Літогенний потенціал карбонізації педосфери: теоретико-методологічні, методичні та екосистемний підходи

З. Г. Гамкало*, І. М. Шпаківська, О. Г. Марискевич

Інститут екології Карпат НАНУ, Львів, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 07.06.2021 Отримано після доопрацювання 27.11.2021 Затверджено до видання 10.12.2021 Доступно онлайн 20.12.2021	В оглядовій статті автори інформують українського читача про останні здобутки світової науки з проблеми секвестрації і депонування органічного карбону ґрунту (ОКГ) за різного типу екосистем і землекористування. Проблема акумулювання і збереження органічних сполук карбону в педосфері є однією з топових у світовому дослідницькому просторі. З використанням пошукової системи «Академія Google» (<i>Google Scholar</i>), за повними текстами наукових публікацій (статей) з досліджуваної тематики за останні 5 років, на запит «carbon sequestration» отримано – 452 000 джерел, а «soil carbon sequestration» і «soil carbon sequestration potential», відповідно – 59 700 і 56 900 джерел, тоді, як на запит українською «секвестрація вуглецю» – 178 і «секвестрація вуглецю ґрунтом» – 85. В представленому огляді літератури розглянуто поетапний розвиток теоретико-методологічних і методичних основ розробки моделей стабілізації ОКГ, головно, мінеральною матрицею ґрунтів (<20 і <50 μm) з використанням рівнянь лінійної регресії найменших квадратів, аналізу граничних значень та інших методичних підходів. Також розглянуто існуючі підходи до оцінювання захисної ємності ґрунту щодо карбону (Carbon Protective Capacity), насиченості карбоном мінеральної матриці (Carbon Saturation, CS), дефіциту С-насичення ґрунту (Saturation Deficit), а також охарактеризовано функціональні особливості процесів С-секвестрації і С-депонування. Дано критичну оцінку існуючим способам визначення потенціалу стабілізації ОКГ та реальності успішної реалізації Міжнародної ініціативи "4 на 1000: ґрунти для продовольчої безпеки і клімату", прийнятої у грудні 2015 року. Враховуючи світовий досвід, розглянуто необхідність переходу в Україні на тричленну класифікацію гранулометричного складу ґрунту.
Ключові слова: гранулометричний склад; дефіцит С-насичення; органічний карбон ґрунту; потенціал С-насичення; С-захисна здатність; С-депонування; С-секвестрація;	

* E-mail: zenon.hamkalo@ukr.net

Форма цитування Гамкало З.Г., Шпаківська І.М., Марискевич О.Г. Літогенний потенціал карбонізації педосфери: теоретико-методологічні, методичні та екосистемний підходи. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ "ІГ А ім. О.Н. Соколовського". С. 41-51. <https://doi.org/10.31073/acss92-05>

