

УДК 528.88:(556.388:622.323)

## Прогнозне оцінювання потенційного забруднення підземної гідросфери у зв'язку з видобутком нетрадиційних вуглеводнів (з використанням дистанційних даних)

В. І. Лялько<sup>1</sup>, О. Т. Азімов<sup>1\*</sup>, Є. О. Яковлев<sup>2</sup><sup>1</sup>ДУ "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України", Київ, Україна<sup>2</sup>Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна

У статті розглянута актуальність застосування сучасних аерокосмічних і гідрогеологічних методів у процесі вирішення завдань екологічної безпеки гідросфери при видобутку в Україні нетрадиційних вуглеводнів, зокрема, сланцевого газу (СГ). Наведені приклади пілотного впровадження цих методів у межах прилеглої до Юзівської ліцензійної ділянки Біляївської площі Дніпровсько-Донецької западини як найбільшого в Україні артезіанського басейну. На підставі урахування гідрогеофільтраційних параметрів багатошарової системи (водоносні горизонти, недосконалі й досконалі регіональні водотриви) виконано орієнтовну експертну оцінку часових показників площової висхідної міграції забруднень з фрекінг-зони (ФЗ) у процесі потенційного видобутку СГ до ґрунтового водоносного горизонту — ГрВГ (на прикладі району свердловини 400-Біляївська). Встановлено, що в залежності від можливої мінливості значень проникності порід суцільного породного масиву (подвійної проникності) час досягнення з дифузійно-конвективною міграцією забруднень з ФЗ до рівня ГрВГ становитиме 170±70 років. Враховуючи балансове співвідношення об'єму води для розчинення забруднень до безпечних концентрацій з об'ємом порових розчинів, які залягають вище ФЗ, зроблено висновок, що залишки технологічних розчинів у ФЗ в окремих випадках здатні до довгострокового забруднення підземних вод зони уповільненого водообміну та зони активного водообміну.

**Ключові слова:** нетрадиційні вуглеводні, сланцевий газ, фрекінг-зони, висхідна міграція, підземні води, технологічні забруднення, матеріали дистанційного зондування Землі

© В. І. Лялько, О. Т. Азімов, Є. О. Яковлев. 2017

### Актуальність проблематики

Україна зацікавлена в одержанні нових енергетичних джерел на своїй території, оскільки широке використання занадто дорогих імпортованих вуглеводнів (ВВ), зокрема, природного газу, не дозволяє як підвищити загальний добробут населення, так і створити конкурентно спроможну експортну складову економіки держави. Тому слід підтримувати ті кроки владних структур, які спрямовані на енергозабезпечення та пошуки альтернативних джерел енергії.

У цьому плані слід розглядати і перспективи видобутку в Україні нетрадиційних (або неконвекційних) ВВ, до яких належить і сланцевий газ (СГ), не переносючи дискусії в політичну площину. Проте необхідно враховувати можливі екологічні ризики при закачуванні в надра технологічних розчинів гідророзриву гірських порід. Видобуток нетрадиційних типів ВВ пов'язаний з техногенним створенням у стиснутих газо- та нафтоводонасичених шарах, які залягають на глибинах порядку 2.5–4.5 км, просторово розвинутих зон високопроникної тріщинуватості. Для цього використовується

фрекінг-процес (ФП), який відрізняється від традиційного гідророзриву пластів високоенергетичним гідрогеомеханічним впливом на слабопроникні газо- та нафтоводонасичені шари шляхом нагнітання у горизонтальні (довжиною до 1.0–1.5 км і більше) або нахилені свердловини суміші з води (96–97%), піску (1.5–2%), хімічно- та поверхнево-активних речовин.

Аналіз технологічних параметрів ФП (тиски, динаміка пружно-пластичних деформацій фрекінг-зони — ФЗ, тріщиноутворення тощо) свідчить, що до однієї з основних еколого-техногенних загроз та геолого-економічних ризиків промислової розробки родовищ СГ в нафтогазоносних структурах України, порівняно з традиційними газовими родовищами, належить небезпека довгострокового забруднення підземної гідросфери, зокрема, стратегічно важливих горизонтів прісних вод питної якості та родовищ лікувальних мінеральних ресурсів унаслідок формування при використанні ФП деформацій регіональних водотривів, техногенних тріщинно-проникних зон з великою кількістю (тис.м<sup>3</sup>) токсичних технологічних сполук, радону та природних радіонуклідів, які здатні до міграції в підземні та поверхневі джерела питно-господарського водопостачання.

