

УДК 504.53:631.41  
© 2017

**Г.П. ЕВГРАШКИНА,**  
доктор геологических наук

**Н.Н. ХАРИТОНОВ,**  
доктор сельскохозяйственных наук

Днепровский национальный  
университет имени Олеса Гончара –  
Днепровский государственный  
аграрно-экономический университет,  
Украина

E-mail: kharytonov.n.n@dsau.dp.ua

просп. Ю. Гагарина, 72, г. Днепр  
ул. С. Ефремова, 25, г. Днепр

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ  
ВЕРТИКАЛЬНОГО  
СОЛЕПЕРЕНОСА  
НА ШАХТНЫХ ОТВАЛАХ  
ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ  
ВАРИАНТА  
ИХ РЕКУЛЬТИВАЦИИ

*Запропоновано математичні моделі солепереносу на шахтних відвалах, створені на основі теорії фізико-хімічної гідродинаміки пористих середовищ. Моделі розроблені для кількісної оцінки міграції макро- і мікрокомпонентів у часі і просторі. Розглянуто чотири варіанти моделей: а) відсіпка без рекультивації, тобто модель характеризує відвал, що відсіпаний без рекультивації. Процес вологопереносу є інфільтраційним; б) рекультивація в умовах богарного вирощування культурних рослин; друга модель відображає міграцію солей на рекультивованому відвалі богарного землеробства; в) зі системним зрошенням; третя модель відрізняється від попереднього варіанта заміною богарного землеробства на систематичне зрошення шахтними водами низької мінералізації; г) на випадок заростання дикорослою рослинністю; четверта модель передбачає вільне заростання поверхні відвалу природною рослинністю з низькою транспірацією і характеризується накопиченням солей на контакті з насипним глинистим шаром. Адекватність моделей підтверджена зіставленням результатів епігнозу з режимними спостереженнями.*

*Ключові слова:* фільтрація, масоперенос, міграція, гідродисперсія, рекультивація, математична модель.

**Постановка проблеми.** Добыча угля в Западном Донбассе Украины осуществляется без заботы. Извлекаемые из горных выработок шахтные породы отсыплют на поверхность земли, заполняя ими природные и техногенные понижения рельефа. Исследованиями установлено, что природное зарастание или возделывание сельскохозяйственных культур невозможно без их покрытия суглинистыми или глинистыми породами с последующим нанесением почвенной массы

[8, 9]. В отличие от почв в составе шахтных пород отсутствует азот, а емкость поглощения незначительна. По данным химического анализа пород отвалов они состоят из глинистых минералов, окислов и гидроокислов кремния, водорастворимых солей. По соотношению фракций они характеризуются как глинистые и суглинистые, пылеватые с гравием, песком и щебнем, нарушенной структуры, средней плотности. Водоотдача отвальных пород изменяется в широком

диапазон – от 0,0221 до 0,14 [3]. Гидрогеологические исследования и сельскохозяйственные эксперименты на опытных участках породных отвалов шахт Павлоградская, Терновская и Самарская начались еще в 70-е годы прошлого столетия [2, 4]. Засыпка шахтными породами оврагов и балок вызывает подпор грунтового потока, повышение его уровня, загрязнение водоносного горизонта, подтопление пород зоны аэрации. Такие же процессы происходят на обработанных и просевших участках поймы реки Самара, засыпанных шахтными отвалами [7, 8]. Незакрепленные травянистой растительностью склоны обследуемых отвалов со временем меняют угол откоса с 25–30° до 20° и менее [2]. На территории рекультивированных отвалов среди посевов в богарных условиях неоднократно отмечались заболоченные и вымокшие участки на глубине залегания уровня грунтовых вод 6,5–7,0 м, что свидетельствует о наличии слоев с предельно низкими фильтрационными свойствами и отсутствием естественной дренированности. Все виды отвальных пород в разной степени засолены. Засоление сульфатное [2, 8].

**Цель исследований:** обосновать возможные численные модели вертикального солепереноса на примере нарушенных и рекультивированных ландшафтов Западного Донбасса.

