

Д. А. Бугай<sup>1</sup>, Э. Фурре<sup>2</sup>, П. Жан-Баптист<sup>2</sup>, А. Дапонь<sup>2</sup>, Д. Бомьер<sup>2</sup>, К. Ле Галь Ла Саль<sup>3</sup>, Ж. Ланселот<sup>3</sup>, А.С. Скальский<sup>1</sup>, Н. Ван Меер<sup>4</sup>

## ОЦЕНКА ВОДООБМЕНА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ЧАЭС НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ИЗОТОПНОГО ДАТИРОВАНИЯ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

(Рекомендовано д-ром геол.-минерал. наук Н. С. Огняником)

Наведені дослідження з оцінки віку підземних вод у безнапірному водоносному горизонті в піщаних четвертинних відкладах на міжнародному експериментальному радіоекологічному полігоні в ближній зоні ЧАЕС з використанням "третій — гелій-3" ( $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ ) методу. Виконана інтерпретація одержаних даних на основі фільтраційної моделі. Отримане добре узгодження ізотопних датувань і результатів моделювання. На підставі результатів досліджень встановлено, що величина середньобагаторічного (за останні 60 років) інфільтраційного живлення підземних вод становить близько 200 мм/рік на ділянці першої надзаплавної тераси р. Прип'ять в ближній зоні ЧАЕС. Успішний досвід використання  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$  методу створює передумови для його більш широкого застосування при дослідженні водообміну і процесів міграції радіонуклідів у підземних водах у зоні ЧАЕС.

Studies on estimation of age of groundwater from the unconfined aquifer in sandy Quaternary deposits at the international radioecological experimental site at Chernobyl nuclear power plant site using "tritium — helium-3" ( $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ ) method are presented. Interpretation of the obtained data was carried out using groundwater flow modeling. A good agreement in isotope dating estimates and groundwater modeling data was obtained. Results of these studies suggest that the long-term (during last 60 years) infiltration recharge rate at the first terrace of the Pripjat River constituted  $\approx 200$  mm/y. Successful application of  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$  method creates preconditions for its more wide application for studies of water exchange and radionuclide migration in groundwater at Chernobyl site.

### Вступление

#### Задачи исследований

Ниже представлены результаты, полученные в рамках международного радиоэкологического проекта "Экспериментальная платформа в Чернобыле", который выполняется Институтом геологических наук (ИГН) НАН Украины в сотрудничестве с французским Институтом ядерной безопасности и радиационной защиты (ИРСН), при участии ряда других лабораторий и университетов, начиная с 2000 г. и по сегодня [1]. Исследования миграции радионуклидов Чернобыльского выброса в геологической среде проводятся на экспериментальном участке—полигоне в Чернобыльской зоне отчуждения, который был оборудован в окрестности траншеи с радиоактивными отходами (РАО) на участке захороненного "Рыжего леса" на расстоянии 2,5 км от ЧАЭС.

Одно из важных направлений полигонных исследований состоит в изучении параметров водообмена (таких как инфильтрационное питание, действительная скорость фильтрации подземных вод и др.) в первом от поверхности безнапорном водоносном горизонте в четвертичных отложениях, где происходит геомиграция радионуклидов из исследуемого захоронения РАО. С этой целью в 2008—2009 гг. была выполнена программа исследований по датировке возраста подземных вод на полигоне с использованием изотопных методов, в частности "третий — гелий-3" ( $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ ) метода (подробное описание этого метода приведено ниже) [3]. Изотопные анализы были выполнены в Лаборатории исследований климата и окружающей среды Комиссариата по атомной энергии Франции (г. Гиф-сюр-Ивет, Франция). Аналитические исследования были дополнены проведенными в ИГН НАН Украины работами по моделированию геофильтрационных процессов, что позволило проинтерпретировать полученные изотопные датировки возраста подземных вод и оценить параметры водообмена.

