

УДК 519.6

NUMERICAL SIMULATION OF GROUND WATERS CONTAMINATION AND PROTECTION

BILIAIEVA V. V.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Associate Prof.*,
SMALII D. YU.^{2*}, *postgraduate*,
PERKIN V.³, *stud.*,

^{1*} Department of «Fluid Dynamics, Energy and Mass Transfer», Dnipropetrovsk National University after Oles Gonchar, Gagarin avenue, 72, Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 760-91-07, e-mail: mushkacom00@mail.ru, ORCID 0000-0003-2399-3124

² Department of «Fluid Dynamics, Energy and Mass Transfer», Dnipropetrovsk National University after Oles Gonchar, Gagarin avenue, 72, Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 760-91-07, e-mail: d.smalii@yandex.ua, ORCID 0000-0001-9179-6240

³ Department of «Fluid Dynamics, Energy and Mass Transfer», Dnipropetrovsk National University after Oles Gonchar, Gagarin avenue, 72, Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 760-91-07, e-mail: prekin.vitalii@yandex.ua, ORCID 0000-0003-0115-5269

Abstract. Purpose. Development of a numerical model to calculate the dynamics of ground waters contamination after spillages at railways and ground waters protection by using underground wall. **Methodology.** For the numerical simulation of contaminant transport in ground waters the 2D transport equation is used. This equation takes into account the effect of ground waters speed, dispersion process, the intensity of emission. For the numerical integration of the governing equation of contaminant transport the implicit finite-difference splitting scheme is used. The numerical calculation is divided into fifth steps of splitting and at each step of splitting the unknown value of the contaminant concentration is determined by the explicit scheme which is called “scheme of running calculation”. On the basis of the numerical model generic model was developed. To code the finite – difference equations FORTRAN language was used. Computational experiments were carried out to estimate the possible contamination zone after spillage at Pridneprovskaya railway. **Findings.** The proposed model allows you to calculate the ground waters contamination due to the spillage of different cargo at railways. The model allows to determine the size of the ground waters contamination and its dynamics after spillage at railways. This model also allows to predict the contamination area development in the case of underground wall application to reduce dimensions of contamination area. Results of numerical experiments are presented. **Originality.** An efficient numerical model allowing to calculate quickly the ground waters contamination after spillages at railways was developed. **Practical value.** The developed numerical model can be used to estimate the size and intensity of contamination zone after spillages at railways. With the help of the developed numerical model it is possible to solve the problem of assessing the impact of accident spillage at railways and develop protection measures.

Keywords: ground waters pollution; numerical simulation; underground wall

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ЗАЩИТА

БЕЛЯЕВА В. В.¹, *к.т.н, доц.*,
СМАЛИЙ Д. Ю.^{2*}, *асп.*,
ПЕРКИН В.³, *студ.*,

¹ Кафедра «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени Олеса Гончара, проспект Гагарина, 72, Днипро, 49010, Украина, тел. +38 (056) 760-91-07, e-mail: mushkacom00@mail.ru, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{2*} Кафедра «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени Олеса Гончара, проспект Гагарина, 72, Днипро, 49010, Украина, тел. +38 (056) 760-91-07, e-mail: d.smalii@yandex.ua, ORCID 0000-0001-9179-6240

^{3*} Кафедра «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени Олеса Гончара, проспект Гагарина, 72, Днипро, 49010, Украина, тел. +38 (056) 760-91-07, e-mail: prekin.vitalii@yandex.ua, ORCID 0000-0003-0115-5269

Аннотация. Цель. Разработка численной модели для расчета динамики загрязнения подземных вод после разливов на железных дорогах и защиты подземных вод с использованием подземных стенок. **Методика.** Для численного моделирования переноса загрязнений в грунтовых водах используется двумерное уравнение переноса. Это уравнение учитывает влияние скорости грунтовых вод, дисперсионного процесса, интенсивности эмиссии. Для численного интегрирования моделирующего уравнения переноса загрязнений используется неявная конечно-разностная схема расщепления. Численный расчет разделен на пять этапов расщепления, и на каждом этапе расщепления неизвестное значение концентрации загрязнителя определяется по явной схеме, которая называется «схемой бегущего счета». На основе численной модели была разработана общая модель. Для кодирования конечно-разностных уравнений использовался ФОРТРАН. Проведены вычислительные эксперименты для оценки возможной зоны загрязнения после разлива на Приднепровской железной