\* E-mail: azimov@casre.kiev.ua

Загалом у процесі техногенної еволюції гідрогеофільтраційної системи ФЗ можна виділити три фази [1, 7, 9, 10 та ін.]:

1) просторовий розвиток уздовж стовбура горизонтальної або нахиленої свердловини за умови пружно-пластичних деформацій мережі проникних тріщин, відкритість яких фіксується піщаним матеріалом при одночасному заповненні токсичним технологічним розчином; у процесі розвитку фрекінг-тріщинуватості існує ризик руйнівних деформацій вищезалігаючих слабопроникних шарів та периферійного розвитку гідравліко-фільтраційного зв'язку ФЗ з проникними тектонічними зонами; останнє є основою формування інжекційного висхідного потоку токсичних технологічних забруднень до прісноводних горизонтів зони активного водообміну (ЗАВ);

2) площова висхідна гідрогеоміграція у вигляді повільного дифузійно-конвективного потоку залишків маломінералізованих технологічних розчинів під впливом реологічного скорочення тріщинного простору ФЗ та їх зменшеної густини ( $\gamma_{\text{тв}} = 1\ 000\ \text{кг/м}^3$ ) порівняно з мінералізованими ( $M = 300\text{--}400\ \text{кг/м}^3$ ) поровими розчинами ( $\gamma_{\text{мв}} = 1\ 200\ \text{кг/м}^3$ ); екологічно небезпечною складо-

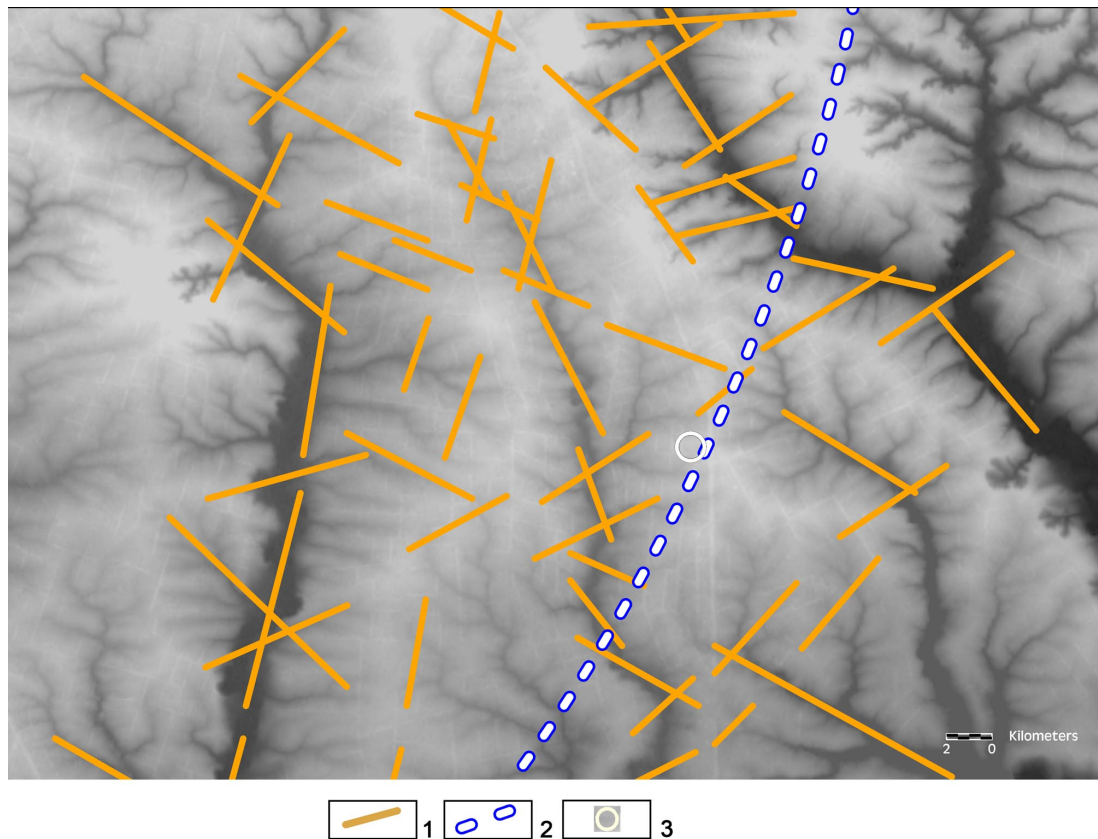
вою цієї фази розвитку ФЗ можна вважати поступове забруднення порових розчинів вищезалігаючих горизонтів зони уповільненого водообміну (ЗУВ) та ЗАВ;

