

УДК 631.43

Осипов Валерій Валерійович,

к. геогр. н., старший науковий співробітник відділу гідрохімії
Українського гідрометеорологічного інституту, пр. Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна,
e-mail: valery_osipov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4853-8021>;

Бігун Оксана Миколаївна,

к. с.-г. н., старший науковий співробітник лабораторії геоекоекофізики ґрунтів
Національного наукового центру «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського»,
вул. Чайковська, 4, м. Харків, 61024, Україна,
e-mail: oksana_bigun@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8461-4928>

ОЦІНКА ПЕДОТРАНСФЕРНИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ФІЛЬТРАЦІЇ ҐРУНТІВ УКРАЇНИ

Параметризація гідрологічних моделей вимагає знання фільтраційних властивостей ґрунтів. Часто такі дані відсутні та найкращим виходом є використання педотрансферних функцій (ПТФ). Розглянуто десять ПТФ, як давно відомі (Cosby та ін. (1984), Wösten та ін. (1999), Saxton та Rawls (2006), Weynants та ін. (2009)), так і останні (Toth та ін. (2015), Rosetta3), що оперують різним набором параметрів для визначення коефіцієнту фільтрації (K_f): вміст піску, пилу та глини, щільність будови, частка органічного вуглецю, частка гумусу. Розрахункові значення K_f було порівняно з наявними даними фільтрації ґрунтів України. Найбільш релевантні результати в ПТФ Wösten та Rosetta3, але не для всіх типів ґрунтів та генетичних горизонтів. Усі ПТФ занижують K_f нижнього шару (0,3-2 м) середньогумусних типових та звичайних чорноземів та завищують у 2-5 разів для умовно водотривких горизонтів (< 2 мм/година). На підставі розрахункових та експериментальних значень отримано карту фільтрації нижнього та верхнього шарів ґрунтів України масштабу 1:2500000. Найбільшу швидкість фільтрації мають ґрунти піщаного механічного складу, що поширені в Поліссі. K_f суглинкових та глинистих ґрунтів лісостепу та степу можуть відрізнятися на порядок для різних типів ґрунтів – найкраще пропускають воду ті, що мають високу структурність (реградовані ґрунти, типові та звичайні чорноземи). Найменші K_f (0,2-3 мм/година) у лучно-чорноземних глибоко солонцюваті ґрунтах, солонців, осолоділих глейових ґрунтів та солодів, нижнього шару дернових оглеєних та суглинкових дерново-підзолистих ґрунтів. K_f може варіюватися залежно від ландшафтного розташування ґрунтового розрізу, обробітку ґрунту та його промерзання, тому отримані розрахункові значення слід розглядати, як найбільш ймовірні. Отримані результати прийнятні для використання в гідрологічних розрахунках та моделюванні.

Ключові слова: педотрансферна функція, коефіцієнт фільтрації, гранулометричний склад, карта ґрунтів України, Rosetta3.

В. В. Осипов, О. Н. Бігун. ОЦЕНКА ПЕДОТРАНСФЕРНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ПОЧВ УКРАИНЫ. Параметризация гидрологических моделей требует знания фильтрационных свойств почв. Часто такие данные отсутствуют и лучшим выходом является использование педотрансферных функций (ПТФ). Рассмотрены десять ПТФ, как давно известные (Cosby и др. (1984), Wösten и др. (1999), Saxton и Rawls (2006), Weynants и др. (2009)), так и последние (Toth и др. (2015), Rosetta3), оперирующим разным набором параметров для определения коэффициента фильтрации (K_f): содержание песка, пыли и глины, плотность строения, доля органического углерода, доля гумуса. Расчетные значения K_f сравнивались с имеющимися данным фильтрации почв Украины. Наиболее релевантные результаты у ПТФ Wösten и Rosetta3, но не для всех типов почв и генетических горизонтов. Все ПТФ занижают K_f нижнего слоя (0,3-2 м) среднегумусных типичных и обыкновенных черноземов и завышают в 2-5 раз для относительно водоупорных горизонтов (<2 мм/час). На основании расчетных и экспериментальных значений получено карту фильтрации нижнего и верхнего слоев почв Украины масштаба 1:2500000. Наибольшая скорость фильтрации у почв песчаного механического состава, распространены в Полесье. K_f суглинистых и глинистых почв лесостепи и степи могут отличаться на порядок для различных типов почв – лучше пропускают воду те, у которых выше структурность (реградированные почвы, типичные и обыкновенные черноземы). Наименьшие K_f (0,2-3 мм / час) в лугово-черноземных глибоко солонцеватых почв, солонцов, осолоделых глеевых почв и солодов, нижнего слоя дерновых оглеенных и суглинистых дерново-подзолистых почв. K_f может варьироваться в зависимости от ландшафтного расположения почвенного разреза, обработки почвы и её промерзания, поэтому полученные расчетные значения следует считать наиболее вероятными. Полученные результаты приемлемы для использования в гидрологических расчетах и моделировании.

Ключевые слова: педотрансферная функция, коэффициент фильтрации, гранулометрический состав, карта почв Украины, Rosetta3.

Вступ. Фільтраційні властивості ґрунтів є одним із найважливіших складників, що контролює рух рідини у вадозній зоні, а отже, безпосередньо впливає на процеси випаровування, транспірації та формування водного стоку. На сьогодні активно розвиваються гідрологічні моделі, у яких ці процеси описуються не тільки емпіричними, а й фізичними рівняннями. Серед таких моделей найпоширенішою є SWAT (Soil and Water Assessment Tool), що також впроваджується в Україні [1]. З-поміж інших фізичних параме-

трів, для параметризації моделі необхідно визначити коефіцієнт фільтрації (K_f). Цю величину можна визначити шляхом польових досліджень, але на практиці, особливо якщо говорити про великі водозбори, дані щодо K_f для всіх груп ґрунтів, не кажучи вже про окремі горизонти, відсутні. Вихід із цієї ситуації – це використання педотрансферних функцій (ПТФ), що дозволяють визначити необхідні властивості ґрунтів на підставі наявних даних.

Аналіз попередніх публікацій. Активний

розвиток ПТФ почався ще минулого століття. Серед оглядових робіт варто зазначити [2], де розглянуто методи створення ПТФ та наводиться перелік характеристик ґрунтів, що використовуються для визначення гідравлічних характеристик за допомогою ПТФ. У праці [3] окрім цього розглядають використання ПТФ для параметризації теплових, біохімічних, біотичних процесів та транспорту розчинених речовин у профілі ґрунту. У роботі [4] синтезовано інформацію щодо використання ПТФ саме для розрахунку K_f , крім усього іншого наведено характеристику масивів даних, які на сьогодні є для створення ПТФ. В усіх обзорах торкаються проблем та обмежень, що пов'язані з використанням ПТФ. Передусім це те, що ПТФ не враховують інформацію щодо структурності ґрунтів (утворення агрегатів, макропорозність), по-друге, надійність ПТФ у регіонах за межами вихідної бази даних, по-третє, алгоритми оптимізації під час створення ПТФ. На щастя, останні покращуються з розвитком інформаційних технологій.

Отже, **мета цієї роботи** – проаналізувати наявні ПТФ та визначити, які найкраще підходять для розрахунку K_f ґрунтів України. У такий спосіб відтворити приблизні значення та основні закономірності K_f ґрунтів України та їхніх окремих генетичних горизонтів, що надалі можна буде використовувати для параметризації гідрологічних моделей із розосередженими параметрами.

Матеріали й методи. У роботі обрано ПТФ, що є найбільш універсальними (табл. 1), тобто для їхнього створення використано велику кількість зразків різних типів ґрунтів широко спектру гранулометричного складу. Також, у цих функціях використано різні методики для визначення K_f : рівняння регресії, дерево рішень та нейронна мережа.

