

УДК 631.43:519.24

Педотрансферні функції фізичних властивостей ґрунтів: методологічні підходи до розроблення, каталог моделей та схеми локальної валідації

О. М. Бігун

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
<p>Отримано 12.03.2026 Отримано після доопрацювання 02.06.2026 Затверджено до видання 08.06.2026 Доступно онлайн 30.06.2026</p> <p><i>Ключові слова:</i></p> <p>педотрансферні функції (ПТФ); щільність будови; щільність твердої фази; каталог ПТФ; схеми локальної валідації ПТФ</p>	<p>Педотрансферне моделювання застосовують як альтернативний метод визначення ґрунтових властивостей, пряме вимірювання яких є технічно складним та фінансово витратним. Фізичні властивості ґрунту, такі як щільність будови, щільність твердої фази, загальна пористість, часто визначають за допомогою педотрансферних функцій (ПТФ) та використовують для оцінювання якості ґрунтів, виявлення деградації, параметризації процесних моделей. Розроблення достовірних ПТФ здійснюють з дотриманням певних методологічних підходів, а апробація моделей із інших регіонів на локальних даних потребує обов'язкової гармонізації вхідних даних і незалежної валідації, оскільки відмінності у методах визначення предикторів і межах гранулометричних фракцій можуть знижувати точність прогнозів. Метою дослідження є узагальнення методичних підходів до побудови ПТФ фізичних властивостей ґрунтів, формування каталогу моделей та схем їх апробації на локальних наборах даних. Використано теоретико-аналітичний метод для узагальнення підходів та вибору ПТФ. Результатами досліджень встановлено, що локально-специфічні ПТФ розробляються із застосуванням стратифікації даних, методів статистичної регресії та машинного навчання. Надійність моделей оцінюється за допомогою валідації — як статистичної, так і шляхом порівняння із ПТФ інших регіонів. Сформовано каталог, що включає 14 ПТФ щільності будови та 5 — щільності твердої фази, верифікованих на європейських ґрунтових вибірках, що використовують, як предиктори, органічний вуглець, гумус та/або гранулометричний склад. Подано схеми їх валідації залежно від доступності даних та необхідності застосування конвертації вхідних змінних через неузгодженість національної та міжнародних систем класифікації ґрунтових гранулометричних фракцій. Окреслено пріоритетні напрями розвитку педотрансферного моделювання в Україні, що включають систематичне поповнення національних баз ґрунтових даних, формування відкритих тематичних наборів, розроблення ПТФ для специфічних екосистем, впровадження інноваційних методів отримання вхідних даних (спектроскопії, ISP+) та створення доступних програмних інструментів для практичного застосування моделей. З метою гармонізації національної класифікації гранулометричного складу з міжнародними системами (FAO/USDA) запропоновано доповнити стандартний аналітичний протокол додатковими вимірюваннями вмісту часток розміром 2 та 0,002 мм, що забезпечить придатність результатів для використання за чинними державними нормативами оцінювання якості ґрунтових ресурсів, а також порівнюваність із загальноєвропейськими і глобальними ґрунтово-інформаційними продуктами</p>

✉ oksana_bigun@ukr.net

ORCID: 0000-0002-8461-4928

Форма цитування: Бігун О. М. Педотрансферні функції фізичних властивостей ґрунтів: методологічні підходи до розроблення, каталог моделей та схеми локальної валідації. *Агрохімія і ґрунтознавство* / ННЦ «Ін-т ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського». Харків, 2026. Вип. 100. С. 21–37. <https://doi.org/10.31073/acss100-02>

Поширення статті здійснюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY–NC 4.0

1. Вступ

Кількісне оцінювання властивостей ґрунтів необхідне для визначення їх якості, виявлення деградаційних процесів, а також параметризації процесних моделей прогнозування змін ґрунтових екосистем під впливом клімату та антропогенних чинників [1]. Водночас пряме вимірювання фізичних та водно-фізичних характеристик часто є технічно складним, фінансово витратним і трудомістким. Через ці обмеження відповідні показники переважно відсутні у базах даних моніторингу та матеріалах традиційних ґрунтових обстежень [2]. Для подолання дефіциту інформації та доповнення прогалів у даних застосовують

метод педотрансферного моделювання — визначення необхідних параметрів на основі емпіричних статистичних залежностей (педотрансферних функцій, ПТФ) із використанням доступних ґрунтових показників [3–5].

Підходи педотрансферного моделювання досить широко застосовуються у сучасних ґрунтознавчих дослідженнях. Зокрема, у цифровому картографуванні — для збільшення просторової щільності даних при створенні тематичних карт [6]. ПТФ окремих властивостей інтегровано в біофізичні моделі для прогнозування ґрунтових процесів та еволюції ґрунтів. Також, у деяких національних [7–9] та загальноєвропейській системах оцінювання ґрунтів [10] визначення показників, пряме вимірювання яких є фінансово витратним, запропоновано здійснювати за допомогою локально верифікованих ПТФ. У недавній дискусійній статті, присвяченій майбутній ролі ґрунтознавства в суспільстві, Bouma [11] розглядає розвиток педотрансферного моделювання як один із пріоритетних напрямів для кількісного оцінювання внеску ґрунтів у надання екосистемних послуг відповідно до Цілей сталого розвитку.

Водночас, попри тривалий період розроблення ПТФ, досі бракує узгодженості щодо застосовності ПТФ за межами територій їх калібрування [3, 12]. У зв'язку з цим сучасні дослідження спрямовані не лише на створення нових моделей, а й на оцінювання ефективності вже опублікованих ПТФ на локальних наборах даних. Зокрема, Kaur et al. [13] використали базу даних із 224 зразків із Індії для оцінювання 12 опублікованих ПТФ. Подібні дослідження також були проведені De Vos et al. [14] для ґрунтів Бельгії, Vasiliniuc & Patriche [15] — Румунії, Abdelbaki et al. [16] — США. McBratney et al. [17] пропонують більш ефективно використовувати вже опубліковані ПТФ шляхом створення їхніх каталогів і колекцій, а також інтеграції всіх доступних рівнянь у систему, що підказуватиме досліднику найбільш придатну модель для конкретного типу ґрунту.

В Україні розробленню та апробації ПТФ присвячено небагато робіт: зокрема, моделі для окремих типів ґрунтів запропонували Laktionova & Nakisko [18], Лядська [19], Dmytruk et al. [20], ґрунтів ріллі — Медведєв та ін. [21]; приклади їх застосування для створення цифрових ґрунтових карт продемонстровано у працях Осипова та Бігун [22], Cherlinka et al. [23]. Втім, попри накопичений досвід, цей напрям залишається недостатньо розвиненим порівняно з європейською практикою.

Дослідники наголошують — найбільш достовірні ПТФ можна отримати на даних, параметри яких визначено за єдиними стандартизованими протоколами [12]. Перед застосуванням (апробації) моделей розроблених для інших територій на локальних даних необхідно враховувати особливості методів визначення предикторів і виконувати відповідні процедури гармонізації вхідних змінних. Крім того, важливо коректно відібрати моделі, потенційно придатні для конкретних ґрунтово-кліматичних умов [24].

Розроблення локальних ПТФ фізичних властивостей залишається актуальним напрямом досліджень, оскільки отримання нових ґрунтових даних часто обмежене. Зокрема, показники щільність будови необхідні для обчислення запасів органічного вуглецю, продуктивної вологи та поживних елементів, а також в імітаційному моделюванні для прогнозування впливу агротехнічних заходів на функціонування ґрунту [24]; щільності твердої фази — для визначення загальної пористості та діагностування переущільнення ґрунтів [25].

Метою дослідження є: 1) узагальнення методичних підходів до побудови локально-специфічних педотрансферних функцій (ПТФ) фізичних властивостей ґрунту на основі систематизації досвіду країн Європейського континенту; 2) формування каталогу ПТФ, потенційно придатних для апробації в ґрунтово-кліматичних умовах України; 3) розробка, на локальних наборах даних, схем

валідації ПТФ, що враховують особливості конвертації показників національної класифікації гранулометричного складу у міжнародні.

2. Матеріал і методи дослідження

Дослідження базується на аналізованні рецензованих наукових публікацій, що присвячені розробці та апробації ПТФ фізичних властивостей ґрунтів, а саме щільності будови та щільності твердої фази ґрунту. Для узагальнення методологічних підходів використано теоретико-аналітичний метод.

3. Результати дослідження

3.1. Методологічні підходи до розроблення ПТФ

Систематизацію та узагальнення методичних підходів побудови педотрансферних моделей фізичних властивостей ґрунтів здійснено на основі публікацій, де описано їх розробку виключно на ґрунтових наборах даних Європейського континенту (Табл. 1).