3) розвиток у ФЗ гідрогеодеформаційного поля пружних напружень з накопиченням потенційної енергії та ризиком деформацій денної поверхні або проявів техногенних мілкофокусних землетрусів.

Стосовно особливостей першої фази нами встановлено [1, 7, 10 та ін.], що в залежності від можливої мінливості значень активної пористості тектонічної зони, наявності якої в районі розташованої поряд з Юзівською ліцензійною ділянкою Дніпровсько-Донецької западини свердловини 400-Біляївська прогнозується за даними дешифрування матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) (рис. 1, 2), час досягнення з міграцією забруднень з ФЗ рівня ґрунтового водоносного горизонту (ГрВГ) становитиме  $50 \pm 5$  років.

### Методологія дослідження

Орієнтовний час площової висхідної міграції технологічних забруднень ФЗ крізь суцільний породний масив (друга фаза) оцінюється виходячи з та-



**Рис 1.** Фрагмент картосхеми результатів регіонального структурного дешифрування комп'ютерно перетвореного сканерного SRTM-зображення, отриманого з космічного апарата Shuttle у лютому 2000 р.: 1 — основні лінеamenti, що відображають розломно-блоковий каркас кристалічного фундаменту та осадового чохла; 2 — контур мезоморфоструктури, віддешифрованої на космічних зображеннях високого рівня генералізації, яка ймовірно відображає пов'язану з підкоровим магматизмом структуру; 3 — місцеположення свердловини 400-Біляївська

кої умови. А саме: рушійним фактором висхідної гідрогеоміграції у цьому випадку є різниця густини прісноводного або мало/слабомінералізованого технологічного розчину ( $\gamma_{\text{тв}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ) та мінералізованих порових розчинів газовмісних порід ( $\gamma_{\text{мс}} = 1200 \text{ кг/м}^3$ ).

При глибині фрекінг-зони  $Z_{\text{фз}} = 3000 \text{ м}$  і лінійному зниженні різниці густини в інтервалі “зона фрекінгу-грунтового водоносного горизонту” середнє значення градієнта висхідної фільтрації ( $i_{\text{ф}}$ ) складе [9]:

$$i_{\text{ф}} = \frac{(\gamma_{\text{мс}} - \gamma_{\text{тв}}) Z_{\text{фз}}}{2 Z_{\text{фз}} \cdot \gamma_{\text{тв}}} = \frac{(1200 - 1000) \cdot 3000}{2 \cdot 3000 \cdot 1000} = 0,1. \quad (1)$$

За формулою Дарсі час висхідної фільтрації у суцільному породному масиві ( $t_{\text{нм}}$ ) вираховується як:

$$t_{\text{нм}} = \frac{Z_{\text{фз}}}{\left[ \frac{(k_{\text{нм}} \cdot i_{\text{ф}})}{n_{\text{нм}}} \right]}, \quad (2)$$

де  $k_{\text{нм}}$  — середня проникність суцільного породного масиву від ФЗ до ГрВГ;  $n_{\text{нм}}$  — активна пористість суцільного породного масиву (за даними лабораторних досліджень та математичного моделювання глибоких горизонтів ЗУВ, зокрема полігонів захоронення токсичних стоків [7, 8 та ін.],  $n_{\text{нм}} = 10^{-3}$ ).