Найбільший масив інформації отримано з бази даних «Властивості ґрунтів України» Інституту ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського [11], також частину даних зібрано з довідника «Справочник агрогидрологических свойств почв УССР» [12], «Атлас почв УССР» [13] та «Почвы Украины и повышение их плодородия» [14]. Загалом кількість розрізів ґрунту становить 171, що налічують 942 горизонти. Ґрунтові розрізи відібрано в такий спосіб, щоби охопити всі 40 класів ґрунтів та різновиди (гранулометричний склад) окремих полігонів, що відповідають карті ґрунтів України масштабу 1:2 500 000 [15]. K_f розраховано для кожного генетичного горизонту. Щоби визначити загальне значення K_f для верхнього або нижнього шарів обрано мінімальне значення, оскільки фільтрація ґрунтового шару, що складається з декіль-

кох горизонтів із різним K_f , визначається K_f горизонту з найменшим значенням [16].

Результати та обговорення. На рисунках 1, 2, 3, 4 розрахункові значення K_f найбільш розповсюджених ґрунтів України порівнюються з експериментальними даними польових досліджень ($K_{\text{спостереження}}$), на підставі яких було складено карту меліоративного районування України [17]. Кожне розрахункове значення K_f позначено точкою, їхня кількість однакова для кожної ПТФ, але іноді це не помітно, оскільки точки накладаються одна на одну. Зазначимо, що в атласі [17] наведено типові значення K_f , а не максимальні та мінімальні значення, тому незначний вихід розрахункових значень за межі $K_{\text{спостереження}}$ можна вважати допустимим.

Фільтрація піщаних дерново-підзолистих ґрунтів у 5-6 разів вище, ніж глинисто-піщаних [18], що зумовлює такий широкий інтервал значень коефіцієнта фільтрації (рис. 1А). Виразність ілювіального горизонту збільшується в напрямку супіщаних різновидів та середньо-, сильнопідзолистих видів, що призводить до зменшення K_f нижнього шару (рис. 1Г). У дерново-середньопідзолистих оглеєних ґрунтах після насичення оглеєного шару нижньої частини ілювіального горизонту часто абсолютно зупиняється фільтрація води, що призводить до заболочування ґрунту [18].

Найбільш співставні результати коефіцієнту фільтрації для дерново-слабопідзолистих ґрунтів отримано за $K_{\text{Wösten}}$ та $K_{\text{Rosetta_SSC_BD}}$, дерново-середньопідзолистих – $K_{\text{Rosetta_SSC_BD}}$, що також найкраще серед усіх передбачає тенденцію зменшення коефіцієнту фільтрації між верхнім та нижнім шаром (уповільнення фільтрації для нижнього шару у 2-13 разів).

Сірі опідзолені ґрунти та чорноземи опідзолені мають більш важкий гранулометричний склад, ніж дерново-підзолисті, переважно легкосуглинковий та середньосуглинковий, тому загалом швидкість фільтрації знижується. Для опідзолених ґрунтів (рис. 2А,Б) найкраще з експериментальними даними збігаються значення $K_{\text{Rosetta_SSC_BD}}$ для обох шарів, для нижнього – K_{Weynants} . Для типових чорноземів найбільш реалістичні значення має $K_{\text{Wösten}}$, усі інші ПТФ занижують коефіцієнт фільтрації нижнього горизонту (рис. 2В,Г).

Чорноземи звичайні та південні мають переважно середньосуглинковий та важкосуглинковий гранулометричний склад, але коефіцієнти фільтрації не зменшуються, оскільки ці ґрунти мають високу структурність, що сприяє фільтрації. На жаль, жодна ПТФ не відтворює коефіцієнти фільтрації нижнього шару звичайних чорноземів (рис. 3Б). Верхній шар найкраще описують

Перелік ПТФ для визначення K_{ϕ} , що використано в роботі

Автор, рік публікації	Необхідні властивості ґрунту
Cosby та інші, 1984 [5]	а) % піску ($sand^a$); б) % піску ($sand$), % глини ($clay^a$)
<p>а) $K_{Cosby_S} = 25,4 \cdot 10^{0,0153 \cdot sand - 0,884}$ [мм/година]</p> <p>б) $K_{Cosby_SC} = 25,4 \cdot 10^{0,0126 \cdot sand - 0,0064 \cdot clay - 0,6}$ [мм/година]</p>	
Wösten та інші, 1999 [6]	Верхній ($topsoil = 1$)/нижній ($topsoil = 0$) шар ^б , % пилу ($silt^a$), % глини ($clay$), щільність будови (BD), % гумусу (OM)
$K_{Wösten} = \exp[7,755 + 0,0352 \cdot silt + 0,93 \cdot topsoil - 0,967 \cdot BD^2 - 0,000484 \cdot clay^2 - 0,000322 \cdot silt^2 + 0,001 \cdot silt - 0,0758 \cdot OM - 0,643 \cdot \ln(silt) - 0,01398 \cdot BD \cdot clay - 0,1673 \cdot BD \cdot OM + 0,02986 \cdot topsoil \cdot clay - 0,03305 \cdot topsoil \cdot silt]$ [мм/година]	
Saxton та Rawls, 2006 [7]	пісок ($sand$), глина ($clay$) в долях одиниці, % гумусу (OM)
<p>$K_{Saxton \& Rawls} = 1930 \cdot (\theta_S - \theta_{33})^{3-\lambda}$ [мм/година]</p> <p>$\theta_{33} = \theta_{33t} + [1,283 \cdot (\theta_{33t})^2 - 0,374 \cdot \theta_{33t} - 0,015]$</p> <p>$\theta_{33t} = -0,251 \cdot sand - 0,195 \cdot clay + 0,011 \cdot OM + 0,006 \cdot sand \cdot OM - 0,027 \cdot clay \cdot OM + 0,452 \cdot sand \cdot clay + 0,299$</p> <p>$\theta_{1500} = \theta_{1500t} + (0,14 \cdot \theta_{1500t} - 0,02)$</p> <p>$\theta_{1500t} = -0,024 \cdot sand + 0,487 \cdot clay + 0,006 \cdot OM + 0,005 \cdot sand \cdot OM - 0,013 \cdot clay \cdot OM + 0,068 \cdot sand \cdot clay + 0,031$</p> <p>$\theta_{S-33} = \theta_{(S-33)t} + 0,636 \theta_{(S-33)t} - 0,107$</p> <p>$\theta_{(S-33)t} = 0,278 \cdot sand + 0,034 \cdot clay + 0,022 \cdot OM - 0,018 \cdot sand \cdot OM - 0,027 \cdot clay \cdot OM - 0,584 \cdot sand \cdot clay + 0,078$</p> <p>$\theta_S = \theta_{33} + \theta_{S-33} - 0,097 \cdot sand + 0,043$</p> <p>$\lambda = [\ln(\theta_{33}) - \ln(\theta_{1500})] / [\ln(1500) - \ln(33)]$</p>	
Weynants та інші, 2009 [8]	% піску ($sand$), щільність будови (BD), % органічного вуглецю (OC)
$K_{Weynants} = \exp(1,9582 + 0,0308 \cdot sand - 0,6142 \cdot BD - 0,01566 \cdot OC)$ [мм/година]	
Toth та інші, 2015 [9]	а) нижній/верхній шар, FAO_MOD^c б) нижній/верхній шар, % органічного вуглецю (OC), FAO_MOD в) нижній/верхній шар, % органічного вуглецю (OC), % піску ($sand$), % пилу ($silt$), % глини ($clay$)
<p>а) $\log_{10}(K_{Toth_FAO_MOD+TS}) =$ [см/доба]</p> <p>1) = 0,01; якщо нижній шар, <i>fine, very fine</i></p> <p>2) = 0,77; якщо нижній шар, <i>coarse, medium, medium fine, organic</i></p> <p>3) = 1,14; якщо верхній шар, <i>coarse, fine, medium fine, organic, very fine</i></p> <p>4) = 2,23; якщо верхній шар, <i>medium</i></p> <p>б) $\log_{10}(K_{Toth_FAO_MOD+OC+TS}) =$ [см/доба]</p> <p>1) = -1,16; якщо нижній шар, $0,96 \leq OC < 0,97$, <i>fine, medium, medium fine</i></p> <p>2) = -0,44; якщо нижній шар, $0,96 \leq OC < 0,97$, <i>coarse, very fine</i></p> <p>3) = -0,75; якщо нижній шар, $1,52 \leq OC < 1,54$</p> <p>4) = -0,58; якщо нижній шар, $2,04 \leq OC < 2,12$</p> <p>5) = -0,45; якщо нижній шар, $2,65 \leq OC < 3,86$</p> <p>6) = 0,37; якщо нижній шар, $3,86 \leq OC$</p> <p>7) = 1,29; якщо нижній шар, $2,12 \leq OC < 2,65$</p> <p>8) = 1,33; якщо нижній шар, $1,54 \leq OC < 2,04$</p> <p>9) = 1,13; якщо нижній шар, $0,97 \leq OC < 1,52$</p> <p>10) = -0,87; якщо верхній шар, $2,09 \leq OC < 2,1$</p> <p>11) = -0,38; якщо верхній шар, $2,4 \leq OC$, <i>fine, medium fine, organic, very fine</i></p> <p>12) = 1,67; якщо верхній шар, $2,1 \leq OC < 2,4$, <i>fine, medium fine, organic, very fine</i></p> <p>13) = 1,19; якщо верхній шар, $2,1 \leq OC$, <i>coarse, medium</i></p> <p>14) = -0,49; якщо верхній шар, $1,52 \leq OC < 1,54$</p> <p>15) = 1,74; якщо верхній шар, $1,54 \leq OC < 2,09$</p> <p>16) = 1,8; якщо верхній шар, $0,96 \leq OC < 1,52$</p> <p>17) = -1,56; якщо верхній шар, $0,4 \leq OC < 0,41$, <i>fine, medium, medium fine, very fine</i></p> <p>18) = -0,42; якщо $0,4 \leq OC < 0,41$, <i>coarse</i></p> <p>19) = 0,79; якщо $0,41 \leq OC < 0,96$, <i>fine, very fine</i></p> <p>20) = 1,54; якщо $0,41 \leq OC < 0,96$, <i>coarse, medium, medium fine</i></p>	