© Д. А. Бугай, Э. Фурре, П. Жан-Баптист, А. Дапонь, Д. Бомьер, К. Ле Галь Ла Саль, Ж. Ланселот, А. С. Скальский, Н. Ван Меер, 2010

## Гидрогеологические условия экспериментального участка

В геоморфологическом отношении экспериментальный участок расположен в центральной части первой террасы р. Припять (рис. 1). Абсолютные отметки поверхности земли составляют 113—115 м. Верхняя часть геологического разреза сложена песчаными верхнеплейстоценовыми и голоценовыми отложениями, которые подразделяются на эоловую и аллювиальные свиты. Суммарная мощность этих отложений составляет около 30 м. Ниже залегает региональный водоупорный слой, состоящий из мергельных глин киевской свиты эоцена [3].

Экспериментальный участок находится в области транзита регионального потока подземных вод, направленного из возвышенного района Чистоголовской моренной гряды (междуречье Уж — Припять) в направлении основного контура разгрузки — р. Припять (рис. 1). Зона активного водообмена включает безнапорный водоносный горизонт в четвертичных песчаных отложениях (основной объект исследований в рамках проекта) и залегающий ниже по разрезу отделенный киевскими мергелями напорный водоносный горизонт в эоценовых песчаных отложениях [1].

Более подробное описание геологического строения и гидрогеологических усло-

вий экспериментального участка представлено в работах [1, 5].

## Датировки возраста подземных вод на основе "тритий — гелий-3" метода

### Описание "тритий — гелий-3" метода

Радиоактивный изотоп водорода тритий ( $^3\text{H}$ ) (период полураспада 12,3 года) производится в верхних слоях атмосферы вследствие их бомбардировки космическим излучением. Кроме того, большое количество трития поступило в атмосферу в период наземных испытаний ядерного оружия в 50—60-е годы XX в. (так называемый "бомбовый" тритий) [6]. Продуктом бета-распада трития является редкоземельный стабильный изотоп гелий-3 ( $^3\text{He}$ ). Метод изотопного датирования подземных вод на основе пары "тритий — дочерний гелий-3" ( $^3\text{H}—^3\text{He}$ ) состоит в измерении соотношения этих изотопов и в оценке по накоплению  $^3\text{He}$  возраста воды с момента последнего обмена воды растворенными газами с атмосферой. В связи с небольшим периодом полураспада трития и аналитическими сложностями измерения его малых активностей этот метод позволяет напрямую измерить возраст относительно "молодой" подземной воды (менее 60—70 лет). К преимуществам метода относится то, что и тритий, и гелий-3

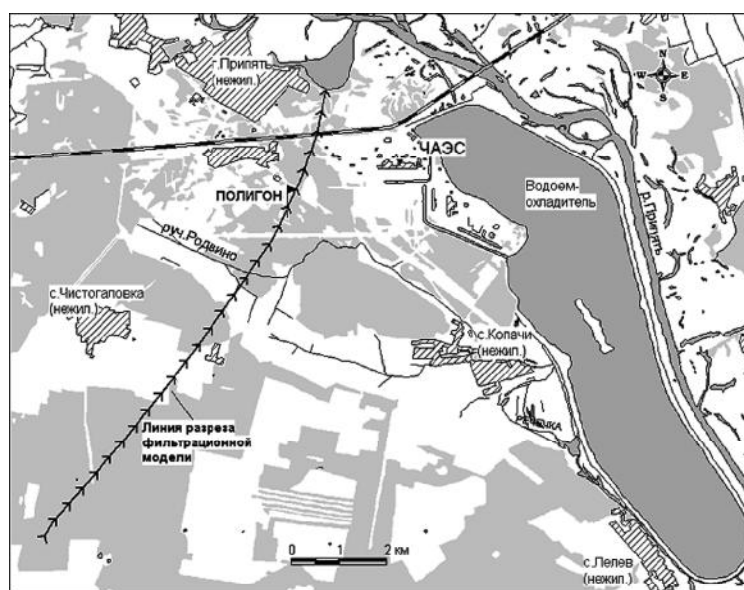


Рис. 1. Схема района исследований с линией разреза профильной фильтрационной модели