За формулою Тіма-Каменського:

$$k_{\text{нм}} = \frac{Z_{\text{фз}}}{\left[ \frac{m_{\text{нп}}}{k_{\text{нп}}} + \frac{m_0}{k_0} \right]}, \quad (3)$$

де  $m_{\text{нп}}$  — товщина проникних шарів,  $m_{\text{нп}} \approx 500,0 \text{ м}$ ;  $k_{\text{нп}}$  — середній коефіцієнт фільтрації проникних шарів, за даними Д. Р. Литвака [6]  $k_{\text{нп}} = 2,0 \text{ м/добу}$ ;  $m_0$ ,  $k_0$  — відповідно, середні значення товщини і коефіцієнтів фільтрації слабопроникних (розділюючих) шарів (так званих регіональних водотривів). Середня товщина слабопроникних верств становить:

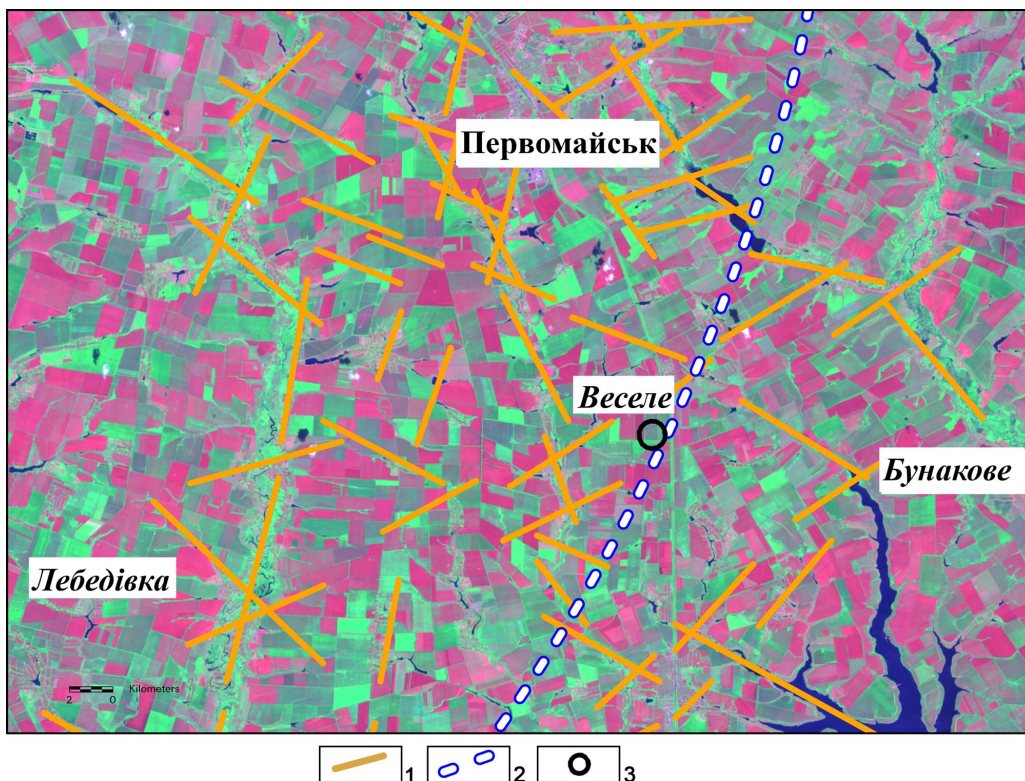
$$m_0 = (Z_{\text{фз}} - m_{\text{нп}}) = (3000 - 500) = 2500 \text{ м}. \quad (4)$$

За даними О. Б. Климчука [3, 4] щодо проникності карстово-провідних систем  $k_0 = (2 + 5) \cdot 10^5 \text{ м/добу}$ .

