (military, geochemical pollution of catchment landscapes, destruction of treatment facilities, etc.) are classified as polluted and dirty (IV, V quality class). Underground water resources of Ukraine amount to 22.5 billion m³, of which up to 70% are protected or conditionally protected artesian waters of drinking quality, the transition to the use of which determines the relevance of the article.

The purpose of the article is to analyze the potential factors of regional development of dangerous geofiltration processes of water use in underground water basins of Ukraine.

The scientific novelty of the article lies in the assessment of the degree of influence of the complex of dangerous lithodynamic processes (HLDP), which have a hydrogeofiltration origin, on the qualitative characteristics of groundwater, the stability of the upper part of the rock massif, and the safe operation of water intake facilities.

Practical significance. It is shown that with any scheme of depression funnel formation, the diffusion-convective movement of salts and microcomponents from the pore solutions of the poorly permeable (separating) layer is a stable spatio-temporal factor affecting the hydrogeochemical composition of water in operational aquifers. It has been proven that the hydrogeochemical evolution of the composition of water at most water intakes in Ukraine requires changes in approaches to the justification of well location schemes and the amount of allowable decreases in levels in operational horizons. It is estimated that engineering-geotechnically significant filtration compression of the aquifer occurs when the level drops by tens of meters or more. The results of spatio-temporal monitoring of filtration and compression subsidence of the earth's surface in the areas of depression funnels of water intakes and drainage and drainage systems of quarries and mines on the territory of Ukraine indicate that, in general, the amount of subsidence of the earth's surface is correlated with a decrease in the level in the operational aquifer, and in most cases it is 1.0-2.5% of its value. It has been established that the subsidence of the earth's surface in the zones of depressions of underground water intakes is often accompanied by flooding and waterlogging of the territory, deformations of buildings and structures of engineering communications. It is stated that the active role in the development of the suffusion process during the operation of water intakes and drainage systems is played by the interlayering of fissured (crack-karst) sandy, multi-grained aquifers. This contributes to the formation of zones of increased hydraulic gradients and accelerated movement of hydrogeofiltration flow at the contacts of cracked and sand-dust layers and, as a result, activation of suffusion along the cracks. Calculations prove that the dangerous development of the suffusion process in the near-filter zone of the production well on the aquifer in multi-grained sands reaches 10-15 m. In the central zone of the depression funnel of a group or linear water intake, under the condition of the interaction of local well depressions, the distance of the development of suffusion deformations of the earth's surface increases significantly (up to 3-5 times) and worsens the engineering and geotechnical stability of production wells, pumping equipment, etc.

Keywords: *aquifer, technogenesis, suffusion, filtration compression, groundwater quality.*

