

4. Крутиховская З.А. Глубинное строение и прогнозная оценка Украинской железорудной провинции (по данным геофизических исследований) – К.: Наукова думка, 1971. – 206 с.
5. Структура фундамента и железорудные месторождения северного склона Украинского щита / Крутиховская З.А., Силина И.М. и др. – К.: Наукова думка, 1975. – 230 с.
6. Пигулевский П.И., Берзенин Б.З., Кичурчак В.М. Результаты составления геолого-структурной карты докембрийских образований юго-восточной части Украинского щита. – К.: Геоінформ, 1999. – 198 с.
7. Циклы вулканизма ДДВ и Донбасса и проблема металлоночности северного склона УЩ / Семененко Н.П. и др. // Вулканизм и рудные формации ДДВ и Донбасса. – К.: Наукова думка, 1977. – С. 5–14.

Рассмотрено структурно-тектоническое районирование северного склона Среднеприднепровского мегаблока УЩ и отмечены основные структурные элементы: гранит-мигматитовые антиформы, купола, валы и развитые между ними зеленокаменные структуры разного типа. Приведено геологическое строение Кобелякской, Толоко-Подянской и Петриковской зеленокаменных структур и дана характеристика их проявления в гравитационном и магнитном полях. При этом впервые предоставлена геолого-геофи-

зическая информация об особенностях строения северо-западно-ориентированной части Кобелякского синклинория – Толоко-Подянской ЗКС и прогноз но выделенной Петриковской ЗКС.

**Ключевые слова:** Украинский щит, Среднеприднепровский мегаблок, зеленокаменная структура, докембрийские породы, разлом, скважина

The structural-tectonic zoning of northern slope of Srednepri-dneprovsky megablock of the Ukrainian shield has been considered. Basic structural elements (granite-migmatite antiforms, domes, shafts and green-stone structures of different type advanced between them) have been marked. Geological structure of the Kobeliakskaya, Toloko-Podyanskaia and Petrikovskaia green-stone structures and characteristic of their display in gravitational and magnetic fields have been shown. For the first time it has been added Geological-geophysical information about the features of structure of the northwest part of Kobelyakskiy syncline, Toloko-Podyanskaia green-stone structure and prospective allocated Petrikovskaia green-stone structure.

**Keywords:** the Ukrainian shield, Srednepri-dneprovsky megablock, Precambrian rocks, fracture zone, bore hole

Рекомендовано до публікації д.г.-м.н. О.Д. Додатком 24.03. 10

УДК 622.516:556.388

© Перкова Т.И., Рудаков Д.В., 2010

Т.И. Перкова, Д.В. Рудаков

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ РУДНИЧНЫХ ВОД ИЗ ПРУДОВ-НАКОПИТЕЛЕЙ ЮГОКА

T.I. Perkova, D.V. Rudakov

## 2D MODELING OF VERTICAL SEEPAGE OF MINERALIZED MINE WATER FROM GATHERING PONDS LOCATED WITHIN THE KRYVYI RIH IRON ORE BASIN

Создана профильная модель фильтрации растворов переменной плотности, идентификация которой выполнена на примере пруда-накопителя минерализованных рудничных вод в Кривбассе. Модель базируется на системе уравнений движения соленых вод и миграции растворов в пористой среде. Путем численного моделирования оценены вертикальная и горизонтальная составляющие переноса солей в фильтрационном потоке и динамика засоления подземных вод в зоне влияния пруда-накопителя.

**Ключевые слова:** пруды-накопители, рудничные воды, профильная фильтрация, плотностная конвекция, численное моделирование

**Введение.** В настоящее время к числу актуальных экологических проблем горнопромышленных районов относится нарушение гидродинамического и гидрохимического режимов, сопровождающееся развитием негативных геоэкологических процессов. Утечки минерализованных рудничных вод из прудов-накопителей приводят к необратимым изменениям

природных геохимических циклов, влияющих на химический состав и минерализацию подземных вод, которые используются для водоснабжения. Активизация процессов растворения и выщелачивания карбонатных пород сопровождается нарушением дневной поверхности вследствие суффозии, оползней, карста и т. д. [1, 2]. Интенсивность засоления водо-

носных горизонтов в зоне влияния прудов-накопителей определяется в первую очередь фильтрационными и емкостными свойствами грунтов, объемами и химическим составом сбрасываемых рудничных вод. Например, с увеличением минерализации вод, фильтрующихся через глины, скорость движения растворов возрастает [2].