Використавши ці параметри, вираховуємо що

$$k_{\text{нм}} \approx \frac{3000}{\left[ \left( \frac{500}{2} \right) + \left( \frac{2500}{(2+5) \cdot 10^5} \right) \right]} = 24 \cdot 10^{-5} + 60 \cdot 10^{-5} \text{ м/добу}, \quad (5)$$

а орієнтовний час висхідної (дифузійно-конвективної) міграції технологічних забруднень крізь суцільний породний масив становитиме:



**Рис 2.** Фрагмент картосхеми результатів регіонального структурного дешифрування радіолокаційних даних ДЗЗ на фоні синтезованого сканерного багатозонального космічного знімка LANDSAT ETM+ з супутника LANDSAT-7 від 01.06.2002 р. (7-й, середній інфрачервоний (2) [2,09–2,35 мкм], 4-й, ближній інфрачервоний [0,75–0,90 мкм], і 2-й, зелений [0,525–0,605 мкм], канали), псевдокольори: 1, 2 — див. рис. 1; 3 — місцеположення свердловини 400-Біляївська

$$t_{nm} = \frac{3000}{\left[ \left( 2.4 \cdot 10^{-5} \div 6.0 \cdot 10^{-5} \right) \cdot 10^{-1} \right]} = 10^{-3} \quad (6)$$

= 2500 ÷ 63000 дб ≈ 70 ÷ 170 років.

Необхідно взяти до уваги, що в умовах геологічного середовища існує можливість значного зниження концентрації забруднень за рахунок впливу сорбції та регіонального руху підземного потоку в системі горизонтів ЗАВ.

Отримані оцінки швидкості висхідної міграції технологічних забруднень по проникних тектонічних зонах [1, 6, 10 та ін.] — від перших до десятків років, та крізь суцільний породний масив (від десятків до сотень років), враховуючи прискорення висхідних потоків унаслідок утворення у зоні фрекінгу газиво-водної емульсії, в'язкість якої у десятки разів менша, є орієнтовними. Тому прискорений висхідний рух із ФЗ вуглеводневих газів є фактором, який здатний призвести до зміни структури газогехімічного поля у верхній зоні геологічного середовища, насамперед унаслідок прискореної міграції газів по тектонічних і послаблених (так званих лінеаментних) зонах, які активізовані на неотектонічному етапі розвитку земної кори і добре виділяються на даних ДЗЗ. Таким чином, виявлення на початковій фазі проведення ФП зміни фонові структури газогехімічного поля є ознакою порушення гідрогеофільтраційної ізоляваності ФЗ, а також ознакою небезпеки забруднення горизонтів прісних підземних вод і поверхневих водних об'єктів.

Ризик геопросторового забруднення підземної гідросфери на площах видобутку СГ уявляється доцільним додатково оцінити за консервативною балансовою схемою співвідношення об'єму води для розчинення забруднень  $Q_{\text{сп}}$  до безпечних, або гранично допустимих концентрацій (ГДК)  $C_{\text{ГДК}}$  з об'ємом порових розчинів  $V_{\text{пр}}$ , які залягають вище ФЗ:

$$Q_{\text{сп}} = \frac{V_{\text{сп}}}{C_{\text{ГДК}}} \leq V_{\text{ни}} \cdot n_{\text{ни}} = V_{\text{пр}}, \quad (7)$$

де  $V_{\text{сп}}$ ,  $V_{\text{ни}}$  — відповідно, питомі об'єми залишкових токсичних розчинів у ФЗ та питомі об'єми порових вод у перекриваючому ФЗ породному масиві, за даними [2, 5]  $V_{\text{сп}} \approx 400 \text{ м}^3/\text{км}^2$ ;  $n_{\text{ни}}$  — загальна пористість порід вище ФЗ, за даними Д. Р. Литвака [7]  $n_{\text{ни}} = 0.2$ ; у більшості випадків  $C_{\text{ГДК}} \approx 0.1 - 1.0 \text{ мг}/\text{дм}^3$  (відносна доля  $10^{-7} - 10^{-6}$ ).

При глибині ФЗ  $Z_{\text{ФЗ}} = 3000 \text{ м}$   $V_{\text{ни}} = 3.0 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{км}^2$ .