**Материалы и методы.** Климат Западного Донбасс имеет черты атлантико-континентального. По данным метеостанции г. Павлоград, среднемноголетняя величина физического испарения через поверхность земли ( $I$ ) достигает 400 мм, осадков ( $A$ ) – 409 мм. Суммарное испарение при выращивании травянистых культурных растений в богарных условиях в среднем составляет 500 мм/год. Дефицит влаги (суммарное водопотребление минус осадки) – 91 мм. Растения перекрывают его за счет запасов почвенной влаги нижележащих горизонтов, которые в свою очередь пополняются в результате подпитывания грунтовыми водами. При отсутствии транспирации, что характерно для вновь отсыпанных некультивированных отвалов, не имеющих растительного покрова, среднегодовая, среднемноголетняя

величина скорости вертикального влагопереноса, определенного балансовым методом, составит

$$V = \frac{A - I}{1000t} = \frac{409 - 400}{365000} = 2,46 \cdot 10^{-5} \text{ м/сут.} \quad (1)$$

Исследования солепереноса на всех видах шахтных отвалов при создании математических моделей начинаются с решения инверсных миграционных задач, которые заключаются в определении параметров  $V$  и  $D$ . Среднее по длине исследуемого профиля значение скорости вертикального влагопереноса  $V$ , особенно для вновь отсыпанного некультивированного шахтного отвала, может быть рассчитано балансовым методом как алгебраическая сумма расхода и поступления воды на поверхность отвала. Балансовый метод определения скорости вертикального влагопереноса является осредняющим. Он не отражает всей сложности исследуемого процесса, но не утратил своей актуальности и при правильном определении элементов баланса дает хорошие результаты. Этот параметр может быть также определен из решения уравнения вертикального влагопереноса при наличии соответствующей информации.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Все отвальные породы содержат легкорастворимые соли в количествах 0,3–1,2 %. Из анионов в наибольших количествах присутствуют сульфаты. Данные табл. 1 позволяют охарактеризовать шахтные отвалы как средне- и слабозасоленные. Тип засоления – сульфатный. Емкость поглощения более чем на порядок ниже, чем у черноземов обыкновенных.

По всей видимости, характер профиля засоления определяется условиями отсыпки и носит случайный характер на начальный момент времени. В дальнейшем прослеживается уменьшение содержания солей у поверхности отвала, что согласуется с прогнозными расчетами.

Для шахтных отвалов характерен преимущественно вертикальный влаго- и солеперенос. В шахтных отвалах, заполняющих понижения рельефа, происходят процессы движения влаги и миграция солей под влиянием

**1. Характеристика засоленности шахтных отвалов**

Глубина отбора проб, м	Засоленность С, %	$\frac{Cl^-}{SO_4^{2-}}$	Емкость поглощения, мг-экв./100 г почвы	Обменные катионы, мг-экв./100 г почвы	
				Na <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>
<b>Шахта "Павлоградская"</b>					
0,0	0,836	0,066	13,21	3,65	9,56
1,0	0,557	0,160	8,78	3,14	5,64
2,0	0,487	0,181	7,72	3,06	4,66
3,0	0,442	0,168	7,03	3,01	4,02
4,0	0,307	0,183	6,92	2,58	4,34
<b>Шахта "Самарская"</b>					
2,0	0,365	0,112	4,79	3,57	1,22
4,0	0,448	0,087	5,06	2,50	2,56
6,0	0,397	0,113	6,35	4,24	2,11
8,0	0,440	0,111	6,83	4,79	2,04
10,0	0,528	0,095	7,99	5,07	2,92
12,0	0,566	0,090	8,43	5,29	3,14
14,0	0,507	0,101	8,03	4,94	3,09

янием атмосферных осадков, физического испарения и антропогенного воздействия. Процесс одномерного вертикального солепереноса в породах зоны аэрации, в том числе и шахтных отвалах, описывается уравнениями:

$$D \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} - V \frac{\partial C_1}{\partial x} - \frac{\partial C_2}{\partial t} = m \frac{\partial C_1}{\partial t};$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = -\beta \cdot C_2^k (C_H - C_1),$$