**Анализ проблемы.** В специальной литературе достаточно широко освещены вопросы моделирования фильтрации жидкостей переменной плотности в горизонтальном напорном потоке [3]. Основное внимание уделялось гидродинамическому анализу установившихся потоков различной плотности в ненарушенных условиях. Существующие теоретические представления, касающиеся динамики подземных вод, и разработанные методики ее моделирования использовались, в основном, для расчета фильтрации в глубоких горизонтах, поскольку именно для них характерно изменение плотности порового раствора в широком диапазоне [4].

Численные и аналитические модели фильтрации и миграции минерализованных вод, учитывающие изменение их плотности, применялись преимущественно для количественной оценки интрузии соленых морских вод в прибрежные пресноводные горизонты [5]. Аналитические зависимости [6] получены для упрощенных схем движения соленых вод и слабой конвекции при небольших числах Пекле,  $Pe < 100$ . Однако влияние минерализации и химического состава рудничных вод, фильтрующихся из прудов-накопителей, на динамику солепереноса в подземных водах в должной мере не исследовалось.

Поэтому **целью исследований** является разработка и верификация профильной модели фильтрации растворов переменной плотности из пруда-накопителя для оценки вертикальной и горизонтальной составляющих переноса солей в фильтрационном потоке.

Эта проблема особенно актуальна в районах компактного расположения прудов-накопителей минерализованных рудничных вод. Типичным примером их техногенного засоления является территория вокруг пруда-накопителя, который сооружен в 1975 г. в центральной части балки Свистуново в Кривбассе (рис. 1). Согласно данным мониторинга, минерализация воды в месте сброса рудничных вод в 1997 г. составляла 22,5 г/л, в 2000 г. – 29,3 г/л, а в 2004 г. – 35,5 г/л. Под экраном залегают четвертичные и понтические пески, сарматские известняки и пески, а также киевские глины (рис. 2). За период эксплуатации пруда с 1976 по 1978 г. вследствие суффозионных процессов происходило периодическое разрушение экрана, что повлекло за собой утечки более 21 млн м<sup>3</sup> минерализованных вод. После каждой утечки наблюдалось повышение содержания солей в водоносных горизонтах и деформация дна пруда-накопителя. В целом, за период времени с 1977 по 2005 гг. минерализация ранее пресных подземных вод неогенового водоносного горизонта увеличилась на порядок и в ближайшем населенном пункте на расстоянии 3 км от пруда достигла 7 г/л [7].

Подобная ситуация в районах расположения накопителей и отстойников шахтных вод характерна и для Западного Донбасса. Отличием является лишь диапазон минерализации сбрасываемых вод – от 5 до 15 г/л [2].



Рис. 1. Обзорная карта района исследований. М 1:100000. 1, 2 – отстойники ЮГОКа Войково и Объединенное, соответственно

**Методика исследования.** Модель профильной фильтрации минерализованных вод основывается на системе уравнений движения пресных и соленых вод, миграции растворенных солей в пористой среде [8]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W \left| n_0 \frac{\partial h}{\partial x} + 4 n_0 \frac{\partial h}{\partial z} \right| + \psi_{fw} + 4 \psi_{sw} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_x c \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial c}{\partial z} + v_z c \right) - 2 q \left| n_0 \frac{\partial c}{\partial x} \right. \quad (2)$$

где  $n_0$  – активная пористость пород;  $\Delta \rho_{fw} = \rho_{fw} / (\rho_{fw} - \rho_{sw})$ ,  $\Delta \rho_{sw} = \Delta \rho_{sw} / (\rho_{fw} - \rho_{sw})$  – относительная плотность пресных и соленых вод, соответственно;  $h$  – гидравлический напор, учитывающий изменение плотности по вертикали;  $m$  – толщина слоя воды;  $K$  – коэффициент фильтрации пресной воды;  $t$  – время;  $W$  – интенсивность инфильтрации;  $D$  – коэффициент гидродинамической дисперсии;  $C$  – концентрация солей в поровом растворе;  $v_x, v_z$  – скорость фильтрации вдоль осей  $Ox$  и  $Oz$ ;  $q$  – интенсивность массообмена между жидкой и твердой фазами, в том числе в результате суффозии и карста.