21) = 0,55; якщо $OC < 0,07$ 22) = 0,66; якщо $0,07 \leq OC < 0,4$, <i>fine, very fine</i> 23) = 1,3; якщо $0,07 \leq OC < 0,4$, <i>medium, medium fine</i> 24) = 1,83; якщо $0,07 \leq OC < 0,4$, <i>coarse</i> в) $\log_{10}(K_{TotH_SSC_OC_TS}) =$ [см/доба] 1) = -0,95; якщо нижній шар, $0,96 \leq OC < 0,97$ 2) = -0,75; якщо нижній шар, $1,52 \leq OC < 1,54$ 3) = -0,25; якщо нижній шар, $2,04 \leq OC$ 4) = 1,33; якщо нижній шар, $1,54 \leq OC < 2,04$ 5) = 1,13; якщо нижній шар, $0,97 \leq OC < 1,52$ 6) = -0,87; якщо верхній шар, $2,09 \leq OC < 2,1$ 7) = -0,22; якщо верхній шар, $2,42 \leq OC$, <i>sand < 38,95%</i> 8) = 1,82; якщо верхній шар, $2,1 \leq OC < 2,42$, <i>sand < 38,95%</i> 9) = 1,44; якщо верхній шар, $2,1 \leq OC$, <i>sand \geq 38,95%</i> 10) = 0,01; якщо верхній шар, $0,96 \leq OC < 2,09$, <i>silt < 10,85%</i> 11) = -0,46; якщо верхній шар, $1,52 \leq OC < 1,54$, <i>silt \geq 10,85%</i> 12) = 1,72; якщо верхній шар, $1,52 \leq OC < 1,54$, <i>silt \geq 10,85%</i> 13) = 1,82; якщо верхній шар, $0,96 \leq OC < 1,52$, <i>silt \geq 10,85%</i> 14) = -1,81; якщо $0,4 \leq OC < 0,41$, <i>silt \geq 32,11%</i> 15) = -0,4; якщо $0,4 \leq OC < 0,41$, <i>silt < 32,11%</i> 16) = 0,67; якщо $0,41 \leq OC < 0,96$, <i>clay \geq 37,4%</i> 17) = 1,53; якщо $0,41 \leq OC < 0,96$, <i>silt < 37,4%</i> 18) = 0,55; якщо $OC < 0,07$ 19) = -0,11; якщо $0,07 \leq OC < 0,4$, <i>sand < 5,77%</i> 20) = 1,28; якщо $0,07 \leq OC < 0,4$, $5,77 < sand \leq 69,72\%$ 20) = 1,96; якщо $0,07 \leq OC < 0,4$, <i>sand \leq 69,72%</i>	
Zhang та Schaap, 2017 [10]	а) % піску (<i>sand</i>), % пилу (<i>silt</i>), % глини (<i>clay</i>) б) % піску (<i>sand</i>), % пилу (<i>silt</i>), % глини (<i>clay</i>), щільність будови (BD)
Скрипт для розрахунку програмною мовою Python можна завантажити за посиланням http://www.u.arizona.edu/~vgzhang/download.html [см/доба]	

^a *sand* – частинки діаметром 0,05-2 mm, *silt* – 0,002-0,05 mm, *clay* < 0,002 mm
^б Верхній шар – генетичні горизонти A₀, A₁ (або H₀, H); нижній шар – генетичні горизонти A₂, B, C (або E, I, P)
^в FAO_MOD – модифікована класифікація механічного складу FAO (*coarse*: *clay* < 18% та *sand* > 65%; *medium*: 18% < *clay* < 35% та *sand* > 15%, або *clay* < 18% та 15% < *sand* < 65%; *medium fine*: *clay* < 35% та *sand* < 15%; *fine*: 35% < *clay* < 60%; *very fine*: *clay* > 60%; *organic* – органігенні ґрунти)

$K_{Rosetta_SSC_BD}$, $K_{Saxton \& Rawls}$ та K_{Wosten} (рис. 3А). Для чорноземів південних коефіцієнт фільтрації всього профілю непогано відтворюється K_{Wosten} , але для верхнього шару краще результати в $K_{Rosetta_SSC_BD}$, K_{Wosten} завищує значення для залишково солонцюватих ґрунтів (рис. 3В,Г).

Всі ПТФ занижують коефіцієнт фільтрації нижнього шару лучних ґрунтів, але K_{Wosten} майже повністю перебиває всі значення як верхнього, так і нижнього (рис. 4А,Б). Найкращі значення для гірських ґрунтів показує $K_{Rosetta_SSC_BD}$ (рис. 4В,Г).

Найбільшу швидкість фільтрації мають ґрунти піщаного механічного складу, більш важкі ґрунти повільніше пропускають воду. Однак, якщо ці ґрунти оструктурені, то їхній K_f значно зростає, як порівняти з неоструктуреними ґрунтами того ж гранулометричного складу. Так, найбільший K_f верхнього шару мають ґрунти Полісся, що переважно представлені піщаними

($K_f > 80$ мм/година), глинисто-піщаними (25-80 мм/година) та супіщаними (10-30 мм/година) дерновими та дерново-підзолистими ґрунтами (рис. 5). Але вже наявність у останніх більш щільного з більшим вмістом глини (<0.002 мм) ілювіального горизонту зменшує K_f нижнього шару до 2-6 мм/година, а для суглинистих дерново-середньо- та сильнопідзолистих ґрунтів Передкарпаття до 0,1-0,3 мм/година (рис. 6).