References

1. Shestopalov V.M., Ognyanik N.S., Drobnokhod N.I. etc. (1991). *Water exchange in disturbed conditions. Water exchange in the hydrogeological structures of Ukraine*. K.; Naukova dumka, 528.
2. Shehunova S.B., Yakovlev E.O., Stadnychenko S.N., Aleseenkova M.V. (2019). *Problems of nature management in the territories of liquidated salt mines in the village of Solotvino (Zakarpattia, Ukraine). Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, "Actual Problems of Earth Sciences. Research of cross-border regions"*. 277-282.
3. *National report on the quality of drinking water and the state of drinking water supply and drainage in Ukraine in 2022 (2023)*. Ministry of Regional Development of Ukraine, Kyiv, 664. [in Ukrainian]
4. Yakovlev E.O. (2011). *Evaluation of the influence of pore solutions of regional poorly permeable layers on the formation of the quality of drinking groundwater resources. Mineral resources of Ukraine, 1*, 37-46. [in Ukrainian]
5. Sukhorebry A. O. (2019). *Pore solutions of poorly permeable rocks of platform artesian basins of Ukraine: autoref. thesis Dr. geol. Sciences: 04.00/19*, 64. [in Ukrainian]
6. Trysnyuk V.M., Trofymchuk O.M. (2023). *Modeling of the natural and technical system of water resources for the safety of critical infrastructure facilities. Subsoil use in Ukraine. Investment prospects. Materials of the Eighth International Scientific and Practical Conference (October 9-12, Lviv)*. 516-522. https://conf.dkz.gov.ua/files/2023_materials_net.pdf [in Ukrainian]
7. Myronenko V.A., Shestakov V.M. (1974). *Fundamentals of hydrogeomechanics*. M., "Nedra", 305.
8. Ognyanik N.S., Rudakov V.K., Rybyn V.F., Sytnikov A.B. (1985). *Protection of groundwater in the conditions of technogenesis*. K., "Higher School", 223.
9. Udalov I.V. (2016). *Transformation of the geological environment under the influence of man-made processes (in the conditions of the North-Eastern Donbas)*. Kharkiv, V.N. Karazin Kharkiv National University, 176.
10. Yakovlev Ye., Chumachenko Ser. (2017). *Ecological Threats in Donbas, Ukraine*. Canada, Centre for Humanitarian Dialogue, 60.
11. World Bank (2006). *Sustainable land management. Challenges, opportunities and trade offs*. Washington D.C.: World Bank Publications.
12. Goldewey W.G., Wesche D., Rudolph T., Melchers C. (2014). *Methods for evaluating the hydraulic barriers effects of the Escher Marl following cessation of German Hard Coal Mine. An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges. Proceedings of the 12th Congress of International Mine Water Association*, 693-698.
13. Giau P.H., Phien-waj. N.A. (2014). *FEM Program for the land subsidence analyses. Proc. Intl. Workshop – Hanoi Geoinforming, Vietnam National University Publishing House*, 77-82.
14. Burenkova V. V. (1992). *Assessment of Suffosion in Non-Cohesive and Graded Soils*. In J. Brauns, U. Schuler, and M. Heibaum, editors, *Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering on the First International Conference Geo-Filters, Karlsruhe, 20-22 Oktober, Rotterdam, Balkema*, 357-367.
15. Chapuis R. P. (1992). *Similarity of Internal Stability Criteria for Granular Soils. Canadian Geotechnical Journal*, 29: 711-713.
16. Fannin R. J., Terzaghi Karl (2008). *From theory to practice in geotechnical filter design. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134:267.276, Scour and Erosion, 261.
17. Homberg U., Binner R., and Prohaska S. (2008). *Determining geometric grain structure from x-ray microtomograms of gradated soil*. In K. J. Witt, editor; *Workshop Internal Erosion, 21 of Schriftenreihe Geotechnik*, Witt, K. J.
18. Kenney T. C. and Lau D. (1985). *Internal Stability of Granular Filters. Canadian Geotechnical Journal*, 22: 32-43.
19. Kenney T. C. and Lau D. (1986). *Internal Stability of Granular Filters: Reply. Canadian Geotechnical Journal*, 23: 420-423.
20. Kezdi A. (1979). *Soil physics - selected topics*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
21. Li M. and Fannin R. J. (2008). *A comparison of two criteria for internal instability of granular soils. Canadian Geotechnical Journal*, 45: 303-1309.
22. Mehlhorn T., Prohaska S., and Slowik V. (2008). *Modelling and analysis of part icle and pore structures in soils*. In K. J. Witt, editor; *Workshop Internal Erosion, volume 21 of Schriftenreihe Geotechnik*. Witt, K. J.
23. Milligan V. (1986). *Internal stability of granular filters: Discussion. Canadian Geotechnical Journal*, 23: 414-418.
24. Merkblatt MSD. (2005). *Standicherheit von Dammen an Bundeswasserstral3en. Technical Report, Bundesanstalt fur Wasserbau*.
25. Muckenthaler P. (1989). *Hydraulische Sicherheit von Staudammen. PhD thesis, TU Munchen, Bericht Nr. 6*.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 6 April 2024

Accepted 23 May 2024