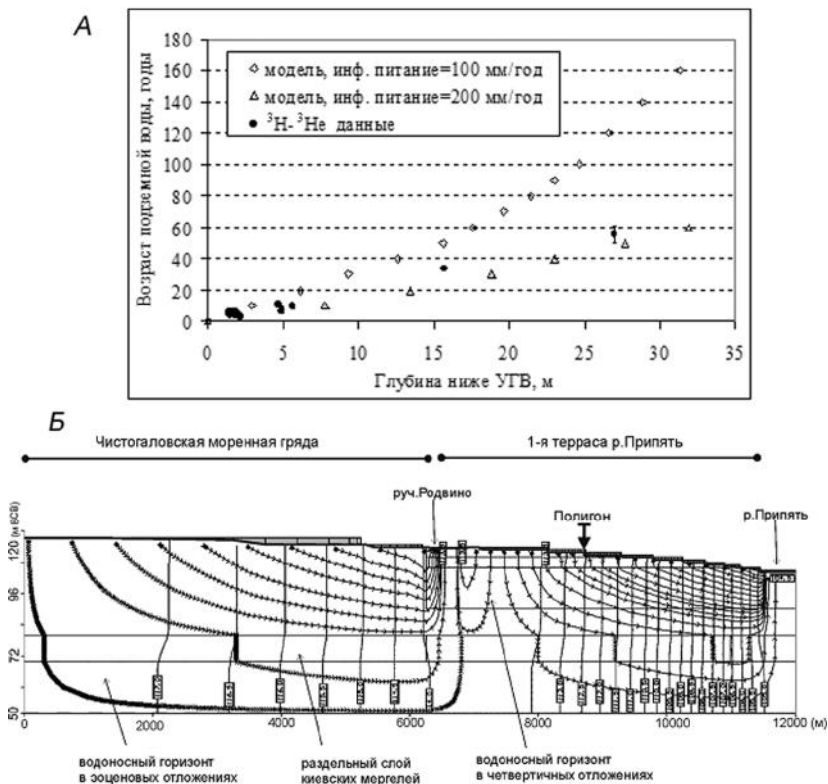


Рис. 2. Результаты моделирования профильной двухмерной фильтрации в безнапорном водоносном горизонте в четвертичных отложениях и напорном водоносном горизонте в эоценовых отложениях в ближней зоне ЧАЭС

А — Графики возраста подземных вод в зависимости от глубины в водоносном горизонте в четвертичных отложениях: результаты моделирования в сравнении с данным <sup>3</sup>Н-<sup>3</sup>Не датирования

Б — Гидродинамическая сетка подземных вод (расстояние между стрелками на линиях тока соответствует пути фильтрации за 10 лет)

являются консервативными трассерами (не взаимодействующими с матрицей грунтов и горных пород), а также то, что этот метод не требует знания "истории" поступления трития в водоносный горизонт [4].

Соответствующий <sup>3</sup>Н-<sup>3</sup>Не возраст воды ( $\tau$ ) определяется по формуле:

$$\tau = \lambda^{-1} \ln(1 + {}^3\text{He}_{\text{tri}} / {}^3\text{H}),$$

где  $\lambda$  — константа радиоактивного распада трития; <sup>3</sup>Н — измеренная концентрация трития в пробе воды; <sup>3</sup>He<sub>tri</sub> — концентрация гелия-3, которая накопилась в образце воды вследствие распада трития. Концентрация трития обычно выражается в тритиевых единицах (ТЕ). 1 ТЕ соответствует соотношению <sup>3</sup>Н/<sup>1</sup>Н, составляющему 10<sup>-18</sup>.

В свою очередь, концентрация гелия-3, обусловленная своим генезисом распада трития, рассчитывается по формуле

$${}^3\text{He}_{\text{tri}} = {}^3\text{He}_{\text{meas}} - {}^3\text{He}_{\text{atm}} - {}^3\text{He}_{\text{ter}},$$

где <sup>3</sup>He<sub>meas</sub> — измеренная концентрация гелия-3 в образце, которая корректируется на <sup>3</sup>He<sub>atm</sub> — концентрацию изотопа атмосферного происхождения, а также <sup>3</sup>He<sub>ter</sub> — "терогенную" концентрацию (вследствие продуцирования гелия-3 в горных породах при реакциях радиоактивного распада радионуклидов уран-ториевого ряда).