дороге. **Результаты.** Предложенная модель позволяет рассчитать загрязнение подземных вод в результате разлива различных грузов на железных дорогах. Модель позволяет определить размер загрязнения грунтовых вод и его динамику после разлива на железных дорогах. Эта модель также позволяет прогнозировать развитие зоны загрязнения в случае применения подземных стен для уменьшения размеров зоны загрязнения. Приводятся результаты численных экспериментов. **Научная новизна.** Разработана эффективная численная модель, позволяющая быстро рассчитать загрязнение грунтовых вод после разливов на железных дорогах. **Практическая значимость.** Разработанную численную модель можно использовать для оценки размера и интенсивности зоны загрязнения после разливов на железных дорогах. С помощью разработанной численной модели можно решить проблему оценки воздействия аварийных разливов на железных дорогах и разработать меры защиты.

Ключевые слова: загрязнение грунтовых вод; численное моделирование; подземная стена

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД І ЗАХИСТ

БІЛЯЄВА В. В.¹, к.т.н, доц.,
СМАЛІЙ Д. Ю.^{2*}, асп.,
ПЕРКІН В.³, студ.,

¹ Кафедра «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, проспект Гагаріна, 72, Дніпро, 49010, Україна, тел. +38 (056) 760-91-07, e-mail: mushkacom00@mail.ru, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{2*} Кафедра «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, проспект Гагаріна, 72, Дніпро, 49010, Україна, тел. +38 (056) 760-91-07, e-mail: d.smalii@yandex.ua, ORCID 0000-0001-9179-6240

^{3*} Кафедра «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, проспект Гагаріна, 72, Дніпро, 49010, Україна, тел. +38 (056) 760-91-07, e-mail: prekin.vitalii@yandex.ua, ORCID 0000-0003-0115-5269

Анотація. Мета. Розробка чисельної моделі для розрахунку динаміки забруднення підземних вод після розливів на залізницях і захисту підземних вод з використанням підземних стінок. **Методика.** Для чисельного моделювання переносу забруднень в ґрунтових водах використовується двовимірне рівняння переносу. Це рівняння враховує вплив швидкості ґрунтових вод, дисперсійного процесу, інтенсивності емісії. Для чисельного інтегрування моделюючого рівняння переносу забруднень використовується неявна кінцево-різницева схема розщеплення. Чисельний розрахунок розділений на п'ять етапів розщеплення, і на кожному етапі розщеплення невідоме значення концентрації забруднювача визначається за явною схемою, яка називається «схемою біжучого рахунку». На основі чисельної моделі була розроблена загальна модель. Для кодування кінцево-різницевого рівнянь використовувався ФОРТРАН. Проведено обчислювальні експерименти для оцінки можливої зони забруднення після розливу на Придніпровській залізниці. **Результати.** Запропонована модель дозволяє розрахувати забруднення підземних вод в результаті розливу різних вантажів на залізницях. Модель дозволяє визначити розмір забруднення ґрунтових вод і його динаміку після розливу на залізницях. Ця модель також дозволяє прогнозувати розвиток зони забруднення у разі застосування підземних стін для зменшення розмірів зони забруднення. Наводяться результати чисельних експериментів. **Наукова новизна.** Розроблено ефективну чисельну модель, що дозволяє швидко розрахувати забруднення ґрунтових вод після розливів на залізницях. **Практична значимість.** Розроблену чисельну модель можна використовувати для оцінки розміру та інтенсивності зони забруднення після розливів на залізницях. За допомогою розробленої чисельної моделі можна вирішити проблему оцінки впливу аварійних розливів на залізницях і розробити заходи захисту.

Ключові слова: забруднення ґрунтових вод; чисельне моделювання; підземна стіна

Introduction

Railway transport carries a huge amount of liquid cargo. Different accidents at railways result in spillage of dangerous products which cause soil and ground waters contamination [1, 7, 8, 14]. This demands solving two main problems. The first problem is prediction of ground waters contamination and the second problem is development of protection measures. To predict the damage after these spills it is necessary to employ mathematical models. Very often to solve the problem of ground waters contamination analytical or empirical

models are used [5, 6, 10, 12, 13]. These models are restricted enough. Numerical models represent more effective tool and help in predicting the process of ground waters contamination after spills [2-4, 9, 11, 15]. For a quick evaluation of spatial and temporal contamination of ground waters it is important to develop not time consuming numerical models.