Таблиця 1

Підходи до опрацювання ґрунтових даних для педотрансферного моделювання фізичних властивостей ґрунтів

Регіон дослідження, прогнозований показник, публікація	Джерело даних для калібрування ПТФ	Стратифікація вибірки	Метод прогнозування	Валідація ПТФ	Призначення та застосування ПТФ
Австрія (ЩБ) [26], Бельгія (ЩБ) [14], Греція (ЩБ) [27], Естонія (ЩБ) [28], Словаччина (ЩБ) [29], Іспанія (ЩБ) [30], Ірландія (ЩБ) [31], Польща (ЩБ) [32], Словенія (ЩБ) [33], Угорщина (ЩБ) [5], Франція (ЩБ) [34], Велика Британія (ЩБ) [35], Швеція (ЩБ) [36], Данія (ЩТФ) [37]	- національні ґрунтові бази даних та набори даних [5, 14, 26, 28-37]; - спеціальні кампанії обстеження ґрунтів [27]	- за типом землекористування [14, 26, 29]; - за рівнем вмісту органічної речовини / гумусу [33, 36-37]; - за генетичними горизонтами, глибиною [5, 28, 31, 32, 35, 36]; - за текстурними класами [28, 36]	- множинна регресія (побудова нових локальних ПТФ) [5, 26-30, 32, 33, 35-37]; - множинна регресія (рекалібрування ПТФ) [14, 31]; - регресія найменших квадратів [27]; - регресія головних компонент [27]; - узагальнені адитивні моделі [5, 34]; - моделі змішаних ефектів [28]; - випадковий ліс [5, 30]; - нейронні мережі [5, 30]	- поділ вибірки на підмножини для калібрування та валідації [14, 28, 30, 31, 34]; - незалежний набір даних [32, 33, 35-37]; - крос-валідація [5, 26]; - порівняння із опублікованими ПТФ із інших регіонів [14, 26, 27, 29, 31-34, 36]	- розроблення локально каліброваних ПТФ, у тому числі для специфічних екосистем [14, 27-28, 32, 34-37]; - побудова національних карт властивостей ґрунтів [29-31]; - інвентаризація запасів органічного вуглецю в лісових і сільськогосподарських ґрунтах [26, 29, 33]; - створення еталонного набору даних щільності будови національної інформаційної системи моніторингу ґрунтів [5]
Україна (ЩБ) [21]	- база даних «Властивості ґрунтів України»	- за типом землекористування	- лінійна та множинна регресії	- не виконували	- розроблення локальних ПТФ

Примітка. ЩБ – щільність будови ґрунту, ЩТФ – щільність твердої фази ґрунту

Аналіз даних, представлених у таблиці 1, свідчить, що розроблення локальних ПТФ у європейських дослідженнях базується на використанні національних або тематичних ґрунтових баз даних. Для підвищення прогностичної точності та валідності моделей дослідники застосовують стратифікацію вихідної інформації за варіантами землекористування (орні землі, лісові угіддя), вмістом органічного вуглецю, генетичними горизонтами, глибинами. Найпоширенішим методом моделювання залишається множинна лінійна регресія, яку застосовують як для рекалібрування до локальних умов моделей, розроблених для інших регіонів, так і для побудови нових ПТФ. Водночас дослідники застосовують алгоритми машинного навчання, зокрема випадкового лісу та штучних нейронних мереж. Надійність моделей оцінюють за допомогою незалежних наборів даних, крос-валідації, поділу вибірки на калібрувальну та валідаційну частини, а також шляхом порівняльного аналізу із опублікованими ПТФ з інших регіонів (Табл. 1).

Слід звернути увагу, що локальні ПТФ, запропоновані Медведєвим та ін. [21], розроблено лише для верхнього шару сільськогосподарських орних ґрунтів, що обмежує можливість їх застосування для глибших шарів. Крім того, валідацію розроблених моделей не було проведено, тому перед їх використанням доцільно виконувати попереднє тестування цієї ПТФ на наявних локальних даних та порівняти результати з альтернативними ПТФ, створеними для подібних ґрунтово-кліматичних умов.

3.2. Каталог ПТФ щільності будови та щільності твердої фази ґрунту

У науковій літературі доступний великий вибір ПТФ. Так, наприклад, для тестування ПТФ щільності будови на локальних даних Do et al. [38] було відібрано 36 ПТФ, Sevastas et al. [27] — 56, Arbor et al. [39] — 73. Однак існують певні обмеження щодо перенесення ПТФ за межі географічних регіонів та кліматичних зон, для яких вони були побудовані. Зокрема доведено, що моделі, розроблені на основі даних із помірнього клімату, демонструють низьку точність прогнозування для ґрунтів тропічних регіонів [3, 40], що зумовлено суттєвими відмінностями у фізичних, хімічних та мінералогічних властивостях ґрунтів цих зон.

У межах даної роботи сформовано каталог ПТФ фізичних властивостей, до якого включено моделі, розроблені для ґрунтів Європейського континенту або продемонстрували найвищу прогностичну точність під час верифікації на європейських наборах даних (Табл. 2). Застосований принцип відбору дозволяє припустити, що відібрані ПТФ потенційно придатні для апробації та застосування у ґрунтово-кліматичних умовах України.

До каталогу відібрано ПТФ, у яких використано як єдиний предиктор вміст органічного вуглецю або гумусу, лише гранулометричний склад або поєднання цих показників. Така різноманітність моделей за набором вхідних змінних дає змогу застосовувати їх до різних типів ґрунтів залежно від наявності даних. Порогові значення статистичної точності на етапі відбору не застосовували з метою забезпечення максимального розмаїття математичних форм моделей для подальшої локальної верифікації.

Окрім оригінального рівняння, для кожної ПТФ зібрано опис метаданих домену її створення [41], зокрема інформацію про регіон та специфікацію вибірки, а також статистичні характеристики точності моделі. Варто звернути увагу, що усі змінні у ПТФ гармонізовані до єдиних одиниць вимірювання, для цього в оригінальних формулах деяких моделей використано відповідні коефіцієнти перерахунку.

Перелік ПТФ для визначення щільності будови включає моделі, розроблені Makovníková et al. [29], Kobal et al. [33], Hollis et al. [35], Медведєвим та ін. [21] для

мінеральних і органічних ґрунтів країн Європи (Табл. 2). Каталог також містить моделі Manrique & Jones [42], Alexander [43] та Hossain et al. [44], створені на ґрунтових наборах даних США та Канади, ефективність яких підтверджено під час тестування на європейських наборах даних [15, 24].

Таблиця 2

Каталог ПТФ фізичних властивостей ґрунтів (щільність будови та щільність твердої фази ґрунту)

Позначення ПТФ, публікація	Рівняння ПТФ	Регіон та розмір вибірки	Специфікація вибірки для розроблення моделі	Статистичні характеристики ПТФ
ПТФ для визначення щільності будови ґрунту				
Alexander_1 [43]	$\text{ЩБ} = 1,66 - 0,308 \times \text{ОВ}^{0,5}$	США, 386	Мінеральні ґрунти	$R^2 : 0,462$; SE: 0,19
Alexander_2 [43]	$\text{ЩБ} = 1,72 - 0,294 \times \text{ОВ}^{0,5}$	США, 335	Мінеральні ґрунти	$R^2 : 0,332$; SE: 0,16
Manrique [42]	$\text{ЩБ} = 1,66 - 0,318 \times \text{ОВ}^{0,5}$	США, 19651	Мінеральні ґрунти	$R^2 : 0,41$; SE: 0,19
Hossain_1 [44]	$\text{ЩБ} = 0,071 + 1,322 \times \exp(-0,071 \times \text{ОВ})$	Канада, 1376	Мінеральні та органічні ґрунти, 0-100 см	$R^2 : 0,98$
Hossain_2 [44]	$\text{ЩБ} = 0,701 + 0,952 \times \exp(-0,29 \times \text{ОВ})$	Канада, 702	Мінеральні ґрунти, 0-100 см	$R^2 : 0,99$
Hossain_3 [44]	$\text{ЩБ} = 0,074 + 2,632 \times \exp(-0,076 \times \text{ОВ})$	Канада, 674	Органічні ґрунти, 0-100 см	$R^2 : 0,93$
Kobal_1 [33]	$\text{ЩБ} = 1,4842 - 0,1424 \times \text{ОВ}$	Словенія, 106	Мінеральні ґрунти (лише лісові угіддя) $\text{ОВ} < 3,6\%$	$R^2 : 0,79$; SE: 0,1257 *
Kobal_2 [33]	$\text{ЩБ} = 1,1253 - 0,0452 \times \text{ОВ}$		Мінеральні ґрунти (лише лісові угіддя) $\text{ОВ} > 3,6\%$	
Hollis_1 [35]	$\text{ЩБ} = 0,80806 + (0,823844 \times (\exp(-0,27993 \times \text{ОВ}))) + (0,0014065 \times \text{Пісок}_{063}) - (0,0010299 \times \text{Глина}_{002})$	Велика Британія, 333	Мінеральні ґрунти, орний шар	$R^2 : 0,62$; RMSE: 0,13
Hollis_2 [35]	$\text{ЩБ} = 0,69794 + (0,750636 \times (\exp(-0,230355 \times \text{ОВ})) + (0,0008687 \times \text{Пісок}_{063}) - (0,0005164 \times \text{Глина}_{002})$	Велика Британія, 925	Мінеральні ґрунти, підорні шари та горизонти	$R^2 : 0,63$; RMSE: 0,15
Hollis_3 [35]	$\text{ЩБ} = 1,4903 + 0,33293 \times \log(\text{ОВ})$	Велика Британія, 67	Органічні горизонти	$R^2 : 0,68$; RMSE: 0,10
Mačková_1 [29]	$\text{ЩБ} = 2,662 - 0,0076 \times \text{Ф.Глина} - 0,0102 \times \text{Пісок} - 0,0108 \times \text{Пил} - 0,0855 \times \text{ОВ}$	Словаччина, 262	Мінеральні ґрунти, шар 0-10 см	$R^2 : 0,46$; RMSE: 0,11
Mačková_2 [29]	$\text{ЩБ} = 3,1482 - 0,0118 \times \text{Ф.Глина} - 0,017 \times \text{Пісок} - 0,0152 \times \text{Пил}$	Словаччина, 262	Мінеральні ґрунти, шар 0-10 см	$R^2 : 0,27$; RMSE: 0,084
Медведев [21]	$\text{ЩБ} = 1,6929 - 0,0103 \times \text{Ф.Глина} - 0,0645 \times \text{Гумус} + 0,0001 \times \text{Ф.Глина}^2 - 0,0001 \times \text{Ф.Глина} \times \text{Гумус} + 0,0006 \times \text{Гумус}^2$	Україна, 665	Мінеральні ґрунти, шар 0-30 см	$R^2 : 0,63$; SE: 0,13
ПТФ для визначення щільності твердої фази ґрунту				
Schjønning_1 [37]	$\text{ЩТФ} = 2,686 - 2,649 \times (\text{Гумус}/100)$	Данія, 79	Мінеральні ґрунти	$R^2 : 0,769$; RMSE: 0,019
Schjønning_2 [37]	$\text{ЩТФ} = 2,652 + 0,216 \times (\text{Глина}_{002}/100) - 2,237 \times (\text{Гумус}/100)$	Данія, 79	Мінеральні ґрунти	$R^2 : 0,919$; RMSE: 0,011
Schjønning_3 [37]	$\text{ЩТФ} = 2,610 + 0,337 \times (\text{Глина}_{002}/100)$	Данія, 79	Мінеральні ґрунти, уміст гумусу $\leq 6,2\%$	$R^2 : 0,433$; RMSE: 0,030
Schjønning_4 [37]	$\text{ЩТФ} = 2,648 + 0,209 \times (\text{Глина}_{002}/100)$	Данія, 79	Мінеральні ґрунти, уміст гумусу $< 1\%$	$R^2 : 0,766$; RMSE: 0,010
Ruehlmann [45]	$\text{ЩТФ} = (((1 - (\text{Гумус}/100)) / \text{ЩТФ}_M) + ((\text{Гумус}/100) / \text{ЩТФ}_O))^{-1}$, де $\text{ЩТФ}_M = 2,663 + 0,107 \times (\text{Глина}_{002}/100)$; $\text{ЩТФ}_O = 1,241 + 0,173 \times (\text{Гумус}/100)$	Скомпільовані дані з різних країн Європи, Азії, Північної Америки та Нової Зеландії, 501	Мінеральні ґрунти, переважно орні	$R^2 : 0,972$; RMSE: 0,056; ME: 0,004
<p><i>Примітки.</i> ЩБ — щільність будови, г/см³; ЩТФ — щільність твердої фази, г/см³; ОВ — вміст органічного вуглецю, %; Гумус — вміст гумусу, %; Вміст гранулометричних часток за розміром, %: Ф.Глина — $< 0,01$ мм; Пісок — $> 0,05$ мм; Пісок_063 — $> 0,063$ мм; Пил — $0,05-0,001$ мм; Глина_002 — $< 0,002$ мм. ЩТФ_M — щільність частинок мінеральної складової ґрунту; ЩТФ_O — щільність частинок органічної речовини ґрунту.</p> <p>R^2 — коефіцієнт детермінації, RMSE — корінь середньоквадратичної похибки, ME — середня похибка, SE — стандартна похибка. Одиниці визначення RMSE, ME, SE такі ж як і в прогнозованого показника.</p> <p>*Статистичні показники розраховано для повного набору даних із застосуванням двох сегментованих за вмістом органічного вуглецю ПТФ.</p>				