(2)

где  $D$  – коэффициент гидродисперсии, м<sup>2</sup>/сут;  $C_1$  – минерализация поровых растворов, г/дм<sup>3</sup>;  $C_2$  – концентрация солей в твердой фазе, г/дм<sup>3</sup>;  $k$  – коэффициент, зависящий от характера засоления;  $V$  – скорость вертикального влагопереноса, м/сут;  $m$  – объемная влажность, доли единицы;  $\beta$  – коэффициент интенсивности растворения солей твердой фазы, сут<sup>-1</sup>;  $C_H$  – концентрация предельного насыщения, г/дм<sup>3</sup>;  $x$  – пространственная координата, м;  $t$  – временная координата, сут. На нерекультивированных отвалах шахт "Терновская" и "Самарская"

на разных глубинах было отобрано 500 образцов, разделенных на 10 групп по величине объемной влажности. В каждой группе определены засоленность (С, %) субстратов по результатам химического анализа водных вытяжек и минерализация поровых растворов (С<sub>1</sub>, г/дм<sup>3</sup>). После их обработки методом парной корреляции получены линейные зависимости вида

$$C_1 = A \cdot C + B. \quad (3)$$

Коэффициент корреляции  $r = 0,8-0,87$ . При  $m = 0,28$  зависимость имеет вид

$$C_1 = 20,8C + 0,9 \quad C_1 = 20,8 \cdot C + 0,9. \quad (4)$$

Подставляем равенство (3) в (2). Поскольку водные вытяжки содержат все легкорастворимые соли твердой фазы в растворенном

виде, то слагаемое  $\frac{\partial C_2}{\partial t} = 0$ ;

$$D \cdot \frac{\partial^2 (A \cdot C + B)}{\partial x^2} - V \cdot \frac{\partial (A \cdot C + B)}{\partial x} = m \frac{\partial (A \cdot C + B)}{\partial t}; \quad (5)$$

$$D \cdot \frac{\partial^2 (A \cdot C)}{\partial x^2} + D \cdot \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} - V \cdot \frac{\partial (A \cdot C)}{\partial x} - V \cdot \frac{\partial B}{\partial x} = m \frac{\partial B}{\partial x} + m \frac{\partial B}{\partial t}. \quad (6)$$

Выносим постоянную величину  $A$  за знак производной. Производная от постоянной величины  $B$  равна  $0$ .

$$AD \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - AV \frac{\partial C}{\partial x} = Am \frac{\partial c}{\partial t}. \quad (7)$$

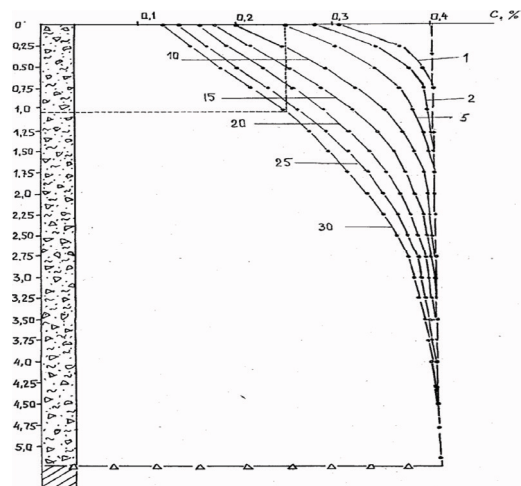
После деления всех слагаемых уравнения (6) на  $A$  приходим к уравнению

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} = m \frac{\partial c}{\partial t}, \quad (8)$$

в котором функция  $C$  – содержание растворимых солей в единице массы отвальной породы, определенное по результатам химического анализа водных вытяжек. Такой подход упрощает исследования солепереноса по следующим причинам. Если в качестве начальных условий при прогнозных расчетах на всех предложенных моделях взяты результаты химического анализа водных вытяжек, которые содержат практически все уже растворившиеся соли, то правомерным является исключение из уравнения массопереноса слагаемого  $\partial C_2 / \partial t$ , характеризующего растворение солей твердой фазы. Вместо системы уравнений (2) решаем менее сложное уравнение (8), поскольку дополнительные трудности возникают при оценке величин  $\beta$  и  $C_n$  для многокомпонентного раствора. Более сложные уравнения, например трехмерные с переменными коэффициентами, можно решить теоретически приближенными методами в тестовых вариантах, но нельзя практически обеспечить достоверными гидрогеологическими исходными данными. Среднегодевной процесс влагопереноса в некультивированном шахтном отвале – инфильтрационный. Он обеспечит медленное рассоление верхних горизонтов отсыпанных пород (рис. 1).