Purpose

The purpose of this work is development of 2-D numerical model for prediction of ground waters pollution after accident spillages at railways.

Methodology

Mathematical model. Contamination of ground waters pollution in the case of accident spillage is simulated using 2-D transport equation [2,11, 14]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum q_i(t) \delta(x-x_i(t)) \delta(y-y_i(t)), \quad (1)$$

where C is concentration of the solute; u, v are the velocity components in the x and y directions; σ is the reaction rate constant; μ_x, μ_y are dispersion coefficients; $q_i(t)$ is source terms; $\delta(x-x_i(t)) \delta(y-y_i(t))$ are Dirac delta function; x_i, y_i are the coordinates of the point source of pollution.

This equation is numerically integrated using the following boundary conditions:

- at the entrance boundaries we use the boundary condition:

$$C|_{boundary} = C_{etr},$$

where C_{etr} is known concentration (for example $C_{etr} = 0$);

- at the exit boundaries so called “mild boundary condition” is used. For example, in the numerical model it can be written as following:

$$C(i+1, j) = C(i, j),$$

where $(i+1, j)$ is the last computational cell and (i, j) is the previous computational cell.

The initial condition (at time $t=0$) can be written as $C=0$ in the whole computational region or $C=C_0$, where C_0 is the known concentration in ground waters under the spillage took place. In this case $C=0$ in the other part of the computational region.

Numerical model. To solve transport equation (1) the implicit change – triangle scheme is used [14]. The main features of this scheme are shown below. To build the scheme we perform the splitting of the transport equation at the differential level.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial x} + \sigma c &= 0, \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= \sum q_i(t) \delta(r-r_i). \end{aligned}$$

where $r_i = (x_i, y_i)$.

After that the approximation of time dependent derivative is used:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta t}.$$

At the next step the convective derivatives are represented as follows:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

where $u^+ = \frac{u+|u|}{2}$, $u^- = \frac{u-|u|}{2}$, $v^+ = \frac{v+|v|}{2}$, $v^- = \frac{v-|v|}{2}$.

At the second step the convective derivatives are approximated as following:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

The second order derivatives are approximated as following:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = \\ &= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}. \end{aligned}$$

In these expressions $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-, M_{xx}^+, M_{xx}^-$ are the difference operators.

At the next step we write the finite difference scheme of splitting:

- at the first step $k=1/4$:

$$\frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{2} C_{ij}^n = 0;$$

- at the second step $k=1/2, c=n+1/4$:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{2} C_{ij}^k = 0;$$

- at the third step $k=3/4, c=n+1/2$:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} = \frac{1}{2} (M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k);$$

- at the fourth step $k=1, c=n+3/4$:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} = \frac{1}{2} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c);$$

- at the fifth step:

$$\frac{C_{i,j}^{5n+1} - C_{i,j}^{5n}}{\Delta t} = \sum_{l=1}^N \frac{q_l(t^{n+1/2})}{\Delta x \Delta y} \delta_l.$$

Function δ_l is equal to zero in all cells except the cells where the source of emission is situated.

This difference scheme is implicit and absolutely steady but the unknown concentration C is calculated using the explicit formulae at each step (so called “method of running calculation”), where C^1, C^k, C^5 – are concentrations at each time step.

FORTRAN language was used to code the developed numerical model.

Findings

The developed generic code «Area- 2A» was used to solve the following problem. We consider the possible spillage at the territory of Pridneprovsk Railway. At the first stage of the numerical experiment we studied the dynamics of ground waters pollution. Results of numerical simulation which were obtained at the first step are shown in Fig.1 -4. As we can see that the contamination area enlarges in time and has the image of “plume”. This contaminated area creates big problem in the case when the ground waters in the region are used for water supply.