Список використаних джерел

1. Sanderman J., Hengl T., Fiske G.J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *PNAS*. 2017. Vol. 114 (36). P. 9575–9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>.
2. Amundson R., Biardeau L. Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *PNAS*. 2018. Vol. 115(46). P. 11652–11656. <https://doi.org/10.1073/pnas.1815901115>.
3. Управління органічним вуглецем ґрунту в контексті продовольчої безпеки й змін клімату / С.А. Балюк, В.В. Медведєв, А.В. Кучер [та ін.]. *Вісник аграрної науки*. 2017. 9. С. 11-18. <https://doi.org/10.31073/agroviznyk201709-02>
4. Цілі сталого розвитку Україна. Національна доповідь. URL: <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/cili-stalogo-rozvitku-ta-ukrayina> (дата звернення: 11.08.2021).
5. Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A report of the Science-Policy Interface. URL: <https://www.unccd.int/publications/scientific-conceptual-framework-land-degradation-neutrality-report-science-policy> (дата звернення: 11.08.2021).
6. The 4 per 1000 Initiative in a few words. URL: <https://www.4p1000.org/4-1000-initiative-few-words> (дата звернення: 11.08.2021).
7. Basile-Doelsch I., Balesdent J., Pellerin S. Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil. <https://doi.org/10.5194/bg-2020-49> Preprint. Discussion started: 19 February 2020.
8. Soil carbon 4 per mille / B. Minasny, B.P. Malone, A.B. McBratney [et al.]. *Geoderma*, Elsevier. 2017. 292. P. 59-86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.
9. Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils / R.J. Zomer, D.A. Bossio, R. Sommer [et al.]. *Sci Rep*. 2017. 7. 15554. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8>.
10. Когут Б.М., Семенов В.М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2020. Вып. 102. С. 103-124. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-103-124>
11. Körschens M. Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments // Vortrag zum 2. Symposium "Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12 Oktober 2018 im UFZ Leipzig". 2018. 12 p.
12. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.J., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia // *Glob. Change Biol*. 2014. Vol. 20(3). P. 938-947. <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>.
13. Гамкало З.Г., Шпаківська І.М., Марискевич О.Г. Оцінка потенціалу стабілізації сполук карбону в ґрунті: теоретико-методичні підходи // Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта–наука–виробництво. 36. тез доп. XXIV Міжн. наук.-практ. конф., (Харків, 29-30 квітня 2021 року). Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2021. С. 29-32.
14. Batjes N.H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*. 2016. Vol. 269. P. 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.034>.
15. FAO and ITPS. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – technical summary. *Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils*. Rome. 2015. ISBN 978-92-5-108960-6.
16. Ecosystem carbon stock loss after land use changing subtropical forests in China / S. Fan, F. Guan, X. Xu [et al.]. *Forests*. 2016. 7(7). P.142. <https://doi.org/10.3390/f7070142>.
17. Joseph A, Oluwakem A, Olanrewaju O. Climate change effect and adaptation measures on selected soil properties. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 2018. 9(10). P.154-163. <https://doi.org/10.5897/JSEM2018.0700>.
18. C Stocks in forest floor and mineral soil of two Mediterranean beech forests/ A. De Marco, A. Fioretto, M. Giordano [et al.]. *Forests*. 2016. 7(8). P.181. <https://doi.org/10.3390/f7080181>.
19. Soil and human security in the 21st century / R. Amundson, A.A. Berhe, J.W. Hopmans [et al.]. *Science*. 2015. Vol. 348, Issue 6235:1261071. <https://doi.org/10.1126/science.1261071>