Зокрема, під час апробації різних ПТФ, описаної у роботі Szabó et al. [24] на основі загальноєвропейської бази даних EU-HYDI, встановлено, що модель Alexander_2 (Табл. 2) забезпечує найвищу точність для мінеральних ґрунтів з умістом органічного вуглецю менше 12 %, тоді як модель Hossain_3 дозволяє коректно оцінювати параметри щільності будови в органічних горизонтах.

ПТФ щільності будови ґрунту мають різні параметри точності, із середньоквадратичними помилками (RMSE) в діапазоні від 0,084 до 0,15 г/см³ і коефіцієнтами детермінації (R^2) від 0,27 до 0,99 (Табл. 2). Органічний вуглець виступає ключовим предиктором у моделюванні щільності будови ґрунту Дослідження, присвячені тестуванню різних ПТФ на локальних даних, свідчать, що моделі, побудовані лише на основі органічного вуглецю або гумусу забезпечують вищу точність прогнозування порівняно із іншими ПТФ [14–16, 39]. Апробація різних ПТФ на лісових ґрунтах Бельгії демонструє, що моделі, які базуються на показниках органічного вуглецю, здатні пояснити близько 55 % загальної варіації щільності будови та мають нижчу RMSE порівняно з моделями, розробленими на основі характеристик гранулометричного складу [14]. Подібні висновки отримано на ґрунтах Румунії, де моделі з органічним вуглецем або гумусом як основними предикторами мали нижчі значення середньої абсолютної похибки (ME) порівняно з моделями, які додатково враховували показники гранулометричного складу [15]. Валідація ПТФ на ґрунтових даних Чернівецької області також підтвердила, що вміст гумусу має значно більший вплив на мінливість щільності будови, ніж вміст глини [23]. Водночас, поєднання органічного вуглецю та гранулометричного складу у моделях дозволяє пояснювати понад 60 % варіації показника [29].

Локальна ПТФ щільності будови, розроблена на основі репрезентативної вибірки з бази даних «Властивості ґрунтів України», базується на використанні двох ключових предикторів – вмісту гумусу та фізичної глини (<0,01 мм) [21]. Запропонована модель описується поліноміальним рівнянням другого порядку, яке пояснює 63 % ($R^2 = 0,63$) загальної варіації показника. Калібрувальна вибірка охоплювала орний шар (0–30 см) основних типів ґрунтів України з широким діапазоном вхідних параметрів: вміст гумусу варіював від 0,1 до 21,7 %, фізичної глини – від 2,1 до 86,4 %, а значення щільності будови – від 0,71 до 1,69 г/см³.

Хотілося б зауважити, недавніми дослідженнями Fuentes-Guevara et al. [46] виявлено, що ефективність ПТФ при застосуванні до нових масивів даних визначається насамперед подібністю кореляційної структури між предикторами, а також предикторами та цільовою (прогнозованою) властивістю. Таким чином, якщо структура кореляцій у новому наборі даних відрізняється від тієї, на основі якої була розроблена модель, навіть локальні ПТФ можуть втрачати прогностичну надійність, що підкреслює необхідність обов'язкової валідації та, за потреби, рекалібрування ПТФ перед застосуванням.

До каталогу також відібрано ПТФ для визначення параметрів щільності твердої фази необхідних для розрахунку загальної пористості – одного із ключових показників, що використовуються для виявлення ущільнення ґрунту [25]. Зазвичай, за відсутності прямих вимірювань щільність твердої фази приймають рівною 2,65 г/см³ [24, 25]. Проте параметри даного показника варіюють від 2,4 до 2,9 г/см³ залежно від типу ґрунту, його генезису та співвідношення мінеральних і органічних компонентів [45]. Недавні дослідження Szabó et al. [24] та Robinson et al. [25] підтвердили, що застосування ПТФ щільності твердої фази забезпечує вищу точність розрахунку загальної пористості порівняно з використанням фіксованого значення 2,65 г/см³.

Існує два основних типи ПТФ щільності твердої фази: регресійні моделі, що використовують як предиктори гумус та/або гранулометричний склад [37], та двокомпонентні змішувальні моделі, що визначають параметри показника на

основі масових часток органічної та мінеральної складових ґрунту [25, 37, 47]. Апробація різних типів ПТФ на локальних даних демонструють різні результати, так, наприклад, у дослідженнях Qin et al. [47] для ґрунтів із низьким вмістом органічної речовини найвищу точність продемонстрували регресійні моделі, в той час як Szabó et al. [24] та Robinson et al. [25] вказують на переваги змішаних ПТФ, особливо для ґрунтів із вмістом органічної речовини понад 1 %.

3.3. Схеми локальної валідації ПТФ

На рис. 1 та 2 подано схеми, що демонструють методологічний підхід до апробації відібраних ПТФ щільності будови та щільності твердої фази на локальних наборах даних.

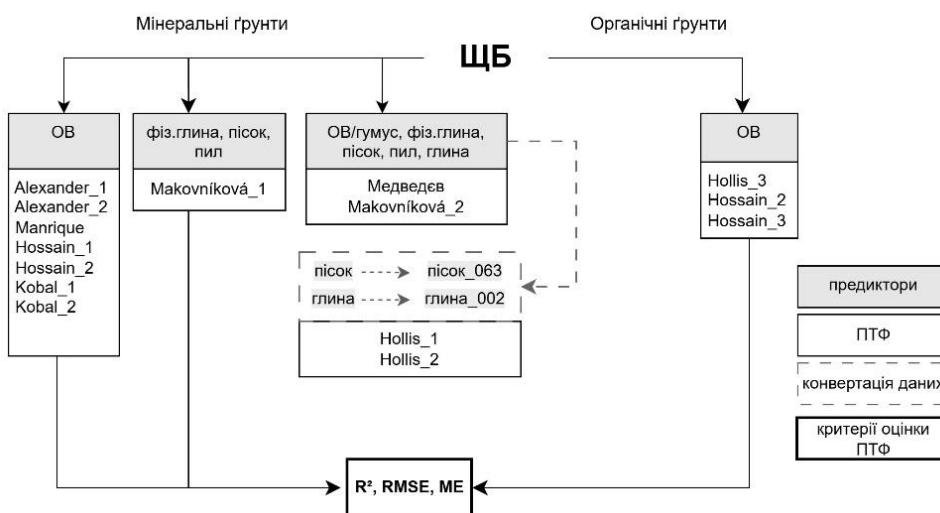


Рис. 1. Схема апробації ПТФ щільності будови (ЩБ) на локальних наборах даних залежно від наявності даних щодо вмісту органічного вуглецю, гумусу та/або фракцій гранулометричного складу (Скорочення ті самі, що у табл. 2; ОВ – вміст органічного вуглецю; гумус – вміст гумусу. Вміст гранулометричних фракцій за розміром: пісок – >0,05 мм; пісок_063 – >0,063 мм; пил – 0,05–0,001 мм; глина – <0,001 мм; глина_002 – <0,002 мм; фіз. глина – <0,01 мм)

Важливо підкреслити, апробація ПТФ, розроблених на основі даних з інших регіонів, вимагає попередньої гармонізації вхідних змінних, особливо щодо гранулометричного складу. Оскільки національні класифікації різних країн використовують різні діапазони розмірів часток для віднесення їх до груп піску, пилу чи глини [48], необхідно виконати трансформацію локальних даних до меж, які прийняті в оригінальних ПТФ. Зокрема, для визначення вмісту фракції глини із розміром часточок <0,002 мм доцільно застосовувати рівняння, запропоноване Лактіоною [49], яке дозволяє розрахувати цей показник на основі фракцій <0,005 мм та <0,001 мм, отриманих за допомогою національного стандартизованого методу. Для розрахунку фракції піску (>0,063 мм), необхідної для застосування моделей Hollis_1 та Hollis_2 (Табл.2, Рис.1), потрібно виконати два послідовні етапи: спочатку провести конверсію даних гранулометричного складу за методом Лактіоною [49] для обчислення трьох груп фракцій — піску (>0,05 мм), пилу (0,05-0,002 мм) та глини (<0,002 мм); після цього до отриманих даних застосувати функцію *TT.text.transf* з R-пакету *soiltexture* [50]. Цей інструмент використовує метод лог-лінійної трансформації для перерахунку вмісту часток піску та пилу з однієї системи класифікації в іншу.