З результату вирішення вищенаведеної балансової залежності слідує, що

$$Q_{\text{сп}} = \frac{400}{(10^{-7} \div 10^{-6})} = 4.0 \cdot 10^8 \div 4.0 \cdot 10^9 \text{ м}, \quad (8)$$

а об'єм порових вод вище ФЗ

$$V_{\text{ни}} \cdot n_{\text{ни}} = 3.0 \cdot 10^9 \cdot 0.2 = 6.0 \cdot 10^8 \text{ м}^3. \quad (9)$$

З метою визначення площ ділянок, які мають мінімальний ризик забруднення підземних і поверхневих вод при використанні технології фрекінга, нами була виконана геопросторова оцінка співвідношення площ оптимальних кластерів видобувних свердловин на неконвекційний газ та питомої щільності лінеаментів за даними ДЗЗ. Отримані результати засвідчили, що екологічно безпечні ділянки з видобутку неконвекційного газу в межах Юзівської ділянки складають 60–65%.

## Висновок

Отже, залишки технологічних розчинів у фрекінг-зонах у процесі видобутку нетрадиційних вуглеводнів в окремих випадках здатні до довгострокового забруднення підземних вод зони уповільненого водообміну та зони активного водообміну.

Одержані дані дозволяють дійти висновку про доцільність випереджаючого районування територій пошуково-розвідувальних робіт на нетрадиційні вуглеводні за геодинамічною стійкістю на основі комплексного аналізу матеріалів дистанційного зондування Землі та наземної газогехімічної зйомки.

## Література

1. Азімов О. Т. Оцінка ризику утворення гідравліко-фільтраційного зв'язку між геоструктурами у процесі видобування вуглеводнів з ущільнених колекторів на підставі комплексування аерокосмічних і гідрогеологічних даних / О. Т. Азімов, В. І. Лялько, Є. О. Яковлев // Матеріали наук.-практ. конф. "Питання пошуків, розвідки та екологічних аспектів видобування вуглеводнів з ущільнених колекторів, газосланцевих товщ та вуглевміщуючих пластів" (м. Київ, 3–4 черв. 2015 р.). — К: ТОВ "Полярон", 2015. — С. 19–21.
2. Геолого-екологічні дослідження (ГЕД-50) Зміївсько-Балаклійської промислової зони Харківської області: Звіт по роботах 1993–2002 рр. / [відп. виконавець В. В. Яковлев] / Харківська комплексна геологічна партія КП "Південукргеологія". — Харків, 2002. — 96 с.
3. Климчук А. Б. Гипогенный спелеогенез, его гидрогеологическое значение и роль в эволюции карста / А. Б. Климчук. — Симферополь: ДИАИПИ, 2013. — 180 с.
4. Климчук О. Б. Гипогенный спелеогенез, його гидрогеологічне значення та роль у еволюції карсту: Автореф. дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.06 "Гідрогеологія" / О. Б. Климчук / ІГН НАН України. — К., 2013. — 46 с.
5. Кобранова В. Н. Петрофізика / В. Н. Кобранова. — М: Недра, 1986. — 392 с.
6. Лялько В. І. Комплексування дистанційних і гідрогеологічних даних для оцінки ризику утворення гідравліко-фільтраційного зв'язку між геоструктурами у процесі видобутку сланцевого газу [Електронний ресурс] / В. І. Лялько, О. Т. Азімов, Є. О. Яковлев // Український журнал дистанційного зондування Землі. — 2014. — № 2. —

- С. 38–40. — Режим доступу: <http://www.ujrs.org.ua/ujrs/article/view/20/41>. — Назва з екрану.
7. О перспективной оценке эксплуатационных запасов подземных вод по Днепровско-Донецкому артезианскому бассейну (в пределах УССР): Отчет о НИР / Мингео УССР, Киев. Геологоразвед. трест, рук. Л. С. Крыжановский, соисполнители Д. Р. Литвак [и др.]. — Киев, 1977. — 606 с.
8. Шестопалов В. М. Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа: в 2 кн. / В. М. Шестопалов, В. И. Лялько, А. Б. Ситников [и др.] / Отв. ред. В. М. Шестопалов. — Киев: ИГН НАН Украины, НИЦ РПИ НАН Украины, 2001. — 635 с.
9. Azimov O. [2016] Estimation of the areal upward hydrogeomigration and risks of underground water polluting in the process of unconventional hydrocarbons extraction [Електронний ресурс] / O. Azimov, Y. Dorofey, V. Lyalko, Y. Yakovlev // Archives / EAGE. — Режим доступу: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=84611>. — Назва з екрану.
10. Lyalko V. I. [2015] Estimation the upward migration of pollutions during the shale gas production subject to the results of space images decoding [Електронний ресурс] / V. I. Lyalko, O. T. Azimov, Ye. O. Yakovlev // Archives / EAGE. — Режим доступу: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=80217>. — Назва з екрану.

#### ПРОГНОЗНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЫ В СВЯЗИ С ДОБЫЧЕЙ НЕТРАДИЦИОННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ ДАННЫХ)

В. И. Лялько, А. Т. Азимов, Е. А. Яковлев

В статье рассмотрена актуальность применения современных аэрокосмических и гидрогеологических методов в процессе решения задач экологической безопасности гидросферы при добыче в Украине нетрадиционных углеводородов, в частности, сланцевого газа (СГ). Приведены примеры пилотного внедрения этих методов в пределах примыкающей к Юзовскому лицензионному участку Беляевской площади Днепровско-Донецкой впадины как наибольшего в Украине артезианского бассейна. На основе учета гидрогеофильтрационных параметров многослойной системы (водоносные горизонты, недоскональные и доскональные региональные водоупоры) выполнена ориентировочная экспертная оценка временных показателей площадной восходящей миграции загрязнений из фрекинг-зоны (ФЗ) в процессе потенциальной добычи СГ к грунтовому водоносному горизонту — ГрВГ (на примере района скважины 400-Беляевская). Установлено, что в зависимости от возможной изменчивости значений проницаемости пород сплошного породного массива (удвоенной проницаемости) время достижения с диффузионно-конвективной миграцией загрязнений из ФЗ до уровня ГрВГ будет составлять 170 +70 лет. Учитывая балансовое соотношение объема воды для растворения загрязнений до безопасных концентраций с объемом поровых растворов, которые залегают выше ФЗ, сделан вывод, что остатки технологических растворов в ФЗ в отдельных случаях способны к долгосрочному загрязнению подземных вод зоны замедленного водообмена и зоны активного водообмена.

**Ключевые слова:** нетрадиционные углеводороды, сланцевый газ, фрекинг-зоны, восходящая миграция, подземные воды, технологические загрязнения, материалы дистанционного зондирования Земли

#### PREDICTIVE ASSESSMENT FOR THE POTENTIAL POLLUTION OF UNDERGROUND HYDROSPHERE DUE TO EXTRACTION OF UNCONVENTIONAL HYDROCARBONS (USING REMOTE SENSING DATA)

V. I. Lyalko, O. T. Azimov, Ye. O. Yakovlev

The article considers the relevance of the application of modern remote aerospace and hydrogeological methods in the problems of the ecological safety for the hydrosphere in Ukraine during unconventional hydrocarbons extraction, especially shale gas is considered. Case studies of pilot implementation of these methods are present for the Bilyaivska area adjacent to the Yuzivka licensed site within the Dnieper-Donets Depression as the biggest artesian basin within Ukraine. A number of the hydrogeological filtration parameters of multilayers' system (water aquifers, aquitard and aquiclude regional layers) enable to obtain the rough estimate of the temporal indices for the areal upward pollutant migration from the fracturing zone to the groundwater aquifers in the potential process of shale gas production (as an example the 400-Bilyaivska well). It is found that the possible variety of the rock double permeability in the complete rock continuum is responsible for the passage time of diffusive-convective pollutant migration from the fracturing zone to the groundwater aquifers, and this time interval consists of 170 +70 years. Considering the balance ratio between the water volume for the dilution of pollutants to the safe concentrations and the volume of porous solutions, which is over the fracturing zone the conclusion is drawn that remains of technological solutions in the fracturing zone in some cases can continuously contaminate the underground water within the zones of slow and active water exchange.

**Key words:** unconventional hydrocarbons, shale gas, fracturing zones, up-going migration, underground waters, technological pollutions, remote sensing data