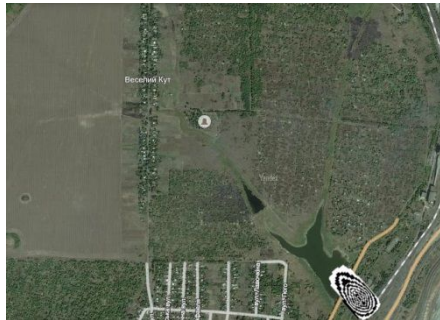


Fig. 1. Contamination region after accident spillage at railway, $t= 5$ days after accident/

Зона загрязнения подземных вод после аварийного разлива на железной дороге, $t= 5$ сут

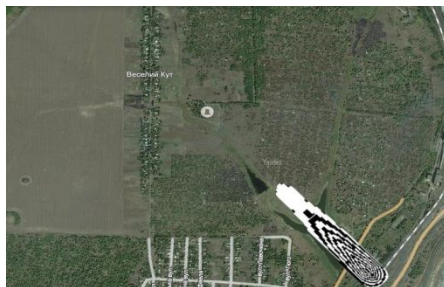


Fig. 2. Contamination region, $t= 13$ days/

Зона загрязнения подземных вод, $t= 13$ сут

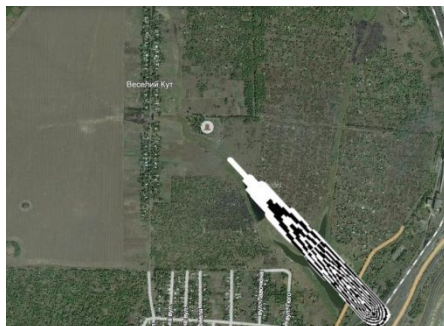


Fig. 3. Contamination region, $t= 25$ days/

Зона загрязнения подземных вод, $t= 25$ сут

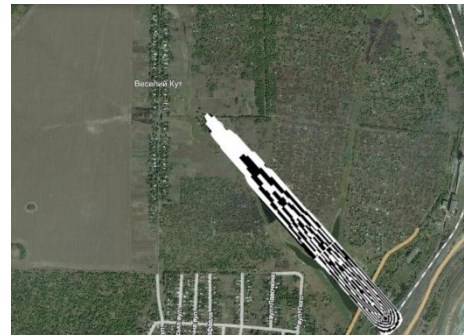


Fig. 4. Contamination region, $t= 45$ days/

Зона загрязнения подземных вод, $t= 45$ сут

To reduce dimensions of the contaminated area we can use the underground wall. The developed generic code «Area- 2A» can also solve this problem.

Results of numerical simulation in the case when the underground wall is used are shown in Fig.5, 6. These Figures illustrate the contamination area at different times after spillage.

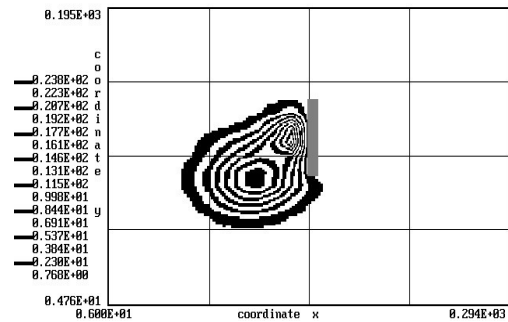


Fig. 5. Contamination region (underground wall application, $t= 13$ days)/

Зона загрязнения подземных вод при использовании подземной стены ($t= 13$ сут)

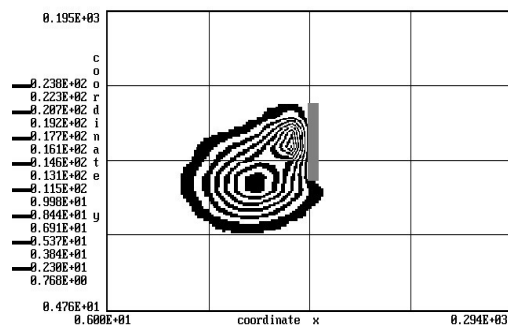


Fig. 6. Contamination region (underground wall application, $t= 25$ days)/

Зона загрязнения подземных вод при использовании подземной стены ($t= 25$ сут)

As we can see from these Figures the contaminated area is essentially reduced when the underground wall was used.