Попри високі експериментальні значення K_f , у природних умовах піщані дерново-підзолисті та дерново-підзолисті оглеєні знизу ґрунти, тобто автоморфні за умовами формування, часто перебувають у стані зневоднення пор, що перешкоджає інфільтрації поверхневої вологи [19]. Просторова інфільтрація проявляється тільки в умовах надмірного зволоження завдяки водам, що притікають зі схилів, накопичуються у денної поверхні та проникають до рівня ґрунто-

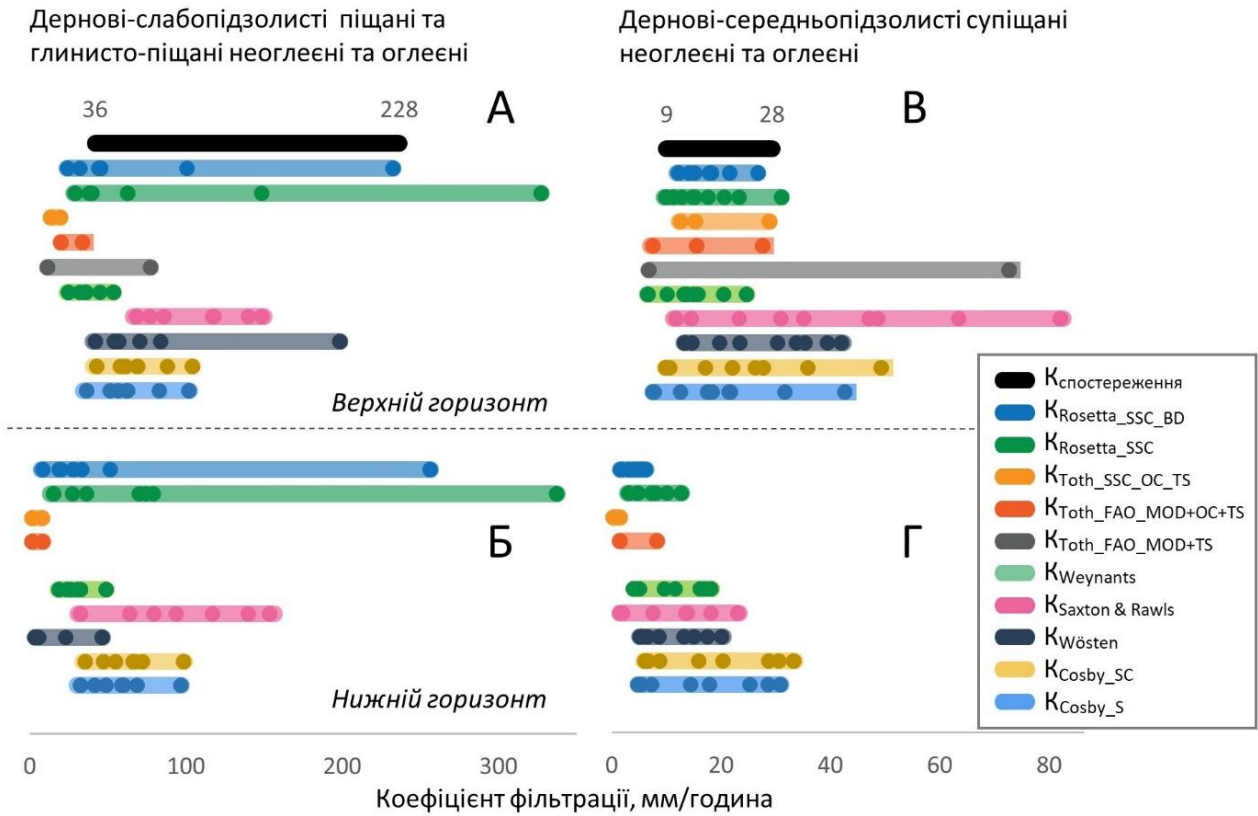


Рис. 1. Порівняння K_f дерново-підзолистих ґрунтів з експериментальними значеннями (за матеріалами [17], [18])

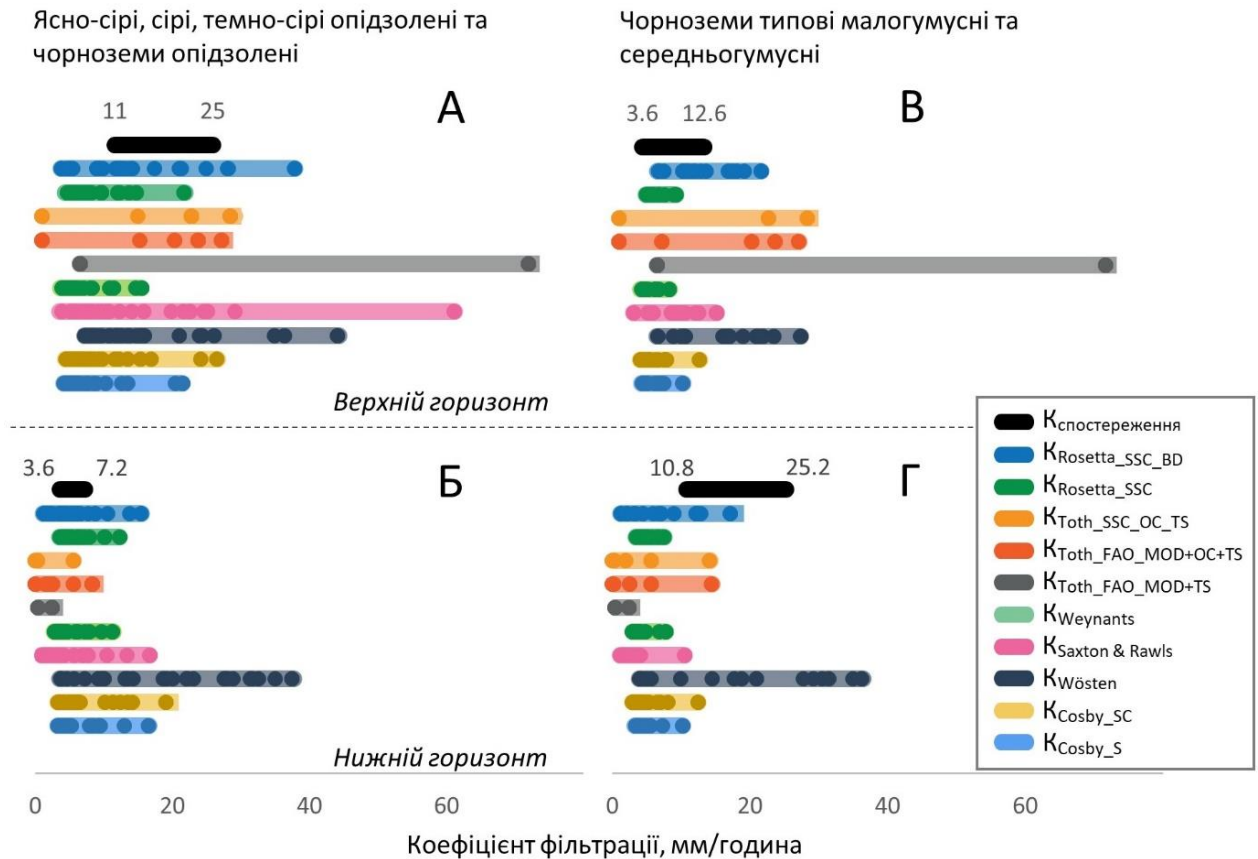


Рис. 2. Порівняння K_f сірих ґрунтів та чорноземів опідзолених та типових з експериментальними значеннями (за матеріалами [17])