Миграция солей на рекультивированном отвале богарного земледелия рассмотрена на примере опытного участка шахты “Благодатная”. Насыпные породы рекультивационного слоя представлены суглинистыми грунтами, имеют мощность 1,8 м при средней засоленности 0,1 % массы сухого грунта. Шахтные породы имеют мощность 3,5 м и характеризуются средней засоленностью (0,5 %). Они залегают на незасоленных суглинках (0,1 %).

Уровень грунтовых вод находится на расстоянии 1,25 м от подошвы отвала. Засоленность пород зоны полного водонасыщения в естественном залегании составляет 0,02–0,1 % плотности грунта. Для рекультивированных шахтных отвалов богарного земледелия, а также для покрытых древесной растительностью характерно условие  $V_1 > V_2$ . Здесь  $V_1$  – скорость восходящего потока влаги;  $V_2$  – нисходящего. При выполнении этого условия свободная и рыхлосвязанная вода, растворенные в ней соли движутся к поверхности земли. Суммарное потребление взрослых деревьев в вегетационный период измеряется тысячами миллиметров, а глубина развития корневой системы – до 5 м. Поэтому на участках их выращивания восходящий поток влаги и солей будет особенно интенсивным. Кроме того, движение влаги и солей в природных условиях происходит по принципу: от больших содержаний к меньшим. Поэтому при выращивании полевых культур и древесных растений без орошения на рекультивированных землях возможно засоление насыпного слоя почвы. Увеличение мощности насыпных грунтов до 2,5 м и более не исключает угрозу засоления, а удлиняет этот процесс во времени. Результаты исследования засо-



**Рис. 1. Результаты прогноза  
солевого режима  
некультивированного шахтного отвала**

ленности почв и пород на опытном участке рекультивации ДГАЭУ подтверждают сделанные выводы [9]. Плодовые деревья здесь не сохранились. На опытном участке лесной рекультивации ДНУ, в отличие от описанного разреза, непосредственно на отвальных породах отсыпан полуметровый "дренажный слой" хорошо промытых крупнозернистых песков. Он создает разрыв капиллярной каймы. В итоге соли из отвальных пород поступают в насыпные грунты в значительно меньших количествах. В результате древесные насаждения здесь сохранились намного лучше [7]. Для расчета параметра  $D$  можно применить формулу [1]

$$D = \frac{V\Delta x}{\ln(c-1)}; \quad c = \frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{C_{i+1} - C_i}, \quad (9)$$

где  $C_{i-1}, C_i, C_{i+1}$  – содержание солей в трех точках отвальных пород, расположенных на расстоянии  $x$  друг от друга, м.

Формула (9) является частным решением уравнения (7) в установившемся режиме. Используя ее, рассматриваем исследуемый неустановившийся процесс как смену множества стационарных величин на определенных отрезках времени. Если имеются результаты двукратных и более наблюдений за изменениями солевого режима отвала во времени, то поступаем следующим образом. Уравнение (7) записываем в конечных разностях по явной или неявной схемам и решаем относительно параметра  $D$ .

$$D \left( \frac{C_{i-1}^{\tau} - C_i^{\tau}}{\Delta x_1} - \frac{C_i^{\tau} - C_{i+1}^{\tau}}{\Delta x_2} \right) \cdot \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{2} - V \frac{C_{i-1}^{\tau} - C_{i+1}^{\tau}}{\Delta x_1 + \Delta x_2} = m \frac{C_i^{\tau+1} - C_i^{\tau}}{\Delta t}, \quad (10)$$