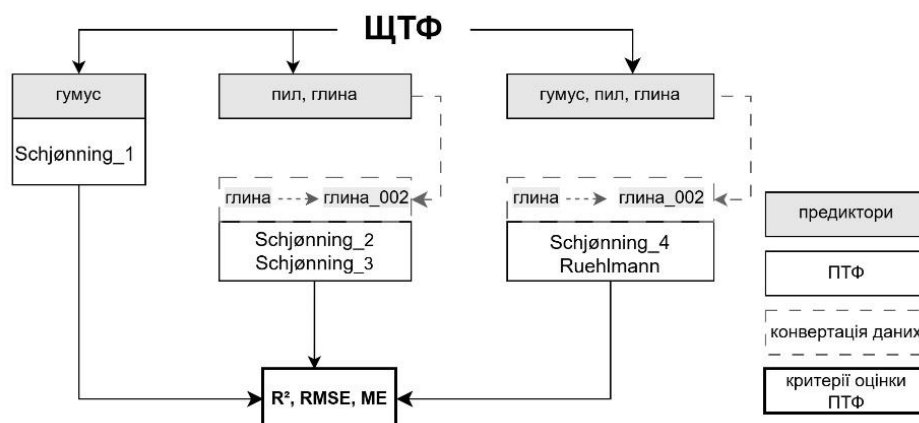


Рис. 2 Схема апробації ПТФ щільності твердої фази ґрунту (ЩТФ) на локальних наборах даних (Скорочення ті самі, що у табл. 2 і рис.1; Вміст гранулометричних фракцій: пил – 0,05–0,001 мм; глина – <0,001 мм; глина_002 – <0,002 мм)

Оцінювання точності ПТФ здійснюють з використанням статистичних показників, серед яких найбільш поширеними є: коренева середньоквадратична похибка (RMSE), середня похибка (ME), коефіцієнт детермінації (R^2).

Порівняння вимірних значень властивостей ґрунтів з прогнозованими дозволяє визначити найбільш ефективні ПТФ для конкретних ґрунтово-кліматичних умов та застосовувати їх за відсутності прямих вимірювань показника. Наприклад, Cherlinka et al. [23], тестуючи різні ПТФ, визначили оптимальне рівняння для прогнозування щільності будови ґрунтів Чернівецької області та застосували його для побудови цифрової тематичної карти регіону. Reidy et al. [31] шляхом валідації та калібрування опублікованих моделей розробили карту щільності будови для різних генетичних горизонтів ґрунтів Ірландії.

Варто зауважити, що процедури конвертації даних, а також застосування ПТФ до даних, отриманих іншими методами визначення властивостей ґрунтів, ніж тих, що використовувалися для їх створення, підвищує невизначеність та може знижувати точність прогнозу [12]. Розроблення ПТФ у межах єдиних протоколів визначення як предикторів, так і прогнозованих змінних є ключовою передумовою забезпечення їх максимальної точності та достовірності.

4. Обговорення. Напрями розвитку педотрансферного моделювання в Україні

На основі проведених узагальнень та спираючись на пропозиції Робочої групи з педотрансферних функцій і параметризації поверхні суші Міжнародного консорціуму моделювання ґрунтів (ISCM) окреслимо напрями розвитку педотрансферного моделювання в Україні.

4.1. Розвиток національних ґрунтових баз даних

Розроблення достовірних локально валідованих ПТФ потребує наявності достатньої кількості якісних, стандартизованих і доступних даних, що охоплюють фізичні та хімічні властивості ґрунтів, мінералогічний склад ґрунотвірних порід, характеристики рослинного покриву та інші допоміжні атрибути, які можуть слугувати предикторами [12]. Тому, однією із задач для розвитку даного напрямку досліджень є систематичне поповнення національних ґрунтових баз даних, а також створення тематичних відкритих наборів даних [51].

4.2. Розроблення локально-специфічних ПТФ

Більшість ПТФ розроблено для сільськогосподарських угідь і застосування таких моделей до ґрунтів інших типів землекористування, зокрема лісових екосистем, призводить до значних зміщень у прогнозах [12, 52]. Це зумовлено суттєвими відмінностями у їхніх властивостях: лісові ґрунти характеризуються високим умістом органічної речовини та інтенсивною біотичною активністю, що сприяє формуванню пухкої зернистої структури з розвиненою системою стабільних макропор та значно нижчими ніж на ріллі параметрами щільності будови [52–54]. Натомість орні ґрунти зазнають регулярного механічного обробітку, ущільнення технікою та агрохімічного впливу, що істотно змінює їхню фізичну будову порівняно з переважно непорушеними лісовими системами [12, 52]. Тому дослідники наголошують на необхідності розроблення локально-специфічних ПТФ з урахуванням конкретних типів землекористування.

Так само окремої уваги при моделюванні потребують органічні горизонти та торфовища. Органічні ґрунти мають значно вищий вміст органічної речовини порівняно із мінеральними. Їхня щільність, пористість та вологопровідні характеристики визначаються насамперед кількістю, типом органічного матеріалу та ступенем його розкладання, що обов'язково має бути враховано у педотрансферних функціях [12, 35, 55, 56].

4.3. Інноваційні методи отримання вхідних даних

Впровадження новітніх інструментів та інноваційних методів, які дозволяють оперативно та з високою роздільною здатністю отримувати вхідні дані для прогнозування важковимірюваних властивостей, є одним із перспективних напрямів розвитку ПТФ нового покоління [12]. Зокрема, спектроскопію у видимому та ближньому інфрачервоному (vis–NIR), а також середньому інфрачервоному (MIR) діапазонах дедалі частіше застосовують як швидку та економічно ефективну неруйнівну альтернативу методам «мокрої» хімії для високоточного прогнозування вмісту органічного вуглецю в ґрунті [57, 58] — одного з ключових предикторів фізичних та водно-фізичних властивостей. Водночас метод інтегрованого тиску суспензії (ISP/ISP+), реалізований у приладі PARIO, дослідники розглядають як надійну альтернативу традиційним лабораторним методам визначення гранулометричного складу [12, 59]. Даний метод демонструє високу узгодженість із результатами методів піпетки та ареометра [59, 60], оскільки визначення розподілу гранулометричних фракцій базується на тому ж фізичному принципі — законі Стокса. Крім того, на відміну від традиційних методів, які фіксують дані розподілу лише в певні моменти часу, цей метод виконує неперервну реєстрацію розподілу гранулометричних фракцій протягом усього часу вимірювання, що дає змогу отримати масив даних, сумісний із декількома системами класифікацій [12, 60].

4.4. Програмні інструменти для впровадження ПТФ

Ключовою вимогою до створення локально-специфічних ПТФ є забезпечення повної відтворюваності методів їх побудови. Процес їх розроблення має бути ретельно задокументованим, із обов'язковим зазначенням діапазонів вхідних даних, на яких навчалася модель, кореляційних матриць та статистичних параметрів якості [12, 41, 61]. Одним із ключових обмежень застосування ПТФ є їхня технічна складність, особливо моделей, побудованих із використанням методів машинного навчання [12]. У зв'язку з цим, важливим напрямом сучасних досліджень є створення програмних інструментів, що спрощують впровадження та

практичне застосування ПТФ. Наприклад, одна з найбільш цитованих ПТФ для прогнозування параметрів вологопровідності ґрунтів – Rosetta [62] – реалізована у вигляді онлайн-сервісу (<https://www.handbook60.org/rosetta/>), який дозволяє виконувати розрахунки безпосередньо в браузері. Окрім цього, створено спеціалізовані інструменти впровадження ПТФ, розроблених для ґрунтів Європейського континенту [24]. Dang et al. [63] розробили відкритий ArcGIS toolbox NB_PTFs, який інтегрує понад 150 ПТФ та дозволяє застосовувати їх до просторових даних. Також Mestanza et al. [64] створили відкритий інтерактивний додаток для розрахунку щільності будови ґрунту, до якого інтегровано 15 ПТФ, спеціально розроблених, апробованих і валідованих для ґрунтово-кліматичних умов Перу.