Originality and practical value

A numerical model to predict ground waters pollution after accidents was developed. The model is based on the 2-D transport equation. This model allows to evaluate the dynamics of groundwaters pollution in the case of different spillages at railways. It also allows to estimate the contamination area development in the case of underground wall application.

Conclusions

The article contains description of 2-D numerical model and it's application to predict the impact of accident spillage at railway on the ground waters

contamination. To simulate the process of ground waters contamination the 2-D developed numerical model was used. The developed numerical model takes into account the main physical processes which influence the contaminant dispersion in the ground waters. The model allows to simulate the process of ground waters contamination in the case of underground wall application. The future work in this field will be connected with development of filtration model to simulate ground waters dynamics.

LIST OF USED SOURCES

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: учеб. пособие в 6 кн. / [ред. Котляревский В. А., Забегаева А. В.]. – М.: изд-во АСВ, 2001–2005.
2. Беляев, Н. Н. Компьютерное моделирование динамики движения и загрязнения подземных вод / Беляев Н. Н., Коренюк Е. Д., Хрущ В. К. – Д.: Наука и образование, 2001. – 156 с.
3. Беляев, Н. Н. Применение поглощающих скважин для подавления развития зоны загрязнения подземного потока / Н. Н. Беляев, Л. Ф. Долина, И. В. Калашников // *Екологія і природокористування*. – 2004. – Вип. 7. – С. 181–186.
4. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование процесса промывки зоны аэрации / Беляев Н. Н., Калашников И. В. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун. заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. Д., 2008. – Вип. 24, С. 100–102.
5. Бомба, А. Я. Математичне моделювання процесів масопереносу з урахуванням малих деформацій середовища. Актуальні проблеми водного господарства / Бомба А. Я., Хлапук М. Н., Сидорчук Б. П. – Рівне: Вид-во УДАВГ, 1997. – т.1. – с.11–15.
6. Гольдберг, В. М. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / Гольдберг В. М., Газда С. – М.: Недра, 1984, – 262 с.
7. Калашников, И. В. Численное моделирование нестационарных процессов загрязнения подземных вод / И. В. Калашников // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. – 2007. – Вип. 19. – С. 42–46.
8. Зеленко, Ю. В. Кинетика миграции дизельного топлива через грунты во время технологических проливов и транспортных аварий / Зеленко Ю. В., Плахотник В. И. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун. Д.*, 2004. Вип. 3. – С. 30–33
9. Крайнов, С. Р. Геохимические модели прогноза формирования качества подземных вод (обзор возможностей и ограничений). *Водные ресурсы*. – 1999, Т.26, №3. – с.322–334.
10. Лукнер, Л. Моделирование миграции подземных вод / Лукнер Л., Шестаков В. М. – М.: Недра, 1986. – 208 с.
11. Мироненко, В. А. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах (опыт гидрогеологических исследований) / Мироненко В. А., Румынин В. Г., Учаев В. К. – Л.: Недра, 1980. – 320 с.
12. Олейник, А. Я. Геогидродинамика дренажа. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.
13. Рудаков, Д. В. Влияние поглощающего эффекта водоупора на массоперенос в подземных водах. *Вісн. Дніпропетр. ун. Механіка*. Вип. 2, 1998, Т.1. – с. 94–99.
14. Пшинько, А. Н. Эколого-гидрогеологическое обоснование природоохранных мероприятий при ликвидации последствий аварийных разливов / А. Н. Пшинько, Н. Н. Беляев, И. В. Калашников – Д.: Нова ідеологія, 2011. – 173 с.
15. Gregorauskas M., Klimas A., Sleinius. S. A. Jonava wellfield, Lithuania *Environment Modeling Technologies* – Riga, 1997. – P.38–49.