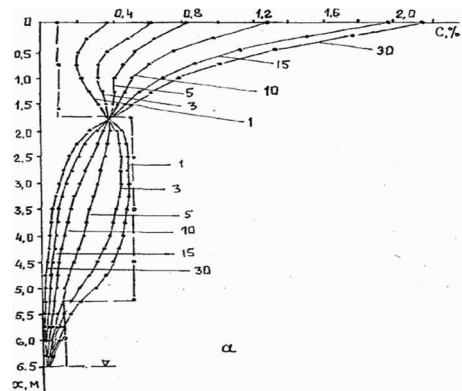
где  $C_{i-1}^{\tau}, C_i^{\tau}, C_{i+1}^{\tau}$  – засоленность отвальных пород в расчетных точках  $i+1, i, i-1$  на предыдущий момент времени  $\tau$ , %;  $C_i^{\tau+1}$  – засоленность отвальных пород в расчетной точке на последующий момент времени  $\tau + 1$ , %;

$\Delta x_1, \Delta x_2$  – расстояние между расчетными точками, м;

$\Delta t$  – шаг по временной координате, сут.

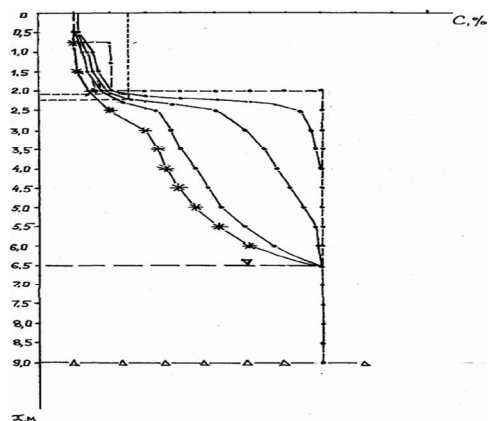
Инверсная задача в такой постановке будет корректной только при нахождении одного неизвестного параметра.

Вторая модель отображает миграцию солей на рекультивированном отвале богарного земледелия. Наличие транспирации создает здесь испарительный режим влагопереноса, негативным последствием которого будет засоление насыпного почвенного слоя (рис. 2).



**Рис. 2. Результаты прогноза  
солевого режима рекультивированного  
шахтного отвала богарного земледелия**

Третья модель отличается от предыдущего варианта заменой богарного земледелия на систематическое орошение как шахтными водами низкой минерализации, так и водой из бассейна реки Самара. Режим орошения должен быть промывным. Модель позволяет выбрать оптимальную минерализацию поливной воды. Процесс солепереноса аналогичен первой модели (рис. 3).



**Рис. 3. Миграция солей  
на рекультивированном  
шахтном отвале с орошением**



**2. Результаты расчета профільного засоления в неустановившемся режиме**

№ расчетной точки	Координата точки $x$ , м	Засоление, %	Прогнозная засоленность (%) на временной период $t$ , лет				
			1	2	3	4	5
1	0	0,03	0,477	0,605	0,644	0,656	0,660
2	0,5	0,03	0,446	0,574	0,615	0,627	0,631
3	1,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,600

Четвертая модель предполагает свободное, но избирательное по величине транспирации зарастание поверхности насыпного слоя различными видами дикорастущих растений. Расчеты прогнозной засоленности насыпного слоя выполнены для различных величин транспирации дикорастущих растений, рекомендуемых к выращиванию для двух типов отвалов – обводненных и необводненных во всем интервале изменения их засоленности (0,3–1,26 %) и мощности насыпного почвенного слоя (0,5; 1,0; 1,5 и 2 м). Используются классические конечно-разностные схемы уравнения (7) и метод Джонсона [5, 6].

Все варианты решались с граничным условием 3-го рода Данквертса–Бреннера и его частными случаями на поверхности земли и первого рода на границе зон аэрации и полного водонасыщения. Количественная оценка процесса зарастания поверхности рекультивированного шахтного отвала была выполнена на Павлоградском стационаре рекультивации с такими исходными данными: средняя засоленность отвальных пород 0,6 %; засоленность метрвого насыпного слоя – 0,03 % (необходимый отвал). Результаты расчета вторичного засоления в неустановившемся режиме с исходными данными для минимальной

транспирации на необводненном отвале приведены в табл. 2.