4.5. Гармонізація методів аналізування з міжнародними стандартами

Не менш важливим напрямом також є гармонізація методів аналізування властивостей із міжнародними стандартами. Зокрема, актуальною залишається проблема невідповідності меж гранулометричних фракцій у національній класифікації порівняно з міжнародними системами [49, 65]. В Україні та деяких країнах Східної Європи (Словаччина, Болгарія, Чеська Республіка) [66] в аналітичних процедурах вимірювання гранулометричного складу ґрунту найдрібнішою є фракція розміром $<0,001$ мм, тоді як у більшості системах класифікації країн ЄС та в міжнародних FAO/USDA, ISSS, WRB [49, 65] — часточки розміром $<0,002$ мм. Так само неузгодженість існує щодо верхньої межі піщаної фракції: в Україні це гранулометричні елементи розміром 1 мм, тоді як у більшості міжнародних класифікацій — 2 мм. Розбіжності у межах гранулометричних фракцій ускладнюють порівнюваність національних даних із міжнародними, а також обмежують застосовність ПТФ та інших підходів, що використовують показники гранулометричного складу для оцінювання стану ґрунтових ресурсів, зокрема визначення його секвестраційного потенціалу [67], розрахунку природного фонового рівня металів [68, 69] та моніторингу втрати органічної речовини [70, 71].

Описані неузгодженості національних даних із міжнародними класифікаціями гранулометричного складу можна відносно легко усунути. У статті Weber et al. [12] наведено досвід Угорщини як успішного й маловитратного прикладу подолання несумісності даних між різними системами класифікації ґрунтів. У 1990-х роках Угорщина перейшла від класифікації Міжнародного товариства ґрунтознавців (ISSS) до системи Служби сільськогосподарських досліджень США (USDA). Основна відмінність між ними полягала у визначенні верхньої межі фракції пилу – 0,02 мм у системі ISSS проти 0,05 мм у системі USDA, тоді як межі піщаної (2 мм) та глинистої ($<0,002$ мм) фракцій збігалися. Тому, щоб здійснити перехід на нову класифікацію, а разом з тим забезпечити сумісність із історичними даними – до стандартного протоколу визначення гранулометричного складу було додано одне додаткове вимірювання – вмісту часток розміром 0,05 мм. Подібний підхід доцільно застосувати і в Україні, доповнивши стандартний аналіз гранулометричного складу визначенням вмісту часточок розміром 2 та 0,002 мм. Така проста модифікація забезпечить двосторонню сумісність даних. З одного боку, результати залишатимуться придатними для використання в межах чинної національної системи класифікації гранулометричного складу, яка інтегрована у державні нормативи оцінювання якості ґрунтових ресурсів і застосовується під час бонітування та грошового оцінювання земель, агрохімічної паспортизації, агроекологічного моніторингу та ін.. З іншого боку, це забезпечить порівнянність українських результатів із міжнародними — дозволить трансформувати

національні дані відповідно до міжнародних класифікацій та інтегрувати їх до загальноєвропейських та глобальних ґрунтово-інформаційних продуктів.

5. Висновки

1. Локально-специфічні ПТФ фізичних властивостей для ґрунтово-кліматичних умов Європейського континенту розробляються переважно на основі національних ґрунтових баз даних. Методологія їх створення базується на стратифікації ґрунтових даних, застосуванні методів регресії та машинного навчання та обов'язкової валідації – як статистичної так і шляхом порівняння із ПТФ із інших регіонів.

2. Сформовано каталог ПТФ щільності будови та щільності твердої фази ґрунту, каліброваних і валідованих на європейських ґрунтових наборах, що прогнозують параметри показників на основі вмісту органічного вуглецю, гумусу та/або гранулометричного складу.

3. Розроблено схеми апробації ПТФ залежно від доступності вхідних даних. Застосування на локальних даних ПТФ, де предикторами є показники гранулометричного складу ґрунту, межі фракцій яких не відповідають прийнятій в Україні класифікації, вимагає проведення процедур конвертації даних, що підвищує рівень невизначеності та може знижувати точність прогнозів.

4. Пріоритетними напрямками розвитку педотрансферного моделювання в Україні є: розвиток національних ґрунтових баз даних; впровадження інноваційних методів отримання параметрів ґрунтів; розроблення доступних програмних інструментів для практичного застосування локальних ПТФ.

5. З метою усунення розбіжностей національної класифікації гранулометричного складу з міжнародними, запропоновано доповнити стандартний протокол його визначення двома додатковими вимірюваннями — часток розміром 2 та 0,002 мм. Це забезпечить сумісність даних гранулометричного складу із чинною національною системою класифікації, а також порівнянність із міжнародними класифікаціями (FAO/USDA) та інтеграцію до загальноєвропейських і глобальних ґрунтово-інформаційних продуктів.

Джерела фінансування: стаття містить результати досліджень, проведених за завданням 01.01.02.03.П «Розробити способи опрацювання ґрунтових даних для педотрансферного моделювання з метою інтеграції до європейської ґрунтово-інформаційної системи» (№ 0124U001098) ПНД НААН 01 «Ґрунтові ресурси України» та за науковим проектом «Комплексне наукове дослідження інноваційних рішень з відновлення ґрунтів та запобігання їхньої деградації з метою поліпшення екологічного стану регіонів України» на виконання угоди з Міністерством науки і освіти України (№ БФ/Ф01-2025).

Список використаних джерел

1. Pedotransfer functions in Earth system science: challenges and perspectives / K. Van Looy et al. *Reviews of geophysics*. 2017. Vol. 55, № 4. P. 1199–1256. <https://doi.org/10.1002/2017RG000581>
2. Gap assessment in current soil monitoring networks across Europe for measuring soil functions / J. P. van Leeuwen et al. *Environmental research letters*. 2017. Vol. 12. № 12. Article 124007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9c5c>
3. Minasny B., Hartemink A. E. Predicting soil properties in the tropics. *Earth-Science reviews*. 2011. Vol. 106. № 1–2. P. 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.005>
4. Filling the gaps in soil data: a multi-model framework for addressing data gaps using pedotransfer functions and machine-learning with uncertainty estimates to estimate bulk density / A. Arbor et al. *Catena*. 2024. Vol. 245. № 10. Article 108310. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108310>
5. Adjusting bulk density observations in the Hungarian soil information and monitoring system using pedotransfer functions / S. Sohrab et al. *European journal of soil science*. 2025. Vol. 76. № 6. Article e70245. <https://doi.org/10.1111/ejss.70245>

6. Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty / M. Román Dobarco et al. *Geoderma*. 2019. Vol. 336. № 2. P. 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022>
7. Amsili J. P., van Es H. M., Schindelbeck R. R. Pedotransfer functions for field capacity, permanent wilting point, and available water capacity based on random forest models for routine soil health analysis. *Communications in soil science and plant analysis*. 2024. Vol. 5. № 13. P. 1967–1984. <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2336573>
8. A minimum suite of soil health indicators for North American agriculture / D. K. Bagnall et al. *Soil security*. 2023. Vol. 10. Article 100084. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2023.100084>
9. Fujita Y., de Haan J., Ros G. H. Evaluation of pedotransfer functions for soil indicators of BLN. Nutriënten Management Instituut (NMI), 2023. URL: <https://edepot.wur.nl/642331>
10. European Union (2025). Directive of the European Parliament and of the Council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law). Brussels: European Commission. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32025L2360>
11. Bouma J. Future societal developments provide a challenge for pedology as an integrative activity within soil science. *Geoderma*. 2026. Vol. 466. № 1. Article 117699. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2026.117699>
12. Hydro-pedotransfer functions: a roadmap for future development / T. K. D. Weber et al. *Hydrology and earth system sciences*. 2024. Vol. 28. № 14. P. 3391–3433. <https://doi.org/10.5194/hess-28-3391-2024>
13. Kaur R., Kumar S., Gurung H. P. A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. *Soil research*. 2002. Vol. 40. № 5. P. 847–858. <https://doi.org/10.1071/sr01023>
14. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils / B. De Vos et al. *Soil science society of America journal*. 2005. Vol. 69. № 2. P. 500–510. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0500>
15. Vasiliniuc I., Patriche C. V. Validating soil bulk density pedotransfer functions using a Romanian dataset. *Carpathian journal of earth and environmental sciences*. 2015. Vol. 10. № 2. P. 225–236
16. Abdelbaki A. M. Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for U.S. soils. *Ain shams engineering journal*. 2018. Vol. 9. № 4. P. 1611–1619. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.12.002>
17. From pedotransfer functions to soil inference systems / A. B. McBratney et al. *Geoderma*. 2002. Vol. 109. № 1–2. P. 41–73. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(02\)00139-8](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(02)00139-8)
18. Laktionova T., Nakisko S. Particle size distribution as a basic characteristic for pedotransfer prediction of permanent wilting point. *Agricultural science and practice*. 2014. Vol. 1. № 1. P. 13–19. <https://doi.org/10.15407/agrisp1.01.013>
19. Лядська І., Маслікова К., Жуков О. Методичні підходи до оцінки вологості стійкого в'янення рослин дерново-літогенних ґрунтів на червоно-бурих глинах. *Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету*. 2016. Т. 3. С. 68–72. URL: <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/1926>
20. Pedotransfer functions for prediction of soil organic carbon content for Chernozems Haplic and Calcic: A Case Study from the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine / Y. M. Dmytruk et al. *AgroChemistry and soil science*. 2025. Vol. 98. P. 19–35. <https://doi.org/10.31073/acss98-02>
21. Медведєв В., Пліско І., Бігун О. Досвід педотрансферного моделювання у дослідженнях фізики ґрунтів. *Вісник аграрної науки*. 2015. Т. 93. № 1. С. 17–24. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2015_1_4
22. Осипов В. В., Бігун О. М. Оцінка педотрансферних функцій для визначення коефіцієнта фільтрації ґрунтів України. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія*. 2020. № 52. С. 68–78. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-05>
23. Methods of modeling and mapping of the soil bulk density: a case study from Chernivtsi region, Ukraine / V. Cherlinka et al. *Geographia cassoviensis*. 2022. Vol. 16. № 2. P. 147–163. <https://doi.org/10.33542/gc2022-2-05>
24. Addressing soil data needs and data gaps in catchment-scale environmental modelling: the European perspective / B. Szabó et al. *Soil*. 2024. Vol. 10. № 2. P. 587–617. <https://doi.org/10.5194/soil-10-587-2024>
25. Soil porosity prediction across Europe with a focus on soil particle density determination / D. A. Robinson et al. *International soil and water conservation research*. 2026. Vol. 24. № 1. Article 100614. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2026.100614>
26. Deriving regional pedotransfer functions to estimate soil bulk density in Austria / C. Foldal et al. *Die bodenkultur: journal of land management, food and environment*. 2020. Vol. 71. № 4. P. 241–252. <https://doi.org/10.2478/boku-2020-0020>
27. Predicting bulk density using pedotransfer functions for soils in the Upper Anthemountas basin, Greece / S. Sevastas et al. *Geoderma regional*. 2018. Vol. 14. № 4. Article e00169. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00169>
28. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils / E. Suuster et al. *Geoderma*. 2011. Vol. 163. № 1–2. P. 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.005>
29. Comparison of different models for predicting soil bulk density. Case study – Slovakian agricultural soils / J. Makovniková et al. *International agrophysics*. 2017. Vol. 31. № 4. P. 491–498. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0079>
30. A pedotransfer function to map soil bulk density from limited data / L. Rodríguez-Lado et al. *Procedia environmental sciences*. 2015. Vol. 27. № 1. P. 45–48. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.112>
31. Pedotransfer functions for Irish soils – estimation of bulk density (pb) per horizon type / B. Reidy et al. *Soil*. 2016. Vol. 2. № 1. P. 25–39. <https://doi.org/10.5194/soil-2-25-2016>
32. Bryk M., Kołodziej B. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density using image analysis of soil structure. *Sensors*. 2023. Vol. 23. № 4. Article 1852. <https://doi.org/10.3390/s23041852>
33. Pedotransfer functions for bulk density estimation of forest soils / M. Kobal et al. *Šumarski list*. 2011. Vol. 135. № 1–2. P. 19–27.
34. Building a pedotransfer function for soil bulk density on regional dataset and testing its validity over a larger area / S. Chen et al. *Geoderma*. 2018. Vol. 312. № 1. P. 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.009>
35. Hollis J. M., Hannam J., Bellamy P. H. Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. *European journal of soil science*. 2012. Vol. 63. № 1. P. 96–109. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01412.x>