При решении краевых задач фильтрации минерализованных вод в уравнении (1) вместо плотности  $\rho$  можно использовать относительную концентрацию  $c = C_{fw} / C_{sw}$ , что приводит к уравнению вида [5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - 2 \gamma v \left| n_0 \frac{\partial h}{\partial x} \right. \quad (3)$$

где  $\gamma = (\rho_{sw} - \rho_{fw}) / \rho_{fw}$

На границе области фильтрации формулируется условие первого рода

$$h = h_0, C = C_0,$$

где  $h_0, C_0$  – заданный напор и концентрация, а также условие второго рода – в виде распределенной по поверхности инфильтрации атмосферных осадков и

утечек из пруда с расходом, изменяющимся во времени, что в целом отражает механизм поступления воды и солей из накопителя и их миграцию в ближайший водоток.

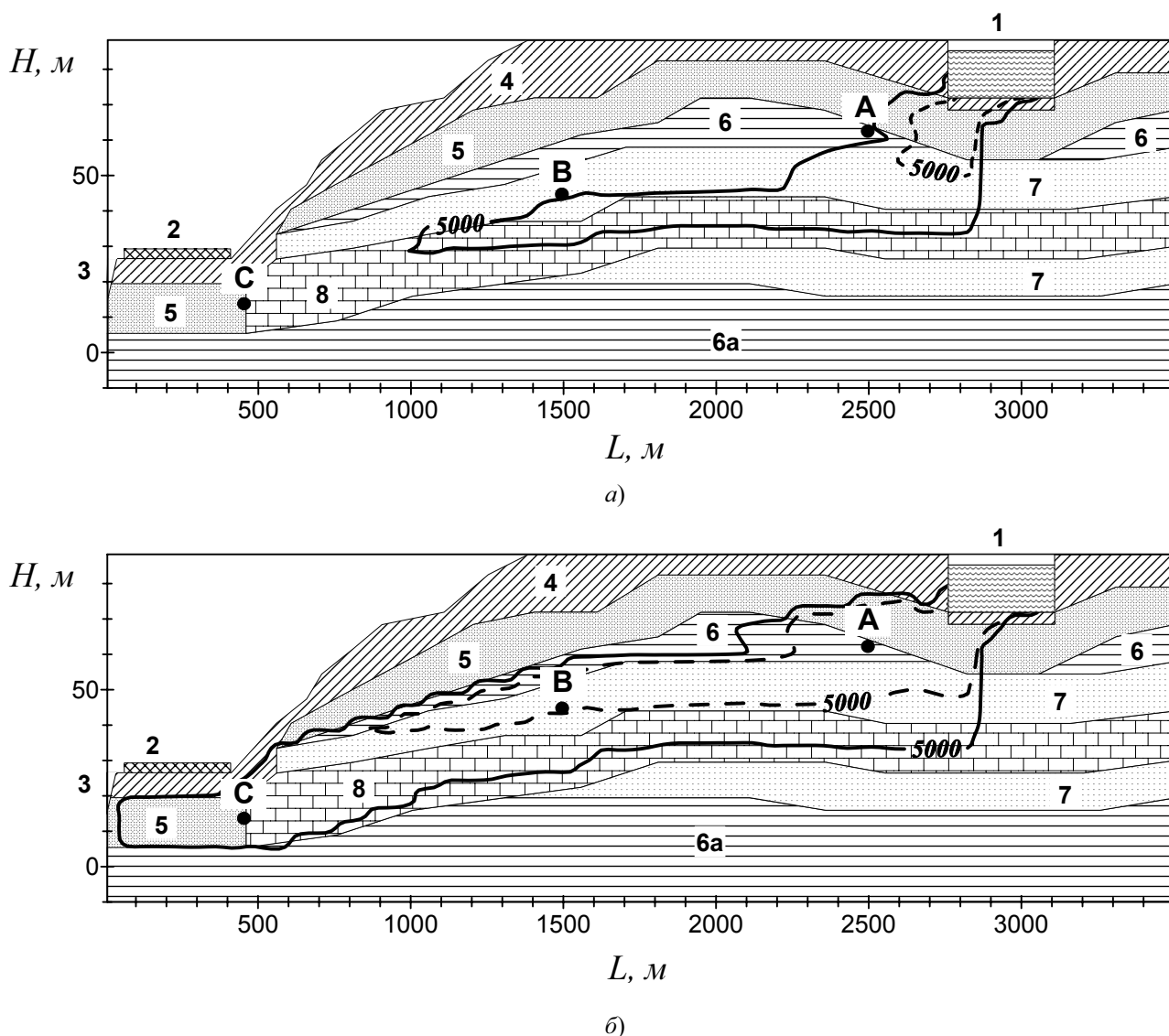


Рис. 2. Изменение концентрации солей в подземных водах вдоль профиля I – I' (рис. 1) с течением времени  $t$  при различной минерализации вод в пруде-накопителе  $C_0$ : а)  $t = 5$  лет; б)  $t = 25$  лет;  $C_0 = 10$  г/л – штриховая кривая;  $C_0 = 50$  г/л – сплошная кривая. 1 – пруд-накопитель; 2 – с. Новоселовка; 3 – р. Ингулец; 4 – суглинки тяжелые, с прослоями лессовидных; 5 – песок мелкозернистый; 6 – глины; 6а – глины плотные; 7 – песок разнородный; 8 – известняк выветрелый, глинистый; А, В, С – точки наблюдения

Особенностью системы уравнений (1) – (2) является ее нелинейность, обусловленная зависимостью коэффициента фильтрации  $K$  и напора  $h$  от минерализации  $C$ . Это требует одновременного расчета напора и минерализации при численном решении на каждом временном этапе.