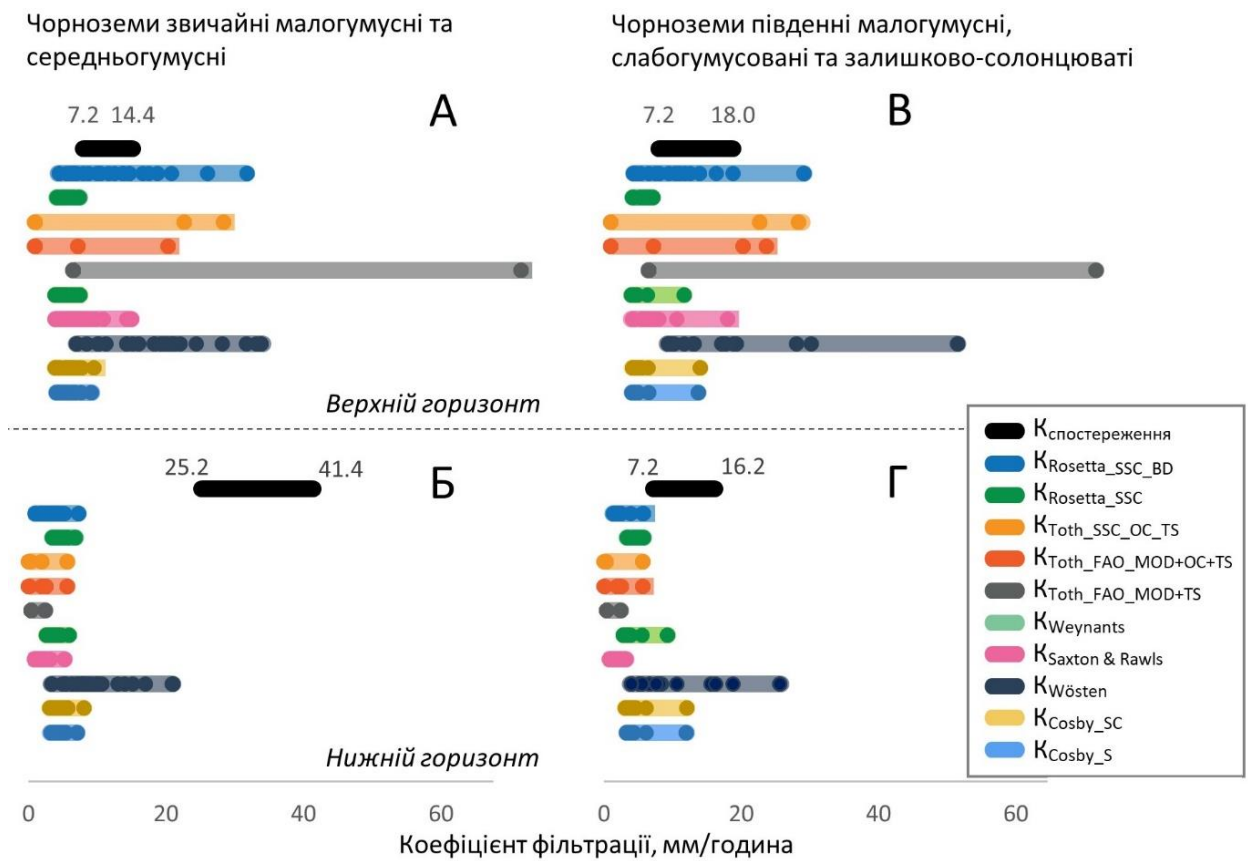


Рис. 3. Порівняння K_f чорноземів звичайних та південних з експериментальними значеннями (за матеріалами [17])

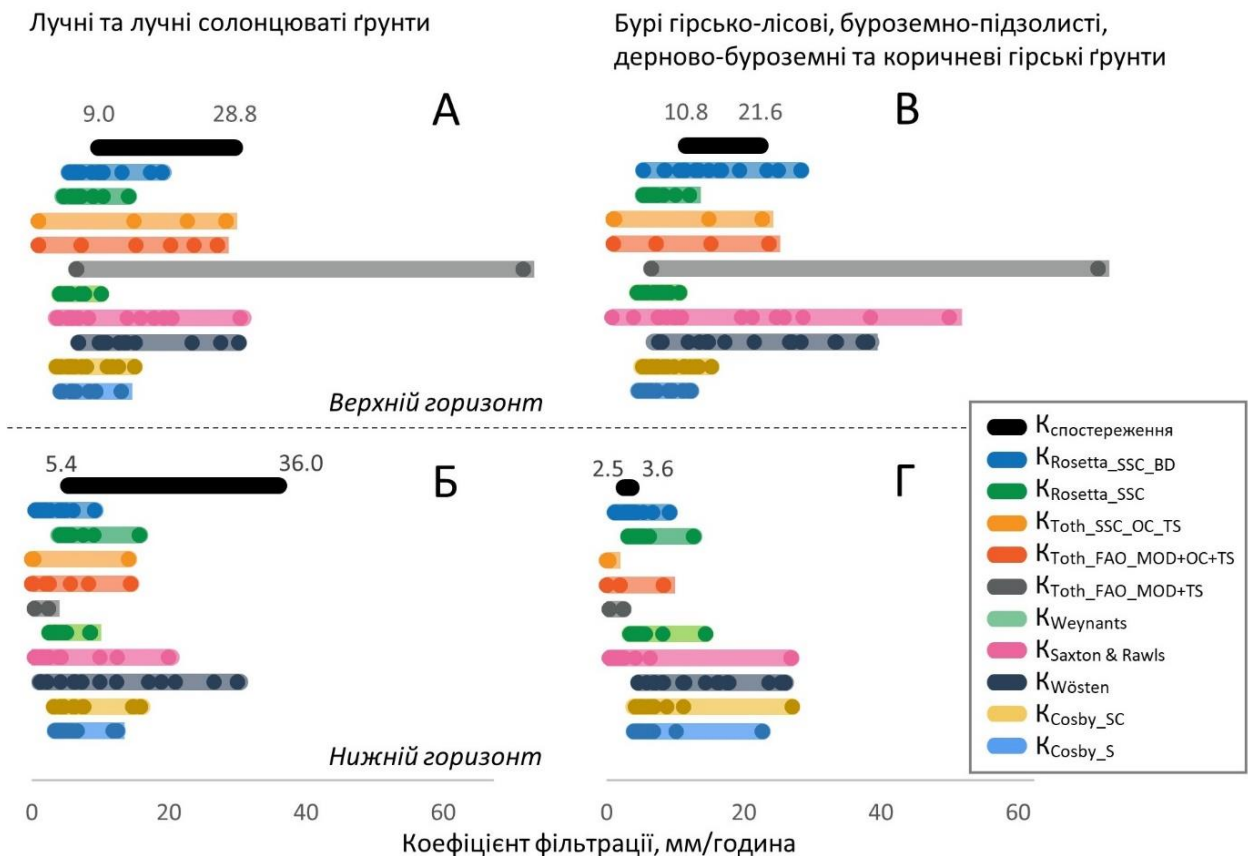


Рис. 4. Порівняння K_f лучних та гірських ґрунтів з експериментальними значеннями (за матеріалам [17])