36. Kätterer T., Andrén O., Jansson P.-E. Pedotransfer functions for estimating plant available water and bulk density in Swedish agricultural soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*. 2006. Vol. 56. № 4. P. 263–276. <https://doi.org/10.1080/09064710500310170>
37. Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents / P. Schjønning et al. *Geoderma*. 2017. Vol. 286. № 3. P. 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.020>
38. National variability in soil organic carbon stock predictions: impact of bulk density pedotransfer functions / M. Thi-Tuyet Do et al. *International soil and water conservation research*. 2024. Vol. 12. № 4. P. 868–884. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2024.04.002>
39. A framework for recalibrating pedotransfer functions using nonlinear least squares and estimating uncertainty using quantile regression / A. Arbor et al. *Geoderma*. 2023. Vol. 439. № 1. Article 116674. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116674>
40. Direct measurement and prediction of bulk density on alluvial soils of central Chile / M. Casanova et al. *Chilean journal of agricultural research*. 2016. Vol. 76. № 1. P. 105–113. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392016000100015>
41. McBratney A. B., Minasny B., Tranter G. Necessary meta-data for pedotransfer functions. *Geoderma*. 2011. Vol. 160. № 3–4. P. 627–629. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.023>
42. Manrique L. A., Jones C. A. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil science society of America journal*. 1991. Vol. 55. № 2. P. 476–481. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500020030x>
43. Alexander E. B. Bulk densities of California soils in relation to other soil properties. *Soil science society of America journal*. 1980. Vol. 44. № 4. P. 689–692. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400040005x>
44. Hossain M. F., Chen W., Zhang Y. Bulk density of mineral and organic soils in the Canada's arctic and sub-arctic. *Information processing in agriculture*. 2015. Vol. 2. № 3–4. P. 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.09.001>
45. Ruehlmann J., Körschens M. Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 2. Predicting the effect of the mineral composition of particle-size fractions. *Geoderma*. 2020. Vol. 375. Article 114543. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114543>
46. Data correlation structure controls pedotransfer function performance / M. David Fuentes-Guevara et al. *Journal of hydrology*. 2022. Vol. 614. Article 128540. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128540>
47. Evaluation of pedotransfer functions for predicting particle density of soils with low organic matter contents / L. Qin et al. *Geoderma*. 2022. Vol. 416. Article 115812. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115812>
48. Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases / A. Nemes et al. *Geoderma*. 1999. Vol. 90. № 3–4. P. 187–202. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(99)00014-2)
49. Лактіонова Т. М. Про можливість застосування в Україні класифікації гранулометричного складу ґрунтів USDA/FAO. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. тем. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків, 2011. Вип. 74. С. 28–35.
50. Moeys J. Soiltexture: functions for soil texture plot, classification and transformation. *The Comprehensive R Archive Network*. 2024. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/soiltexture/index.html>
51. Бігун О. М. Збереження ґрунтових даних в Україні: досягнення та перспективи. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. тем. наук. зб. / ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". Харків, 2025. Вип. 98. С. 4–18. <https://doi.org/10.31073/acss98-01>
52. Soil bulk density assessment in Europe / P. Panagos et al. *Agriculture, ecosystems & environment*. 2024. Vol. 364. Article 108907. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108907>
53. Development of pedo-transfer functions for the saturated hydraulic conductivity of forest soil in South Korea considering forest stand and site characteristics / H. Lim et al. *Water*. 2020. Vol. 12. № 8. Article 2217. <https://doi.org/10.3390/w12082217>
54. Zuo Y., He K. Evaluation and development of pedo-transfer functions for predicting soil saturated hydraulic conductivity in the Alpine frigid hilly region of Qinghai Province. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. № 8. Article 1581. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081581>
55. Bulk density prediction for histosols and soil horizons with high organic matter content / S. J. Beutler et al. *Revista brasileira de ciência do solo*. 2017. Vol. 41. Article e0160158. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160158>
56. Relationships between organic matter and bulk density in Amazonian peatland soils / B. Crnobrna et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. № 19. Article 12070. <https://doi.org/10.3390/su141912070>
57. Predicting soil properties using spectral subsets of LUCAS visible near-infrared spectroscopy data / F. Hateffard et al. *European journal of soil science*. 2025. Vol. 76. № 6. Article e70242. <https://doi.org/10.1111/ejss.70242>
58. Austrian NIR soil spectral library for soil health assessments / J. Fohrafellner et al. *Earth system science data*. 2026. Vol. 18. № 1. P. 219–229. <https://doi.org/10.5194/essd-18-219-2026>
59. Poláčková S., Kovář M., Jačka L. The improved integral suspension pressure method for particle size analysis agrees well with the standard hydrometer method. *Soil and tillage research*. 2026. Vol. 258. Article 107021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.107021>
60. Durner W., Iden S. C. The improved integral suspension pressure method (ISP+) for precise particle size analysis of soil and sedimentary materials. *Soil and tillage research*. 2021. Vol. 213. Article 105086. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105086>
61. Бігун О., Пліско І., Романчук К. Способи опрацювання ґрунтових даних для педотрансферного моделювання з метою інтеграції до європейської ґрунтово-інформаційної системи : метод. вказівки / ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського». Харків, 2025. 51 с. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18656131>
62. Schaap M. G., Leij F. J., van Genuchten M. T. Rosetta : a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of hydrology*. 2001. Vol. 251. № 3–4. P. 163–176. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(01)00466-8)
63. Guidelines and a supporting toolbox for parameterising key soil hydraulic properties in hydrological studies and broader integrated modelling / N. Dang et al. *One ecosystem*. 2022. Vol. 7. Article e76410. <https://doi.org/10.3897/oneeco.7.e76410>

64. Pedotransfer functions for Peruvian soils: a web tool for dry bulk density estimation / C. Mestanza et al. *Geoderma regional*. 2026. Vol. 44. № 4. Article e01054. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2026.e01054>
65. Nikorych V. Bridging the gap between Kachinsky and FAO/USDA particle-size distribution systems: mathematical modeling and pedogenetic harmonization. *Науковий вісник Чернівецького університету. Біологія (Біологічні системи)*. 2025. Т. 17. № 3. С. 436–442. <https://doi.org/10.31861/biosystems2025.03.436>
66. Laser diffraction as an innovative alternative to standard pipette method for determination of soil texture classes in central europe / D. Igaz et al. *Water*. 2020. Vol. 12. № 5. Article 1232. <https://doi.org/10.3390/w12051232>
67. Гамкало З. Г., Шпаківська І. М., Марискевич О. Г. Літогенний потенціал карбонізації педосфери: теоретико-методологічні, методичні та екосистемний підходи. *Агрохімія і ґрунтознавство*, 2021. Вип. 92. С. 41–51. <https://doi.org/10.31073/acss92-05>
68. Baseline concentration levels of trace elements as a function of clay and organic carbon contents in soils in Flanders (Belgium) / F. M. G. Tack et al. *Science of the total environment*. 1997. Vol. 201. № 2. P. 113–123. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(97\)00096-x](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(97)00096-x)
69. Heavy metal content of arable soils in northern Belgium / L. De Temmerman et al. *Water, air, and soil pollution*. 2003. Vol. 148. № 1. P. 61–76. <https://doi.org/10.1023/A:1025498629671>
70. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? / A. Johannes et al. *Geoderma*. 2017. Vol. 302. P. 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
71. Relevance of the organic carbon to clay ratio as a national soil health indicator / E. Rabot et al. *Geoderma*. 2024. Vol. 443. Article 116829. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116829>

UDC 631.43:519.24

Pedotransfer functions of soil physical properties: methodological approaches to development, model catalogue, and local validation schemes