Концентрации <sup>3</sup>He<sub>atm</sub> и <sup>3</sup>He<sub>ter</sub> могут быть оценены по измеренным концентрациям изотопов гелия-4 (<sup>4</sup>He<sub>meas</sub>) и неона (<sup>20</sup>Ne<sub>meas</sub>) в образце воды с использованием следующего набора уравнений (1) — (5) [3, 4]:

$${}^{20}\text{Ne}_{\text{meas}} = {}^{20}\text{Ne}_{\text{atm}}, \quad (1)$$

$${}^4\text{He}_{\text{meas}} = {}^4\text{He}_{\text{atm}} + {}^4\text{He}_{\text{ter}}, \quad (2)$$

$${}^4\text{He}_{\text{atm}} / {}^{20}\text{Ne}_{\text{atm}} = \alpha \quad (3)$$

(здесь  $\alpha$  — отношение растворимостей соответствующих газов при температуре инфильтрационного питания подземных вод, в данном случае принятой 8±0,5°С),

$${}^3\text{He}_{\text{atm}}/{}^4\text{He}_{\text{atm}} = R_a \times 0,985 \quad (4)$$

(отношение растворимостей изотопов при соотношении атмосферных концентраций  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$   $R_a = 1,38 \times 10^{-6}$ ),

$${}^3\text{He}_{\text{ter}}/{}^4\text{He}_{\text{ter}} = 2 \times 10^{-8} \quad (5)$$

(типичное изотопное соотношение при радиационном продуцировании гелия в горных породах).

Подробное описание лабораторных методик и аналитических методов определения перечисленных выше изотопов приведено в работе [4].

### **Результаты определений ${}^3\text{H}$ - ${}^3\text{He}$ возраста подземных вод для ближней зоны ЧАЭС**

Изотопные датировки выполнены для образцов подземной воды, отобранных на полигоне в рамках проекта "Экспериментальная платформа в Чернобыле" в октябре 2008 г. [3]. Всего было исследовано 15 проб воды, взятых из безнапорного водоносного горизонта в четвертичных отложениях в диапазоне глубин от 1 до 27 м ниже уровня грунтовых вод (УГВ). Большая часть проб была отобрана из верхней части водоносного горизонта (в диапазоне глубин до 5 м ниже УГВ), где имеется подробная сеть наблюдательных скважин, предназначенных для характеристики ореола радиоактивно загрязненных подземных вод в окрестности траншеи с РАО. Кроме того, было отобрано три пробы из оборудованного на участке глубокого куста скв. 1-98-1, 1-98-2 и 1-98-3 (глубиной соответственно 6, 16 и 27 м ниже УГВ), которые позволяют охарактеризовать состав подземной воды в средней части и на нижних отметках водоносного горизонта в четвертичных отложениях. Для большинства проб аналитические определения были выполнены в двойной повторности.

Результаты определений приведены на рис. 2, А. Прослеживается хорошо выраженный тренд увеличения возраста воды с глубиной в водоносном горизонте. Для проб воды в диапазоне глубин от 1,3 до 2,1 м ниже УГВ возраст воды оценивается в  $(3,3-6,4) \pm 1$  года от момента поступления в водоносный горизонт. Для скважин глубиной 4,7—5,6 м ниже УГВ (для центра фильтра) возраст воды составляет  $(6,2-10,6) \pm 1,5$  года. Для скв. 1-98-2 глубиной 15,7 м ниже

УГВ возраст воды оценивается  $33,7 \pm 1,5$  года. Наконец, для наиболее глубокой пробы из скв. 1-98-3 (27 м ниже УГВ) возраст воды датируется цифрой  $55,5 \pm 5$  лет, что приблизительно соответствует 1953 г. Такая ранняя датировка этой пробы подтверждается также низким содержанием трития ( $0,35$  ТЕ), что соответствует "добомбовому" уровню трития в атмосфере Земли.