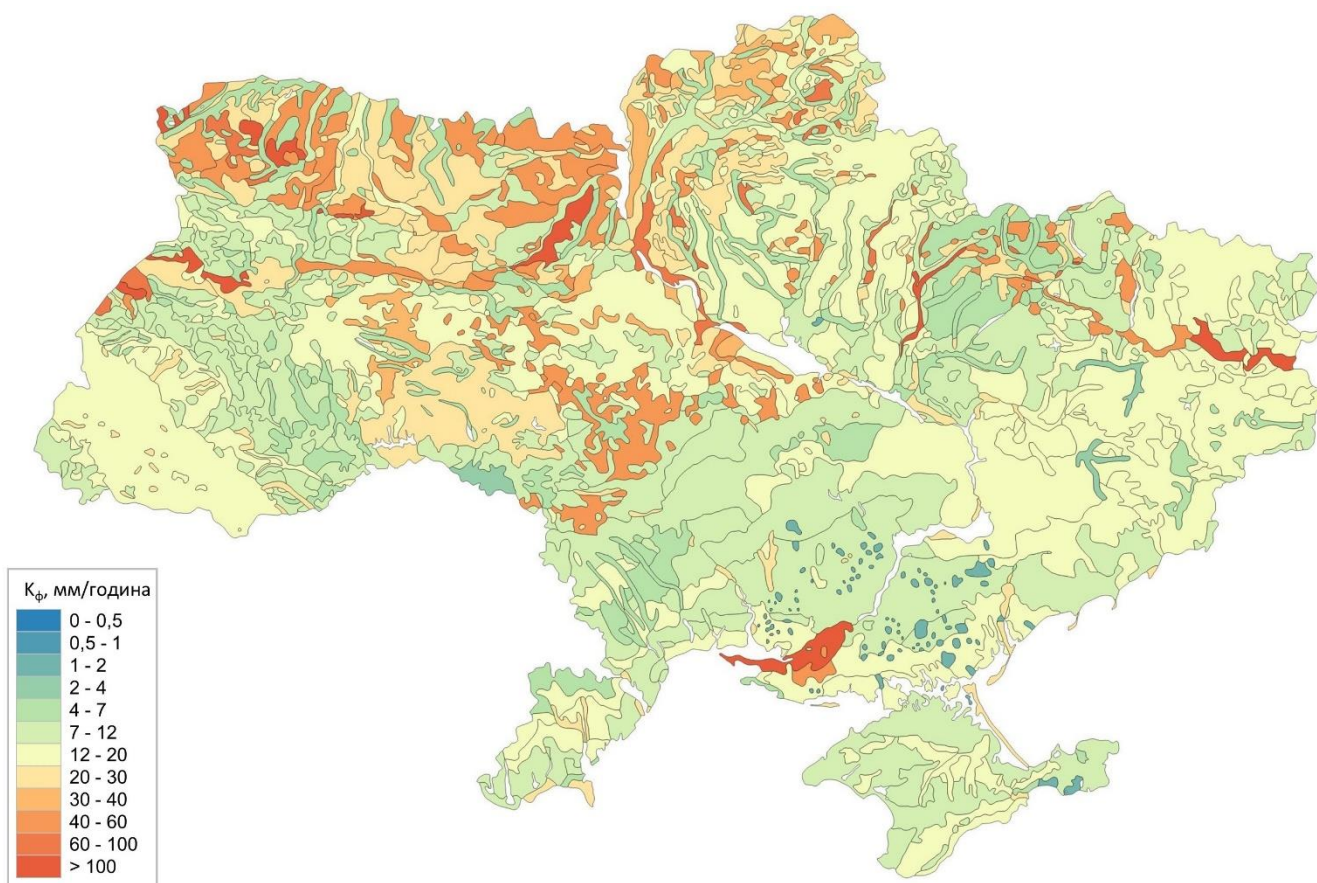


Рис. 5. К_φ верхнього шару (горизонти А₀, А₁) ґрунтів України

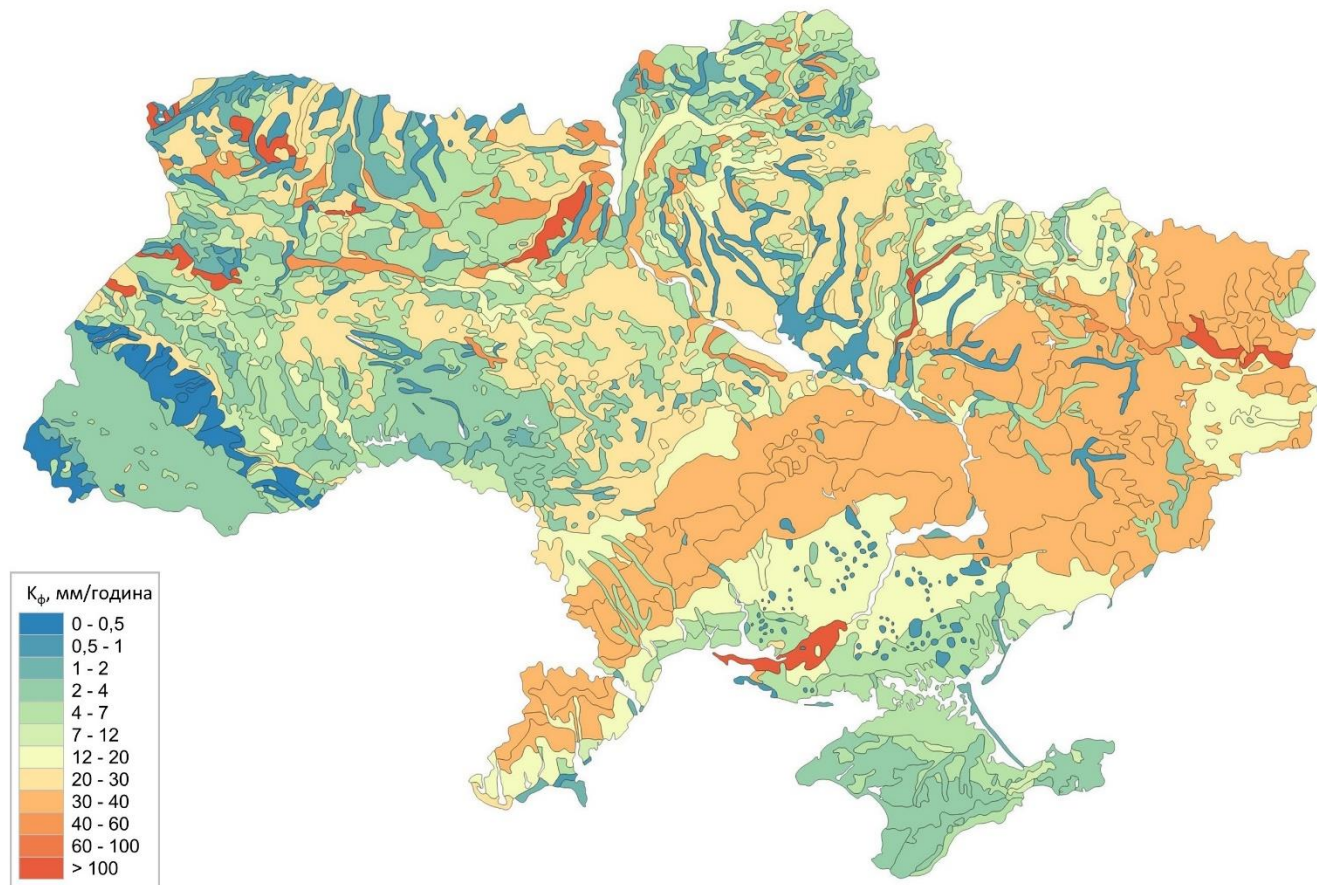


Рис. 6. К_φ нижнього шару (мінімальне серед горизонтів А₂, В, С) ґрунтів України

вих вод.

Далі на південь гранулометричний склад змінюється з переважно легкосуглинкових та середньосуглинкових ґрунтів лісостепу до важкосуглинкових та глинистих ґрунтів степової зони. Але такої ж зональної тенденції зменшення K_f не спостерігається, тому що здебільшого території розповсюджені чорноземи, що мають високі структурні характеристики та гарно пропускають вологу. K_f верхнього шару чорноземів 5-20 мм/година й ще більш високі для нижнього шару – 10-40 мм/година. Приблизно такі самі K_f для верхнього шару мають сірі, темно-сірі опідзолені ґрунти та чорноземи опідзолені, бурі гірсько-лісові та дерново-буроземні ґрунти (10-25 мм/година), хоча мають більш легкий склад, переважно легкосуглинковий. K_f нижнього шару, як порівняти з чорноземами, менший – 2,5-7 мм/година. K_f лучно-чорноземних та лучних ґрунтів, що поширені на терасах річок, депресіях на плато та поймах, зменшується з поглибленням процесів солонцювання та осолодіння – найменші значення мають солонці, осолоділі глейові ґрунти та солоді (0,2-3 мм/година).

Коли коефіцієнт фільтрації материнських порід або горизонтів ґрунтового профілю виявляється рівним або нижче 0,05 м/доба (≈ 2 мм/година), то такі шари можна розглядати як водотривкі [20]. Над ними часто формується верховодка, що призводить до заболочування ґрунту.

Варто зауважити, що K_f залежить не тільки від ґрунту та гранулометричного складу, а й від ландшафтного розташування ґрунтового розрізу й сільськогосподарських практик, що застосовуються [14]. Ці параметри також можуть бути складником ПТФ [2], але на регіональному рівні. Також не варто забувати, що під час сніготанення при контакті з мерзлим ґрунтом взагалі може утворюватися водонепроникний шар [21]. Тому отримана карта K_f показує найбільш імовірні значення, а не встановлює достовірне значення для будь-якої точки.