Согласно этим данным получается, что на отвалах, где исходная засоленность составляет 0,6 %, надо выращивать растения с меньшим уровнем транспирации. Некоторые дикорастущие растения такую засоленность выдерживают. При минимальной транспирации  $V_1 = 3 \cdot 10^{-5}$  м/сут засоленность на поверхности насыпного слоя в установившемся режиме не превышает 0,66 %. При такой засоленности с некоторой потерей массы развивается много дикорастущих видов растений. Увеличение мощности насыпного почвенного слоя удлиняет время стабилизации процесса. Период стабилизации засоления составляет 5 лет. Приведенная модель предполагает свободное зарастание поверхности отвала и характеризуется наличием солей в подошве глинистого слоя, которые движутся к поверхности земли под влиянием испарения почвенной влаги. На поверхности земли вода испаряется в приповерхностном слое. Следовательно, при выбранной мощности рекультивационного слоя в один метр возможно развитие засоления почвы. Для уменьшения негативного влияния процессов засоления на естественное зарастание рекультивированных отвалов необходимо увеличивать мощность насыпных суглинков и глин.

**Выводы**

*По результатам исследований оптимальным вариантом рекультивации признана третья модель – выращивание культурных растений с систематическим орошением при промывном режиме на фоне дренажа. Для четвертой модели процесс накопления солей в насыпном почвенном слое на обвод-*

*ненных отвалах происходит значительно более интенсивно, чем на необводненном. Применительно ко второй и четвертой моделям увеличение мощности почвенного слоя не исключает развития в нем вторичного засоления, а удлиняет этот процесс во времени.*

### **Бібліографія**

1. Методы прогноза солевого режима грунтов и грунтовых вод / [Н.Н. Веригин, С.В. Васильев, В.С. Саркисян, Б.С. Шержуков]. – М.: Колос, 1979. – 336 с.
2. *Евграшкіна Г.П.* Влияние горнодобывающей промышленности на гидрогеологические и почвенно-мелиоративные условия территорий: монография / Г.П. Евграшкіна. – Днепропетровск: Монолит, 2003. – 200 с.
3. *Євграшкіна Г.П.* Закономірності зміни гідрогеологічних умов на території, прилеглої до хвостосховища “Балка Стуканова” у Західному Донбасі / Г.П. Євграшкіна, О.Є. Сабадаш // Вісник Дніпропетровського університету. – 2012. – Вип. 14. – С. 42–46. – (Серія: Геологія. Географія).
4. *Евграшкіна Г.П.* Математические модели солепереноса в зоне аэрации техногенно нарушенных территорий / Г.П. Евграшкіна // Вісник Дніпропетровського університету. – 2010. – Т. 18, вип. 12. – С. 80–84. – (Серія: Геологія. Географія).
5. *Карплюс У.* Моделирующие устройства для решения задач теории поля / У. Карплюс. – М.: ИЛ, 1962. – 467 с.
6. *Самарський А.А.* Теория разностных схем / А.А. Самарський. – М.: Наука, 1977. – 653 с.
7. *Травлев А.П.* Теоретичні основи лісової рекультивациі порушених земель у Західному Донбасі на Дніпропетровщині / А.П. Травлев, Н.А. Белова, В.Н. Зверковський. – 2005. – Т. 16, № 1–2. – С. 19–31.
8. *Харитонов Н.Н.* Оценка состояния грунтовых вод и пойменных земель в зоне разработок угля в Западном Донбассе / Н.Н. Харитонов, Г.А. Бондарь // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. – С. 680–685.
9. *Харитонов М.М.* Моніторинг засолення насипного шару чорнозему на рекультивованих землях Західного Донбасу / М.М. Харитонов, М.І. Жиленко // Вісник Харківського національного аграрного університету. – Харків, 2008. – № 1. – С. 204–207.