### **Интерпретация данных с использованием профильной фильтрационной модели ближней зоны ЧАЭС**

#### **Описание фильтрационной модели**

Для моделирования гидрогеологических условий ближней зоны ЧАЭС и интерпретации данных изотопного датирования подземных вод была построена двухмерная профильная фильтрационная модель регионального масштаба (размер по горизонтали 12 км). Модель охватывает район от водораздела подземных вод на участке Чистоголовской моренной гряды (юго-восточная оконечность) до р. Припять, являющейся региональным контуром разгрузки подземных вод (северо-восточная оконечность) (рис. 1). Модель учитывает водообмен в двух основных водоносных горизонтах в четвертичных и эоценовых отложениях.

Модель реализована с использованием программного обеспечения Visual Modflow 2.7.1 (Waterloo Hydrogeologic Inc.). Для параметризации модели была применена база данных параметров региональной трехмерной фильтрационной модели Чернобыльской зоны отчуждения, охватывающей территорию  $30 \times 30$  км, которая была разработана ранее в ИГН Украины [2]. Моделируемый профиль ориентирован вдоль ленты тока подземных вод, которая была выделена на основании моделирования фильтрации на указанной трехмерной фильтрационной модели. В данном случае использование двухмерной модели имеет ряд преимуществ (по сравнению с трехмерной моделью): такая модель требует существенно меньших компьютерных ресурсов и времени расчета; двухмерная модель позволяет обеспечить лучшее пространственное разрешение для исследуемого

(моделируемого) участка; на такой модели проще проводить анализ чувствительности параметров; для рассматриваемой модели естественным образом задаются краевые условия.

### **Результаты моделирования**

Выполненный в ходе моделирования анализ чувствительности показал, что ключевым параметром влияющих на распределение времен фильтрации (возраста) подземных вод в профильном сечении водоносного горизонта является инфильтрационное питание подземных вод. Кроме того, выяснилось, что коэффициенты фильтрации пород основных водоносных горизонтов представляют собой менее чувствительные параметры.

На рис. 2, Б представлена гидродинамическая сетка фильтрации (эквипотенциали напора и линии тока) подземных вод по результатам моделирования. Региональный фильтрационный поток, который формируется на возвышенном водораздельном пространстве Чистогаловской моренной гряды, дренируется поверхностным водотоком (мелиорированный ручей Родвино) в центральной части рассматриваемого двумерного профиля фильтрации подземных вод. Атмосферные осадки, инфильтрующиеся в безнапорный водоносный горизонт в пределах первой надпойменной террасы р. Припять (где расположен исследуемый экспериментальный участок), формируют поток подземных вод, который в основном разгружается в р. Припять. Результаты моделирования, в частности, показывают, что (1) участок Чистогаловской моренной гряды и (2) первая надпойменная терраса р. Припять в пределах рассматриваемого профиля представляют собой относительно независимые участки водообмена в двух первых от поверхности водоносных горизонтах.

Полученное на модели распределение линий тока в поперечном сечении водоносных горизонтов позволяет рассчитать возраст подземных вод на различной глубине безнапорного водоносного горизонта в четвертичных отложениях. На рис. 2, А приведены результаты расчетов для двух значений инфильтрационного питания подзем-

ных вод в пределах первой надпойменной террасы р. Припять — 100 и 200 мм/год. На этом же графике представлены экспериментальные точки на основе  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$  датировок подземных вод.

Видно, что данные  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$  датирования, в целом, хорошо соотносятся с результатами моделирования для значения инфильтрационного питания  $\epsilon \approx 200$  мм/год. Такое значение инфильтрационного питания составляет примерно 40% от среднемноголетней суммы атмосферных осадков.