O. M. Bihun

National Scientific Center “Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky”,
Kharkiv, Ukraine

✉ oksana_bigun@ukr.netORCID: [0000-0002-8461-4928](https://orcid.org/0000-0002-8461-4928)

Received 11.03.2026; Revised 02.06.07.2026; Accepted 08.06.2026; Available online 30.06.2026

Abstract

Pedotransfer function development is widely used as an alternative approach for estimating soil properties whose direct measurement is technically demanding, time-consuming, and costly. Soil physical properties such as bulk density, particle density, and total porosity are frequently estimated using pedotransfer functions (PTFs) and are subsequently applied in soil quality assessment, detection of soil degradation processes, and parameterization of process-based models. The development of reliable PTFs requires adherence to well-defined methodological principles, whereas the transfer of models developed in other regions to local datasets requires prior harmonization of input variables and independent validation, since differences in predictor determination methods and particle-size class boundaries may significantly affect prediction accuracy. The aim of this study was to synthesize methodological approaches to the development of PTFs for soil physical properties and to compile a catalogue of candidate models together with validation schemes for their application to local soil datasets. A theoretical and analytical approach was used to review and generalize methodological practices and to identify relevant pedotransfer functions. The analysis shows that locally specific PTFs are typically developed using data stratification procedures combined with statistical regression and machine-learning techniques. Model performance is assessed through different validation strategies, including statistical validation and comparison with PTFs developed for other regions. A catalogue containing 14 PTFs for bulk density and 5 PTFs for particle density was compiled. These models employ soil organic carbon, soil organic matter, and/or particle-size distribution as predictors. Validation schemes are proposed depending on the availability of input data and the need to convert variables due to inconsistencies between national and international particle-size classification systems. Priority directions for the advancement of PTF development in Ukraine include the systematic expansion of national soil databases, the development of open thematic soil datasets, the creation of PTFs for specific ecosystems, the adoption of innovative approaches for acquiring predictor variables (e.g. spectroscopic methods and ISP+), and the development of accessible software tools for practical model implementation. To improve the compatibility of the national particle-size classification system with widely used international standards (FAO/USDA), it is proposed to complement the standard analytical protocol with additional measurements of particle fractions with diameters of 2 mm and 0.002 mm. Such an approach would ensure that analytical results remain compatible with existing national soil quality assessment frameworks while also enabling their integration into European and global soil information systems.

Keywords: *pedotransfer functions (PTF), soil bulk density, soil particle density, PTF catalogue, local PTF validation schemes*

Cite: Bigun, O. M. (2026). Pedotransfer functions of soil physical properties: methodological approaches to development, model catalogue, and local validation schemes. *AgroChemistry and Soil Science*, 100, 21–37. <https://doi.org/10.31073/acss100-02> [in Ukrainian].

This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

References

1. 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>
2. van Leeuwen, J. P., Saby, N. P., Jones, A., Louwagie, G., Micheli, E., Rutgers, M., ... & Creamer, R. E. (2017). Gap assessment in current soil monitoring networks across Europe for measuring soil functions. *Environmental Research Letters*, 12(12), 124007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9c5c>
3. Minasny, B., & Hartemink, A. E. (2011). Predicting soil properties in the tropics. *Earth-Science Reviews*, 106(1–2), 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.005>
4. Arbor, A., Schmidt, M., Zhang, J., Bulmer, C., Filatow, D., Kasraei, B., Smukler, S., & Heung, B. (2024). Filling the gaps in soil data: a multi-model framework for addressing data gaps using pedotransfer functions and machine-learning with uncertainty estimates to estimate bulk density. *Catena*, 245(10), 108310. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108310>
5. Sohrab, S., Szabó, B., Pásztor, L., Makó, A., & Szatmári, G. (2025). Adjusting Bulk Density Observations in the Hungarian Soil Information and Monitoring System Using Pedotransfer Functions. *European Journal of Soil Science*, 76(6), e70245. <https://doi.org/10.1111/ejss.70245>
6. Dobarco, M. R., Cousin, I., Le Bas, C., & Martin, M. P. (2019). Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma*, 336(2), 81–95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022>
7. Amsili, J. P., van Es, H. M., & Schindelbeck, R. R. (2024). Pedotransfer functions for field capacity, permanent wilting point, and available water capacity based on random forest models for routine soil health analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 55(13), 1967–1984. <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2336573>
8. Bagnall, D. K., Rieke, E. L., Morgan, C. L., Liptzin, D. L., Cappellazzi, S. B., & Honeycutt, C. W. (2023). A minimum suite of soil health indicators for North American agriculture. *Soil Security*, 10, 100084. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2023.100084>
9. Fujita, Y., de Haan, J., & Ros, G. H. (2023). *Evaluation of pedotransfer functions for soil indicators of BLN*. Nutriënten Management Instituut, NMI. Retrieved from <https://edepot.wur.nl/642331>
10. European Union (2025). *Directive of the European Parliament and of the Council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law)*. European Commission. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32025L2360>
11. Bouma, J. (2026). Future societal developments provide a challenge for pedology as an integrative activity within soil science. *Geoderma*, 466(1), 117699. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2026.117699>
12. Weber, T. K. D., Weihermüller, L., Nemes, A., Bechtold, M., Degré, A., Diamantopoulos, E., ... Bonetti, S. (2024). Hydro-pedotransfer functions: a roadmap for future development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(14), 3391–3433. <https://doi.org/10.5194/hess-28-3391-2024>
13. Kaur, R., Kumar, S., & Gurung, H. P. (2002). A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. *Australian Journal of Soil Research*, 40(5), 847–858. <https://doi.org/10.1071/SR01023>
14. De Vos, B., Van Meirvenne, M., Quataert, P., Deckers, J., & Muys, B. (2005). Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69(2), 500–510. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0500>
15. Vasiliniuc, I., & Patriche, C. V. (2015). Validating soil bulk density pedotransfer functions using a Romanian dataset. *Carpath J Earth Environ Sci*, 10(2), 225–236. Retrieved from <https://www.cjees.ro/viewTopic.php?topicId=537>
16. Abdelbaki, A. M. (2018). Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for U.S. soils. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1611–1619. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.12.002>
17. McBratney, A. B., Minasny, B., Cattle, S. R., & Vervoort, R. W. (2002). From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109(1–2), 41–73. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00139-8)
18. Laktionova, T., & Nakisko, S. (2014). Particle size distribution as a basic characteristic for pedotransfer prediction of permanent wilting point. *Agricultural Science and Practice*, 1(1), 13–19. <https://doi.org/10.15407/agrisp1.01.013>
19. Liadska, I., Maslikova K., & Zhukov O. (2016). Methodological approaches to assessing the permanent wilting point in sod-lithogenic soils on red-brown clays. *Bulletin of the Dnipro State Agrarian and Economic University*, 3, 68–72. Retrieved from <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/1926> [in Ukrainian].
20. Dmytruk, Y. M., Palamarchuk, R. P., Zhukova, Y. F., & Stepanenko, N. V. (2025). Pedotransfer functions for prediction of soil organic carbon content for Chernozems Haplic and Calcic: A Case Study from the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *AgroChemistry and Soil Science*, 98, 19–35. <https://doi.org/10.31073/acss98-02>
21. Medvedev, V. V., Plisko, I. V. & Bihun, O. M. (2015). Experience of pedotransfer simulation in probes of soil physics. *Bulletin of Agricultural Science*, 93(1), 17–24. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2015_1_4 [in Ukrainian].
22. Osyrov, V. V. & Bihun, O. M. (2020). Evaluation of pedotransfer functions to predict saturated hydraulic conductivity of Ukrainian soils. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, 52, 68–78. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-52-05> [in Ukrainian].
23. Cherlinka, V., Dmytruk, Y., Cherlinka, L., Gunchak, M., & Sobko, V. (2022). Methods of modeling and mapping of the soil bulk density: a case study from Chernivtsi region, Ukraine. *Geographia Cassoviensis*, 16(2), 147–163. <https://doi.org/10.33542/gc2022-2-05>
24. Szabó, B., Kassai, P., Plunge, S., Nemes, A., Braun, P., Strauch, M., ... & Čerkasova, N. (2024). Addressing soil data needs and data gaps in catchment-scale environmental modelling: the European perspective. *Soil*, 10(2), 587–617. <https://doi.org/10.5194/soil-10-587-2024>
25. Robinson, D. A., Fendrich, A., Thomas, A., Reinsch, S., Leifeld, J., Moore, T., ... & Panagos, P. (2026). Soil porosity prediction across Europe with a focus on soil particle density determination. *International Soil and Water Conservation Research*, 24(1), 100614. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2026.100614>
26. Foldal, C., Jandl, R., Bohner, A., & Berger, A. (2021). Deriving regional pedotransfer functions to estimate soil bulk density in Austria. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 71(4), 241–252. <https://doi.org/10.2478/boku-2020-0020>