Моделирование фильтрации минерализованных вод выполнено с помощью программы Visual Modflow 2009.1, которая реализует конечно-разностный метод решения системы уравнений (1) – (2). На базе специального вычислительного модуля выполнялся итерационный цикл, позволяющий одно-

временно рассчитывать фильтрационные и миграционные характеристики процессов.

Моделирование фильтрации выполнено для профиля I – I', соединяющего балку Свиштуново с р. Ингулец. Неоднородность пород обуславливается наличием двух гидравлически связанных водоносных горизонтов, которые рассматривались как единый водоносный комплекс, в котором происходит миграция растворенных солей. При задании параметров модели активная пористость слоев изменялась от 0,15 до 0,4, коэффициенты фильтрации вмещающих пород приняты равными от 3 до 30 м/сут, параметр

дисперсии – от 0,02 до 0,3 м, коэффициент гидродисперсии составил 0,002 – 0,3 м<sup>2</sup>/сут.

В качестве критерия, позволяющего оценить роль конвективной и диффузионной составляющих переноса растворенных солей, использовалось число Пекле  $Pe = v l_0 / D$  [6]; здесь  $v$  – скорость фильтрации,  $l_0$  – характерная длина переноса;  $D$  – коэффициент гидродисперсии. Данным условиям миграции свойственен конвективно-диффузионный процесс переноса солей ( $100 < Pe < 2500$ ).

**Верификация модели.** Основным количественным показателем вертикальной и горизонтальной составляющих переноса солей является расстояние, на которое они распространились по глубине и в плане.

Ввиду выраженной фильтрационной неоднородности пород по профилю I – I', получение общих оценок для этих компонентов переноса затруднено. Представленные ниже результаты в большей степени отражают условия миграции минерализованных вод на конкретном объекте.