Висновки. У роботі розглянуто ПТФ, які для розрахунку K_f використовують гранулометричний склад, щільність будови, вміст органічного вуглецю або гумусу. На відміну від фільтраційних властивостей, цю інформацію набагато легше встановити для всіх основних ґрунтів України, та їхніх окремих генетичних горизонтів. У такий спосіб розраховано K_f верхнього та нижнього шарів усіх 40-ка класів ґрунтів України, що відповідають карті масштабу 1:2 500 000.

Співставлення з наявними даними K_f показує, що серед усіх найчастіше релевантні зна-

чення мають ПТФ W_{osten} ($K_{W_{\text{osten}}}$) та Rosetta3 ($K_{\text{Rosetta_SSC_BD}}$). Для розрахунку K_f верхнього шару дерново-слабопідзолистих ґрунтів рекомендовано $K_{W_{\text{osten}}}$, середньопідзолистих – $K_{\text{Rosetta_SSC_BD}}$. У літературі відсутні конкретні значення K_f нижнього шару піщаних та супіщаних дерново-підзолистих ґрунтів, але відомо, що швидкість фільтрації значно зменшується через наявність ілювіального горизонту. Найкраще цю тенденцію відтворює Rosetta3 – K_f супіщаних дерново-середньопідзолистих ґрунтів з 10-25 для верхнього зменшується до 2-6 мм/година для нижнього шару. Для верхнього шару ясно-сірих та сірих опідзолених ґрунтів найбільш релевантні значення є в $K_{\text{Saxton \& Rawls}}$, темно-сірих опідзолених – $K_{W_{\text{osten}}}$, чорноземів опідзолених – $K_{\text{Rosetta_SSC_BD}}$, для нижнього шару згаданих ґрунтів – K_{Weynants} . Структурність чорноземів сприяє фільтрації, що важко передати за допомогою ПТФ, тому всі вони занижують K_f нижнього шару типових середньогумусних та звичайних чорноземів, тільки для типових малогумусних та південних чорноземів можна використати $K_{W_{\text{osten}}}$. Для верхнього шару підходять $K_{\text{Saxton \& Rawls}}$ (чорноземи типові), $K_{\text{Rosetta_SSC_BD}}$ (чорноземи звичайні малогумусні, чорноземи типові залишково солонцюваті), $K_{W_{\text{osten}}}$ (чорноземи звичайні середньогумусні та південні). Верхній шар лугово-чорноземних (окрім глибоко-солонцюватих), темно-каштанових та каштанових ґрунтів найкраще описує $K_{\text{Rosetta_SSC_BD}}$, а нижній – $K_{W_{\text{osten}}}$. Увесь профіль лучних ґрунтів – $K_{W_{\text{osten}}}$. А для бурих гірсько-лісових, дерново-буроземних та коричневих ґрунтів найбільш релевантні значення отримано за $K_{\text{Rosetta_SSC_BD}}$ для нижнього та верхнього шарів.

На жаль усі ПТФ завищують значення K_f , коли значення, що отримано спостереженнями, дуже низькі – 0,2-3 мм/година (лучно-чорноземні глибоко солонцюваті ґрунти, солонці, осолоділі глейові ґрунти та солоді, нижній шар дернових оглеєних ґрунтів). Також зазначимо, що за експериментальними даними K_f лучно-болотних та торф'яно-болотних ґрунтів коливається в широких межах (1-144 мм/година), але наявних розрізів у базі даних недостатньо, щоби оцінити якість ПТФ.

В результаті синтезу експериментальних та розрахункових значень, на основі карти ґрунтів України масштабу 1:2 500 000 отримано карту, що відображає найбільш імовірний діапазон K_f нижнього та верхнього шарів усіх представлених на карті класів ґрунтів, що достатньо точно для використання її у моделюванні гідрологічних та геофізичних процесів.

Література

1. Osypov V. The desna river daily multi-site streamflow modeling using swat with detail snowmelt adjustment / V. Osypov, N. Osadcha, D. Hlotka[et al.] // *Journal of Geography and Geology*. – 2018. – Vol. 10, No. 3. – P. 92–110.
2. Wösten J. H. M. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics / J. H. M. Wösten, Y. A. Pachepsky, W. J. Rawls // *Journal of Hydrology*. – 2001. – Vol. 251, No. 3–4. – P. 123–150.
3. Van Looy K. Pedotransfer functions in earth system science: challenges and perspectives / K. Van Looy, J. Bouma, M. Herbst[et al.] // *Reviews of Geophysics*. – 2017. – Vol. 55, No. 4. – P. 1199–1256.
4. Zhang Y. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: a review / Y. Zhang, M. G. Schaap // *Journal of Hydrology*. – 2019. – Vol. 575. – P. 1011–1030.
5. Cosby B. J. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils / B. J. Cosby, G. M. Hornberger, R. B. Clapp, T. R. Ginn // *Water Resources Research*. – 1984. – Vol. 20, No. 6. – P. 682–690.
6. Wösten J. H. Development and use of a database of hydraulic properties of european soils / J. H. Wösten, A. Lilly, A. Nemes, C. Le Bas // *Geoderma*. – 1999. – Vol. 90, No. 3–4. – P. 169–185.
7. Saxton K. E. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions / K. E. Saxton, W. J. Rawls // *Soil Science Society of America Journal*. – 2006. – Vol. 70, No. 5. – P. 1569–1578.
8. Weynants M. Revisiting vereecken pedotransfer functions: introducing a closed-form hydraulic model / M. Weynants, H. Vereecken, M. Javaux // *Vadose Zone Journal*. – 2009. – Vol. 8, No. 1. – P. 86–95.
9. Tóth B. New generation of hydraulic pedotransfer functions for europe / B. Tóth, M. Weynants, A. Nemes [et al.] // *European Journal of Soil Science*. – 2015. – Vol. 66, No. 1. – P. 226–238.
10. Zhang Y. Weighted recalibration of the rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3) / Y. Zhang, M. G. Schaap // *Journal of Hydrology*. – 2017. – Vol. 547. – P. 39–53.
11. Лактионова Т. Н. База даних “Свойства почв України” (структура и порядок использования) / Т. Н. Лактионова, В. В. Медведев, К. В. Савченко[et al.]. – Харьков : ЦТ №1, 2012. – 150 с.
12. Справочник агрогидрологических свойств почв Украинской ССР / Ред. А. А. Мороз. – Ленинград : Гидрометеорологическое изд., 1965. – 550 р.
13. Атлас почв Украинской ССР / Ред. Н. К. Крупский, Н. И. Полупан. – Киев : Урожай, 1979. – 160 с.
14. Почвы украины и повышение их плодородия. т.1. экология, режимы и процессы, классификация и генетико-производственные аспекты / Ред. Н. И. Полупан. – Киев : Урожай, 1988. – 296 с.
15. Почвенная карта Украинской ССР. Масштаб 1:2500000. Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР (ГУГК). УкрНИИ почвоведения и агрохимии им. А.Н. Соколовского / Ред. Н. К. Крупский. – Москва: 1977.
16. Роде А. А. Водные свойства почв и грунтов / А. А. Роде. – Москва : Изд. Академии наук СССР, 1955. – 132 с.
17. Почвенно-мелиоративное районирование. Масштаб 1:4000000 / Атлас природных условий и естественных ресурсов Украинской ССР. – Москва : ГУГК, 1978. – С. 183.
18. Иовенко Н. Г. Водно-физические свойства и водный режим почв усср / Н. Г. Иовенко. – Ленинград : Гидромет. изд., 1960. – 352 с.
19. Романова Т. А. Водный режим почв беларуси / Т. А. Романова. – Минск : ИВЦ Минфина, 2015. – 144 с.
20. Зайдельман Ф. Р. Мелиорация почв / Ф. Р. Зайдельман. – Москва : Изд-во МГУ, 1987. – 305 с.
21. Будник С. В. Гидродинамика и гидрохимия склоновых водотоков / С. В. Будник, В. К. Хильчевский. – Киев : ИГЛ “Обрії,” 2005. – 368 с.