27. Sevastas, S., Gasparatos, D., Botsis, D., Siarkos, I., Diamantaras, K. I., & Bilas, G. (2018). Predicting bulk density using pedotransfer functions for soils in the Upper Anthemountas basin, Greece. *Geoderma Regional*, 14(4), e00169. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00169>
28. Suuster, E., Ritz, C., Roostalu, H., Reintam, E., Kõlli, R., & Astover, A. (2011). Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils. *Geoderma*, 163(1–2), 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.005>
29. Makovníková, J., Širáň, M., Houšková, B., Pálka, B., & Jones, A. (2017). Comparison of different models for predicting soil bulk density. Case study–Slovakian agricultural soils. *International agrophysics*, 31(4), 491–498. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0079>
30. Rodríguez-Lado, L., Rial, M., Taboada, T., & Cortizas, A. M. (2015). A pedotransfer function to map soil bulk density from limited data. *Procedia Environmental Sciences*, 27(1), 45–48. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.112>
31. Reidy, B., Simo, I., Sills, P., & Creamer, R. E. (2016). Pedotransfer functions for Irish soils – estimation of bulk density (ρ_b) per horizon type. *Soil*, 2(1), 25–39. <https://doi.org/10.5194/soil-2-25-2016>
32. Bryk, M., & Kołodziej, B. (2023). Pedotransfer functions for estimating soil bulk density using image analysis of soil structure. *Sensors*, 23(4), 1852. <https://doi.org/10.3390/s23041852>
33. Kopal, M., Urbančič, M., Potočić, N., De Vos, B., & Simončič, P. (2011). Pedotransfer functions for bulk density estimation of forest soils. *Šumarski list*, 135(1–2), 19–27.
34. Chen, S., Richer-de-Forges, A. C., Saby, N. P., Martin, M. P., Walter, C., & Arrouays, D. (2018). Building a pedotransfer function for soil bulk density on regional dataset and testing its validity over a larger area. *Geoderma*, 312(1), 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.009>
35. Hollis, J. M., Hannam, J., & Bellamy, P. H. (2012). Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. *European Journal of Soil Science*, 63(1), 96–109. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01412.x>
36. Kätterer, T., Andrén, O., & Jansson, P.-E., (2006). Pedotransfer functions for estimating plant available water and bulk density in Swedish agricultural soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*. 2006. 56(4). P. 263–276. <https://doi.org/10.1080/09064710500310170>
37. Schjønning, P., McBride, R.A., Keller, T., & Obour, P.B. (2017). Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. *Geoderma*, 286(3), 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.020>
38. Do, M. T. T., Van, L. N., Le, X. H., Nguyen, G. V., Yeon, M., & Lee, G. (2024). National variability in soil organic carbon stock predictions: Impact of bulk density pedotransfer functions. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(4), 868–884. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2024.04.002>
39. Arbor, A., Schmidt, M., Saurette, D., Zhang, J., Bulmer, C., Filatow, D., ... Heung, B. (2023). A framework for recalibrating pedotransfer functions using nonlinear least squares and estimating uncertainty using quantile regression. *Geoderma*, 439(1), 116674. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116674>
40. Casanova, M., Tapia, E., Seguel, O., & Salazar, O. (2016). Direct measurement and prediction of bulk density on alluvial soils of central Chile. *Chilean journal of agricultural research*, 76(1), 105–113. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392016000100015>
41. McBratney, A. B., Minasny, B., & Tranter, G. (2011). Necessary meta-data for pedotransfer functions. *Geoderma*, 160(3–4), 627–629. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.023>
42. Manrique, L. A., & Jones, C. A. (1991). Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 55(2), 476–481. doi: 10.2136/sssaj1991.03615995005500020030x
43. Alexander, E. B. (1980). Bulk densities of California soils in relation to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 44(4), 689–692. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400040005x>
44. Hossain, M. F., Chen, W., & Zhang, Y. (2015). Bulk density of mineral and organic soils in the Canada's arctic and sub-arctic. *Information Processing in Agriculture*, 2(3–4), 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.09.001>
45. Ruehlmann, J., & Körschens, M. (2020). Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 2. Predicting the effect of the mineral composition of particle-size fractions. *Geoderma*, 375, 114543. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114543>
46. Fuentes-Guevara, M. D., Armindo, R. A., Timm, L. C., & Nemes, A. (2022). Data correlation structure controls pedotransfer function performance. *Journal of Hydrology*, 614, 128540. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128540>
47. Qin, L., Lin, L., Ding, S., Yi, C., Chen, J., & Tian, Z. (2022). Evaluation of pedotransfer functions for predicting particle density of soils with low organic matter contents. *Geoderma*, 416, 115812. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115812>
48. Nemes, A., Wösten, J. H. M., Lilly, A., & Oude Voshaar, J. H. (1999). Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. *Geoderma*, 90(3–4), 187–202. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00014-2)
49. Laktionova, T. M. (2011). About an opportunity for use in Ukraine of USDA/FAO soil textural classification. *AgroChemistry and Soil Science*, 74, 28–36. [in Ukrainian].
50. Moeys, J. (2024). Soiltexture: functions for soil texture plot, classification and transformation. *The Comprehensive R Archive Network*. Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/soiltexture/index.html>
51. Bihun, O. M. (2025). Soil data rescue in Ukraine: achievements and future opportunities. *AgroChemistry and Soil Science*, 98, 4–18. <https://doi.org/10.31073/acss98-01>. [in Ukrainian]
52. Panagos, P., De Rosa, D., Liakos, L., Labouyrie, M., Borrelli, P., & Ballabio, C. (2024). Soil bulk density assessment in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 364, 108907. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108907>
53. Lim, H., Yang, H., Chun, K. W., & Choi, H. T. (2020). Development of pedo-transfer functions for the saturated hydraulic conductivity of forest soil in South Korea considering forest stand and site characteristics. *Water*, 12(8), 2217. <https://doi.org/10.3390/w12082217>
54. Zuo, Y., & He, K. (2021). Evaluation and development of pedo-transfer functions for predicting soil saturated hydraulic conductivity in the Alpine Frigid Hilly region of Qinghai Province. *Agronomy*, 11(8), 1581. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081581>

55. Beutler, S. J., Pereira, M. G., Tassinari, W. D. S., Menezes, M. D. D., Valladares, G. S., & Anjos, L. H. C. D. (2017). Bulk density prediction for Histosols and soil horizons with high organic matter content. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41(0), e0160158. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160158>
56. Crnobrna, B., Llanqui, I. B., Cardenas, A. D., & Panduro Pisco, G. (2022). Relationships between organic matter and bulk density in Amazonian peatland soils. *Sustainability*, 14(19), 12070. <https://doi.org/10.3390/su141912070>
57. Hateffard, F., Gumbricht, T., Ranhem, T., Breure, T., Panagos, P., & Hugelius, G. (2025). Predicting Soil Properties Using Spectral Subsets of LUCAS Visible Near- Infrared Spectroscopy Data. *European Journal of Soil Science*, 76(6), e70242. <https://doi.org/10.1111/ejss.70242>
58. Fohrafellner, J., Lippl, M., Bajraktarevic, A., Baumgarten, A., Spiegel, H., Körner, R., & Sandén, T. (2026). Austrian NIR soil spectral library for soil health assessments. *Earth System Science Data*, 18(1), 219–229. <https://doi.org/10.5194/essd-18-219-2026>
59. Poláčková, S., Kovář, M., & Jačka, L. (2026). The improved integral suspension pressure method for particle size analysis agrees well with the standard hydrometer method. *Soil and Tillage Research*, 258, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.107021>
60. Durner, W., & Iden, S. C. (2021). The improved integral suspension pressure method (ISP+) for precise particle size analysis of soil and sedimentary materials. *Soil and Tillage Research*, 213, 105086. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105086>
61. Bihun, O., Plisko, I. & Romanchuk, K. (2025). *Approaches to soil data processing for pedotransfer function development and integration into the European soil information system: guidelines*. Kharkiv: NSC ISSAR. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18656131> [in Ukrainian].
62. Schaap, M. G., Leij, F. J., & van Genuchten, M. T. (2001). Rosetta : a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of hydrology*, 251(3–4), 163–176. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)
63. Dang, N. A., Jackson, B. M., Tomscha, S. A., Lilburne, L., Burkhard, K., Tran, D. D., ... & Benavidez, R. (2022). Guidelines and a supporting toolbox for parameterising key soil hydraulic properties in hydrological studies and broader integrated modelling. *One Ecosystem*, 7, e76410. <https://doi.org/10.3897/oneeco.7.e76410>
64. Mestanza, C., Chicchon, M., Vásquez, J., ten Caten, A., & Beltrán, C. (2026). Pedotransfer functions for Peruvian soils: A web tool for dry bulk density estimation. *Geoderma Regional*, 44(4), e01054. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2026.e01054>
65. Nikorych, V. (2025). Bridging the gap between Kachinsky and FAO/USDA particle-size distribution systems: mathematical modeling and pedogenetic harmonization. *Scientific Herald of Chernivtsy University. Biology (Biological Systems)*, 17(3), 436–442. <https://doi.org/10.31861/biosystems2025.03.436>
66. Igaz, D., Aydin, E., Šinkovičová, M., Šimanský, V., Tall, A., & Horák, J. (2020). Laser diffraction as an innovative alternative to standard pipette method for determination of soil texture classes in central Europe. *Water*, 12(5), 1232. <https://doi.org/10.3390/w12051232>
67. Hamkalo, Z. G., Shpakivska, I. M. S., & Maryshevych, O. G. (2021). Lithogenic potential of pedosphere carbonization: theoretical-methodological, methodical and ecosystem approaches. *AgroChemistry and Soil Science*, 92, 41–51. <https://doi.org/10.31073/acss92-05> [in Ukrainian].
68. Tack, F. M. G., Verloo, M. G., Vanmechelen, L., & Van Ranst, E. (1997). Baseline concentration levels of trace elements as a function of clay and organic carbon contents in soils in Flanders (Belgium). *Science of the Total Environment*, 201(2), 113–123. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)00096-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)00096-X)
69. De Temmerman, L., Vanongeval, L., Boon, W., Hoenig, M., & Geypens, M. (2003). Heavy metal content of arable soils in northern Belgium. *Water, Air, and Soil Pollution*, 148(1), 61–76. <https://doi.org/10.1023/A:1025498629671>
70. Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P. C., Boivin, P. (2017). Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter?. *Geoderma*, 302, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
71. Rabot, E., Saby, N. P., Martin, M. P., Barré, P., Chenu, C., Cousin, I., ... Bispo, A. (2024). Relevance of the organic carbon to clay ratio as a national soil health indicator. *Geoderma*, 443, 116829. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116829>