REFERENCES

1. *Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy*. Red. Kotlyarevskiy V.A., Zabegaeva A.V. [Accidents and disasters. Prevention and response: textbook in 6 books. Edited by Kotlyarevsky V.A., Zabegaeva A.V.]. Moscow, ACB Publ., 2001 – 2005.
2. Belyaev N.N., Korenyuk E.D., Hrushh V.K. *Kompyuternoe modelirovanie dinamiki dvizheniya i zagryazneniya podzemnykh vod* [Computer modeling of dynamics of movement and pollution of underground waters]. Dnepropetrovsk, Science and education Publ., 2001, 156 p.
3. Belyayev N.N., Dolina L.F., Kalashnikov I.V. *Primenenie pogloshhayushchih skvazhin dlya podavleniya razvitiya zony zagryazneniya podzemnogo potoka* [The use of absorbing wells to suppress the development of the zone of contamination of the underground stream]. *Zbirnyk naukovykh prats: Ekologiya i pryrodokorystuvannya*. [Ecology and Nature Conservation]. Dnipropetrovsk, 2004, № 7, pp. 181 – 186.
4. Belyayev N.N., Kalashnikov I.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessa promyvy zony aehratsii* [Mathematical modeling of the washing process of the aeration zone]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu*

- zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. Dnipropetrovsk, 2008, issue 24, pp. 100 – 102.
5. Bomba A.Ya., Xlapuk M.N., Sydorhuk B.P. *Matematychni modelyuvannya procesiv masoperenosu z uraxuvannyam malyx deformacij seredovyshha* [Mathematical modeling of mass transfer considering small deformations environment]. *Aktualn problemi vodnogo gospodarstva* [Actual problems of water management]. Rivne, УДАБГ Publ., 1997, issue 1, pp. 11 – 15.
 6. Goldberg V.M., Gazda S. *Gidrogeologicheskie osnovy ohrany podzemnykh vod ot zagryazneniya* [The theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions Hydrogeological basis for protection of groundwater from pollution]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 262 p.
 7. Kalashnikov I.V. *Chislennoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov zagryazneniya podzemnykh vod* [Numerical modeling of non-stationary processes of groundwater pollution]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. Dnipropetrovsk, 2007, issue 19, pp. 42 – 46.
 8. Zelenko Yu.V., Plahotnik V.I. *Kinetika migratsii dizelnogo topliva cherez grunty vo vremya tekhnologicheskikh prolivov i transportnih avariiv* [Kinetics of migration of diesel fuel through soils during technological straits and transport accidents]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. Dnipropetrovsk, 2004, issue 3, pp. 30 – 33.
 9. Krainov S.R. *Geohimicheskie modeli prognoza formirovaniya kachestva podzemnykh vod (obzor vozmozhnostey i ogranicheniy)* [Geochemical models of forecasting the formation of groundwater quality (a review of the possibilities and limitations)]. *Vodnye resursy* [Water resources]. 1999, issue 26, №3, pp. 322 – 334.
 10. Lukner L., Shestakov V.M. *Modelirovanie migratsii podzemnykh vod* [Modeling of groundwater migration]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 208 p.
 11. Mironenko V.A., Rumynin V.G., Uchaev V.K. *Ohrana podzemnykh vod v gornodobyvayushhih rayonah (opyt gidrogeologicheskikh issledovaniiv)* [Protection of underground waters in mining areas (experience in hydrogeological research)]. Leningrad, Nedra Publ., 1980. 320 p.
 12. Oleynik A.Ya. *Geogidrodinamika drenazha* [Geohydrodynamics of drainage]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1981. 284 p.
 13. Rudakov D.V. *Vliyanie pogloshhayushhego ehffekta vodoupora na massoperenos v podzemnykh vodah* [Effect of the absorbing effect of waterproof on mass transfer in groundwater]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Mekhanika. Vypusk 2* [Bulletin of Oles Honchar Dnipropetrovsk National University. Series: Mechanics. Volume 2], 1998, no. 2, vol 1, pp. 94-99.
 14. Pshinko A.N., Belyayev N.N., Kalashnikov I.V. *Ehkologo-gidrogeologicheskoe obosnovanie prirodohrannykh meropriyatiiv pri likvidatsii posledstviiv avariinykh razlivov* [Ecological and hydro-geological substantiation of nature protection measures during liquidation of consequences of emergency spills]. Dnepropetrovsk, Nova ideologiya Publ., 2011, 173 p.
 15. Gregorauskas M., Klimas A., Sleinius. S.A. Computer analysis of groundwater quality and its prediction under complicated boundary conditions. Lithuania *Environment Modeling Technologies – Riga*, 1997. – P.38–49.

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. С.З. Поліщуком (Україна);

Стаття надійшла в редакцію 29.03.2017