Внесок авторів: Осипов В.В. – концептуалізація, підготовка вхідних даних, методологія, розрахунки, написання тексту; Бігун О.М. – підготовка вхідних даних, написання тексту.

UDC 631.43

Osypov Valeriy,

PhD (Geography), Senior Researcher, Hydrochemistry Department,
Ukrainian Hydrometeorological Institute, 37 Nauki Av., Kyiv, 03028, Ukraine,
e-mail: valery_osipov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4853-8021>;

Bihun Oksana,

PhD (Agriculture), Senior Scientist Researcher, Geoecophysics of Soil Laboratory,
National Scientific Center “O.N. Sokolovsky Institute for Soil Science and Agrochemistry Researched”,
4 Chaikovska St., Kharkiv, 61024, Ukraine,
e-mail: oksana_bigun@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8461-4928>

EVALUATION OF PEDOTRANSFER FUNCTIONS TO PREDICT SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF UKRAINIAN SOILS

Literature overview. The parameterization of hydrological models requires knowledge of the soil filtration properties. Generally, soil profiles are characterized by properties such as sand, silt and clay content, bulk density, organic carbon fraction or humus content, and no data on filtration properties are available. Ukrainian soil database, created in Geoecophysics of soil laboratory of National Scientific Center “Institute for Soil Science and Agrochemistry Researched named after O.N. Sokolovsky” (Laktionova et al., 2012), among other properties has extensive data on texture and bulk density for more than 2000 profiles, less on organic carbon content, and almost no data on saturated hydraulic conductivity (K_{sat}). The most probable ranges of K_{sat} for most types of Ukrainian soils are given in the Atlas of natural conditions and natural resources of the Ukrainian SSR (“Pochvenno-meliorativnoye rayonirovaniye. Masshtab 1:4000000,” 1978), however, the data doesn't present K_{sat} for different textures inside one soil type. To fill this gap, the best solution is the applying of pedotransfer function (PTF).

The purpose of this work is to synthesize the most realistic K_{sat} of the main soil groups of Ukraine, corresponding to a scale map of 1:2 500 000 (Krupskiy, 1977), as well as their genetic horizons, on the basis of calculated and experimental values available in the literature.

Material and methods. Ten PTFs used in the study are based on regression equations (Cosby et al., 1984; Saxton & Rawls, 2006; Weynants et al., 2009; Wösten et al., 1999), decision tree (Tóth et al., 2015), or neural network (Zhang & Schaap, 2017). K_{sat} was estimated for 942 horizons of 171 profiles which represented all 40 soil groups (corresponding to the legend of 1:2 500 000 map) of Ukraine according to Dokuchaev classification.

Results. Wösten and Rosetta3 PTFs are determined as the most relevant by comparing the calculated K_{sat} values with the available data of the bottom (horizons A₂, B, C) and top (A₀, A₁) soil layers of Ukraine. In particular, they are relevant for widespread soils such as Soddy podzolic soils (WRB – Eutric podzoluvols), dark gray podzolized soils (Phaeozems Albic), chernozems podzolized (Chernozems Chernic), chernozems southern (Chernozems Calcic), meadow-chernozemic soils (Phaeozems Haplic), dark chestnut and chestnut soils (Kastanozems Haplic and Kastanozems Luvic), meadow soils (Umbrisols Gleic, Fluvisols Dystric, Fluvisols Eutric, Leptosols Umbric), mountain soils (Cambisols), and top layer of Chernozems ordinary (Chernozems Chernic). Unfortunately, all ten PTFs underestimate 2-4 times K_{sat} of bottom layer of ordinary and typical chernozems (Chernozems Chernic) and overestimate 2-5 times for relatively impermeable horizons (< 2 mm/h).

Conclusions. Based on the calculated and experimental values, the map of K_{sat} of the top and bottom soil layers was obtained. Sandy soils, common in Polissia, have the highest filtration rate. K_{sat} of loam and clay soils of forest-steppe and steppe can differ between different types by an order. The highest K_{sat} have soils with high structural properties (Chernozems Luvic, Chernozems Chernic). The lowest K_{sat} (0.2-3 mm/h) have Phaeozems Sodic, Solonetz, Solonchaks, Planosols Albic, and bottom layer of soddy manly gley (Arenosols Protic/ Haplic) and loamy soddy podzolic soils (Albelvisols Umbric). The estimated values should be considered as the most probable because K_{sat} depends on landscape location of soil profile, tillage operations, and soil temperate. The results are acceptable to use in hydrological calculations and modeling.

Keywords: pedotransfer function, saturated hydraulic conductivity, soil texture, soil map of Ukraine, Rosetta3.

References

1. Osypov, V., Osadcha, N., Hlotka, D., Osadchyi, V., & Nabyvanets, J. (2018). The Desna River Daily Multi-Site Streamflow Modeling Using SWAT with Detail Snowmelt Adjustment. *Journal of Geography and Geology*, 10(3), 92–110. <https://doi.org/10.5539/jgg.v10n3p92>

2. Wösten, J. H. M., Pachepsky, Y. A., & Rawls, W. J. (2001). Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251(3–4), 123–150. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00464-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00464-4)
3. Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., ... Vereecken, H. (2017). Pedotransfer Functions in Earth System Science: Challenges and Perspectives. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1199–1256. <https://doi.org/10.1002/2017RG000581>
4. Zhang, Y., & Schaap, M. G. (2019). Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. *Journal of Hydrology*, 575, 1011–1030. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.058>
5. Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B., & Ginn, T. R. (1984). A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils. *Water Resources Research*, 20(6), 682–690. <https://doi.org/10.1029/WR020i006p00682>
6. Wösten, J. H. ., Lilly, A., Nemes, A., & Le Bas, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90(3–4), 169–185. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3)
7. Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
8. Weynants, M., Vereecken, H., & Javaux, M. (2009). Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions: Introducing a Closed-Form Hydraulic Model. *Vadose Zone Journal*, 8(1), 86–95. <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0062>
9. Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G., & Tóth, G. (2015). New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*, 66(1), 226–238. <https://doi.org/10.1111/ejss.12192>
10. Zhang, Y., & Schaap, M. G. (2017). Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). *Journal of Hydrology*, 547, 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.004>
11. Laktionova, T. M., Medvedev, V. V., Savchenko, K. V., Bigun, O. M., Sheiko, S. M., & Nakisko, S. G. (2012). *Soil properties database (structure & operating procedure) (2nd ed.)*. DT #1.
12. Moroz, A. A. (Ed.). (1965). *Handbook of agrohydrological properties of soils of the Ukrainian SSR*. Leningrad: Gidrometeorologicheskoye izd.
13. Krupskiy, N. K., & Polupan, N. I. (Eds.) (1979). *Atlas of soils of the Ukrainian SSR*. Kyiv: Urozhay.
14. Polupan, N. I. (Ed.). (1988). *Soils of Ukraine and increasing their fertility. T.1. Ecology, water regimes and processes, classification and genetic-production aspects*. Kyiv: Urozhay.
15. Krupskiy, N. K. (Ed.) (1977). *Soil map of the Ukrainian SSR. Scale 1:2500000*. Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR (GUGK). Ukrainian Research Institute of Soil Science and Agricultural Chemistry named after O.N. Sokolovsky. Moscow.
16. Rode, A. A. (1955). *Water properties of soils*. Moscow: Izd. Akademii nauk SSSR.
17. *Soil-melioration zoning. Scale 1:4000000*. (1978). In *Atlas of natural conditions and natural resources of the Ukrainian SSR*. Moscow: GUGK, 126.
18. Iovenko, N. G. (1960). *Hydrophysical properties and water regime of soils of the Ukrainian SSR*. Leningrad: Gidromet. izd.
19. Romanova, T. A. (2015). *Water regime of Belarus soils*. Minsk: ICC of the Ministry of Finance.
20. Zaydelman, F. R. (1987). *Melioratsiya pochv*. Moscow: Izd. MGU.
21. Budnik, S. V., & Kchilchevsky, V. K. (2005). *Hydrodynamics and hydrochemistry of flows*. Kyiv: Obriyi Publisher.