Учитывая широкую зону рассеивания, контуры которой получены при моделировании непрерывного поступления раствора в горизонт подземных вод, маркирующей выбрана изолиния со значением 5000 мг/л (рис. 2). Согласно полученным результатам, по истечении 3 лет с момента первого заполнения пруда, в случае минерализации воды в нем 10 г/л, наблюдается лишь вертикальная конвекция, а фронт растворов с концентрацией до 10 г/л распространяется на 22 м. При увеличении минерализации воды в пруде-накопителе до 50 г/л, происходит как вертикальный, так и горизонтальный перенос солей на расстояния 33 и 410 м соответственно.

Установлено, что основным фактором, определяющим степень размывания „языка“ соленых вод, является фильтрационная неоднородность пласта (рис. 2), а дальность продвижения растворов – наличие в разрезе вертикального градиента плотности 0,01–0,05 и пород хорошей проницаемости. Это подтверждается экспериментальными исследованиями [10], в ходе которых было установлено, что плотностная конвекция начинает проявляться уже при различии в плотности порядка 0,005.

Для количественных оценок геомиграции выполнен расчет скорости вынужденной и плотностной конвекции при различной минерализации и в тех литологических разностях, в которых происходила миграция (рис. 2). Полученные результаты хорошо согласуются с вычисленными значениями скоростей плотностной конвекции для песков. Незначительные отклонения наблюдаются для массива трещиноватых известняков, в которых скорость миграции более адекватно определяется по формуле Буссинеска и зависит от количества трещин, промоя, площади их поперечного сечения [9]. На протяжении 3 лет преобладающим фактором вертикального распределения солей под прудом-накопителем является плотностная конвекция, как при небольшой (10 г/л), так и при высокой минерализации сбрасываемых вод (50 г/л).

Путем разложения вектора скорости фильтрации на вертикальную и горизонтальную составляющие определена длина пути миграции растворенных солей со значением 5000 мг/л за период 25 лет с момента начала утечек. С увеличением минерализации роль плотностной конвекции, как фактора переноса солей, незначительно возрастает и даже при высокой минерализации ее вклад не превышает 5% (табл. 1).

С течением времени происходит замещение пресных вод рассолами (рис. 3), которое активизируется спустя 4–5 лет с момента начала утечек постоянной интенсивности.

По истечении 25 лет концентрация солей вблизи пруда-накопителя достигла максимального значения – 8 г/л ( $C_0 = 10$  г/л) и 42 г/л ( $C_0 = 50$  г/л). С удалением от источника содержание солей в подземных водах уменьшается вследствие рассеивания вещества в продольном и поперечном направлениях, а его максимум вблизи населенного пункта, в точке наблюдения С, достигает 2 и 10 г/л (рис. 3), что согласуется с данными мониторинга и подтверждает корректность решения обратной задачи.

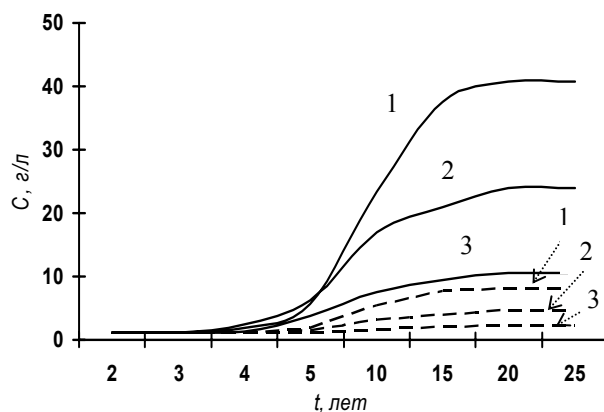


Рис. 3. Динамика засоления подземных вод на различных удалениях от пруда-накопителя  $L$  и минерализации вод в нем  $C_0$ :  $C_0 = 10$  г/л – штриховая кривая;  $C_0 = 50$  г/л – сплошная кривая; 1 – в точке наблюдения А ( $L = 5$  км); 2 – в точке наблюдения В ( $L = 1,5$  км); 3 – в точке наблюдения С ( $L = 2,5$  км)