### **Выводы**

В результате выполненных исследований получено хорошее соответствие в данных датировки возраста подземных вод с использованием "третий — гелий-3" метода с данными моделирования фильтрационных процессов. Сопоставление изотопных датировок с фильтрационными расчетами свидетельствует о среднемноголетнем инфильтрационном питании подземных вод (за последние 60 лет) около 200 мм/год на участке первой надпойменной террасы р. Припять в ближней зоне ЧАЭС. Заметим, что указанное значение согласуется и с другими полученными ранее оценками инфильтрационного питания для исследуемого участка за период 2000—2003 гг. (в частности, с оценками по методу Биндемана и по гидрофизическому методу) [1].

Полученные нами оценки параметров водообмена в геологической среде на участке первой надпойменной террасы р. Припять могут быть использованы для гидрогеологического моделирования (например, в связи с оценками безопасности и др.) для ряда важных объектов в ближней зоне ЧАЭС, таких как могильники радиоактивных отходов, объект "Укрытие", новый безопасный конфайнмент и другие объекты.

Представленный выше успешный опыт применения  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$  метода для датирования подземных вод создает предпосылки для более широкого его использования в гидрогеологических исследованиях в зоне ЧАЭС. Авторы статьи планируют применить этот метод для изучения водообмена для других геоморфологических районов ближней зоны ЧАЭС (пойменные участки р. Припять, Чистогаловская моренная гряда) и

других водоносных горизонтов (напорный водоносный горизонт в эоценовых отложениях) в связи с изучением процессов водообмена и миграции радионуклидов в подземных водах Чернобыльской зоны отчуждения.

Представленные нами результаты исследований получены в рамках партнерского проекта Украинского научно-технологического центра № P170a "Экспериментальная платформа в Чернобыле" (финансируется IRSN, Франция), проекта 1B GNR TRASSE (IRSN-CNRS, Франция, 2008—2010), а также бюджетной темы Национальной академии наук Украины Ш-11-06.

1. Бугай Д. О., Девієр Л., Скальський О. С. та ін. Дослідження міграції радіонуклідів на експериментальній ділянці-полігоні в ПТЛРВ "Рудий ліс". Ч. 2: Міграція радіонуклідів в геологічному середовищі // Бюл. екол. стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. — 2007. — № 2 (30). — С. 16—33.
2. Скальський А. С., Кубко Ю. И. Фильтрационные модели района ЧАЭС // Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Ч. 2. Моделирование водообмена и миграции радионуклидов в гидрогеологических структурах. — Киев, 2001. — С. 462—494.
3. Fourre E., Jean-Baptiste P., Dapoigny A. et al. Tritium/helium-3 dating of groundwater around Chernobyl site. Paper presented at Goldsmith 2010 Conference: Earth, energy and the environment, 13—18 June 2010, Knoxville, Tennessee, USA.

4. Jean-Baptiste P., Mantsi F., Dapoigny A., Stievenard M. Design and performance of a mass spectrometric facility for measuring helium isotopes in natural waters and for low-level tritium determination by the  $^3\text{He}$  ingrowth method // Appl. Radiat. Isot. — 1992. — Vol. 43. — P. 881—891.
5. Matoshko A., Bugai D., Dewiere L., Skalskyy A. Sedimentological study of the Chernobyl NPP site to schematize radionuclide migration conditions // Env. Geol. — 2004. — Vol. 46. — P. 820—830.
6. Solomon D. K., Cook P. G.  $^3\text{H}$  and  $^3\text{He}$  // Environmental tracers in subsurface hydrology. — Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. — P. 396—424.

<sup>1</sup>Ин-т геол. наук НАН Украины,  
Киев  
E-mail: dmitri.bugay@gmail.com

Статья поступила  
13.09.10

<sup>2</sup>Laboratoire des Sciences du Climat  
et de l'Environnement, IPSL/CEA-CNRS-UVSQ,  
Gif sur Yvette, France  
E-mail: elise.fourre@lscce.ipsl.fr

<sup>3</sup>Geochemie Isotopique environnementale,  
GIS-CEREGE, UMR6633, Nimes, France  
E-mail: corinne.legallasalle@unimes.fr

<sup>4</sup>Institute for Radiation Protection  
and Nuclear Safety, IRSN,  
Fontenay-aux-Roses, France  
E-mail: nathalie.van-meir@irsn.fr