Таблица 1

Вклад плотностной и вынужденной конвекции в продвижении зоны засоления подземных вод

Минерализация вод в пруде $C_0$ , г/л	Плотностная конвекция, %	Вынужденная конвекция, %
10	1,14	98,86
50	1,20	98,80

**Выводы.** На основе математической модели плотностной конвекции создана профильная модель фильтрации и миграции растворов переменной плотности, адаптированная к гидрогеологическим условиям одного из прудов-накопителей ЮГОКа. Модель адекватно отражает факторы, определяющие мигра-



цию растворенных солей через породы под прудом-накопителем в подземные воды, в том числе степень минерализации сбрасываемой воды, длительность ее воздействия на породы, фильтрационные свойства вмещающих пород, неоднородность комплекса водоносных горизонтов.

В результате моделирования оценены динамика засоления водоносных горизонтов в зоне влияния пруда-накопителя рудничных вод с высокой минерализацией и роль вертикальной составляющей переноса солей в фильтрационном потоке.

Предложенная модель может рассматриваться в качестве основы для выполнения прогнозов миграции минерализованных рудничных вод в водоносных горизонтах в районах компактного расположения прудов-накопителей и для оценки карстовых и суффозионных проявлений на прилегающих территориях.

Полученные результаты дают возможность комплексно оценивать экологическое состояние территории и динамику его изменения в зоне влияния прудов-накопителей рудничных вод.

#### Список литературы

1. Рудаков Д.В., Воробйова Т.І. Прогнозування фізико-хімічних змін водотривких порід під впливом накопичувачів рудничних вод (на прикладі Кривбасу) // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2008. – №5. – С. 63 – 66.
2. Евграшкина Г.П. Влияние горнодобывающей промышленности на гидрогеологические и почвенно-мелиоративные условия территорий. – Д.: Монолит, 2003. – 708 с.
3. Крашин И.И. Моделирование фильтрации и теплообмена в водонапорных системах. – М.: Недра, 1976. – 158 с.
4. Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промышленных стоков. – М.: ВОДГЕО, 1961. – 147 с.
5. Frind E.O. Simulation of long-term transient density-dependent transport in groundwater // Adv. Water Res. – 1982. – V. 5. №2. – P. 73 – 88.
6. Бочевер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская Ф.Е. Защита подземных вод от загрязнения. – М.: Недра, 1979. – 254 с.
7. Отчет об инженерно-геологических изысканиях для выяснения причин образования оползневых процессов в с. Новоселовка Широковского района Днепропетровской области. – ГП „ДнепроГИИТИЗ“. – 2000. – 43 с.
8. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. – М.: Мир, 1971. – 451 с.
9. Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1966. – 283 с.
10. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах (опыт гидрогеологических исследований). – Л.: Недра, 1980. – 320 с.

Створено профільну модель фільтрації розчинів змінної густини, ідентифікація якої виконана на прикладі ставка-накопичувача мінералізованих рудничних вод у Кривбасі. Модель базується на системі рівнянь руху солоних вод та міграції розчинів у пористому середовищі. Шляхом чисельного моделювання оцінені вертикальна та горизонтальна складові перенесення солей у фільтраційному потоці і динаміка засолення підземних вод в зоні впливу ставка-накопичувача.

**Ключові слова:** ставки-накопичувачі, рудничні води, профільна фільтрація, конвекція внаслідок змінної густини, чисельне моделювання

2D vertical model of groundwater filtration flow of nonuniform density has been created and identified by example of the mineralized mine water gathering pond in Kryvyi Rig iron ore basin. The model is based on combined equations of salt water movement and transport of solutes in porous medium. Vertical and horizontal movement in the flow and dynamics of groundwater salinization in the zone affected by the gathering pond has been estimated by computational modeling.

**Key words:** gathering pond, mine water, 2D vertical seepage, density-dependent advection, computational modeling

Рекомендовано до публікації д.т.н. О.О. Сдвижковою 17.05.10