20. Walter K, Don A, Tiemeyer B, Freibauer A. Determining soil bulk density for carbon stock calculations: a systematic method comparison. *Soil Sci Soc Am J*. 2016. Vol. 80. P. 579-591. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.11.0407>
21. Six J., Conant R.T., Paul E.A., Pustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant & Soil*. 2002. 241(2). P. 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.
22. Feller C., Beare M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*. 1997. 79. P. 69-116. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00039-6).
23. Leinweber P., Reuter G. The influence of different fertilization practices on concentrations of organic carbon and total nitrogen in particle-size fractions during 34 years of a soil formation experiment in loamy marl. *Biol. Fert. Soils*. 1992. 13. P.119-124.
24. Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil*. 1997. 191. P. 77-87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>.
25. Zhang X., Xin X., Zhu A., Zhang J., Yang W. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain. *Catena*. 2017.156. P.176-183. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.012>.
26. Initial microaggregate formation: Association of microorganisms to montmorillonite-goethite aggregates under wetting and drying cycles / L. Krause, D. Biesgen, A. Treder [et al.]. *Geoderma*. 2019. 351. P. 250-260. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.001>.
27. Redmile-Gordona M., Gregory A.S., Whit R.P., Watts C.W. Soil organic carbon, extracellular polymeric substances (EPS), and soil structural stability as affected by previous and current land-use. *Geoderma*. 2020. 363. P. 114-143. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114143>.
28. Matus F.J. Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta analysis. *Scientific Reports*. 2021. 11:6438 | <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84821-6>
29. Hassink J. Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization. *Soil Biol. Biochem*. 1994. 26. P.1221-1231.
30. Adams T.M. Macroorganic matter content of some Northern Ireland soils. *Record of Agricultural Research*. 1980. 28. P. 1-11.
31. Christensen B.T. Physical Fractionation of Soil and Organic Matter in Primary Particle Size and Density Separates. In: Stewart B.A. (eds. *Advances in Soil Science*, 1992. vol 20. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2930-8_1.
32. Hassink J., Whitmore A. A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1997b. 61. P. 131-139. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010020x>
33. Tate K.R., Theng B.K.G. Organic matter and its interactions with inorganic soil constituents. In: *Soil with a variable Charge*. Ed. G K G Theng. New Zealand Soc. Soil Sci., Lower Hutt. 1980. P. 225-249.
34. Wilding L.P., Smeck N.E., Drees L.R. Silica in soils: quartz, cristobalite, tridymite, and opal. In: *Minerals in Soil Environments*. Ed. R. C. Dinauer. 1977. P. 471-552. SSSA, Madison, WI.
35. Huang P.M. Role of soil minerals in transformations of natural organics and xenobiotics in soil. Eds. J.M. Bollag and G. Stotzky. In: *Soil Biochemistry*, 1990. Vol. 6. P. 29-115. Marcel Dekker Inc.j.still.2018.11.001
36. Robert M., Chenu C. Interactions between soil minerals and microorganisms. Eds. G. Stotzky and J.M. Bollag. In: *Soil Biochemistry*, 1992. Vol. 7. P.307-404. Marcel Dekker Inc., New York.
37. Травникова Л.С. Закономерности гумусоаккумуляции: новые данные и их интерпретация. *Почвоведение*, 2002. № 7. С. 832-843.
38. Caravaca F., Lax A., Albaladejo J. Aggregate stability and carbon characteristics of particle-size fractions in cultivated and forested soils of semiarid Spain *Soil & Tillage Research*. 2004. 78. P. 83-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.02.010>.
39. Carter M.R., Angers D.A., Gregorich E.G., Bolinder M.A. Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions. *Can. J. Soil Sci*. 2003. 83. P. 11-23. <https://doi.org/10.4141/S01-087>.
40. Elustondo J., Angers D.A., Laverdière M.R., N'Dayegamiye A. Étude comparative de l'agrégation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques de sept sols sous culture de maïs ou en prairie. *Can. J. Soil Sci*. 1990. 70. P. 395-402. <https://doi.org/10.4141/cjss90-039>.
41. Matus F., Christopher C., Maire C.. Effects of soil texture, carbon input rates, and litter quality on free organic matter and nitrogen mineralization in Chilean rain forest and agricultural soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*. 2008. 39:1-2. P. 187-201. <https://doi.org/10.1080/00103620701759137>.
42. Land use impacts on physical-based soil organic matter fractions on three hillside Ferrasols in Mexico / F. Matus, C. Hidalgo, C. Monreal [et al.]. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2011. 71. P. 283-292.
43. Feng W., Plante A., Six J. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry*. 2013. 112. P. 81-93. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9679-7>.
44. Feng W., Plante A.F., Aufdenkampe A.K., Six J. Soil organic matter stability in organo-mineral complexes as a function of increasing C loading. *Soil Biol. Biochem*. 2014. 69. P. 398-405. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.11.024>
45. Estimation of total organic carbon storage and its driving factors in soils of Bavaria (southeast Germany) / M. Wiesmeier, F. Barthold, P. Spörllein [et al.]. *Geoderma Reg*. 2014. 1. P. 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.09.001>.
46. Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept / S. Chen, D. Arrouays, D.A. Angers [et al.]. *Soil & Tillage Research* 2019. 188. P. 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.001>.
47. Angers D.A., Arrouays D., Saby N.P.A., Walter C. Estimating and mapping the carbon saturation deficit of French agricultural topsoils. *Soil Use Man*. 2011. 27. P. 448-452. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00366.x>.
48. Carbon saturation in the silt and clay particles in soils with contrasting mineralogy / F. Matus, E. Garrido, C. Hidalgo [et al.]. *Terra Latinoam. [online]*. 2016, vol. 34(3). P. 311-319.
49. Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T., Plante A.F., Six J. Soil carbon saturation: Evaluation and corroboration by long term incubations. *Soil Biology & Biochemistry*. 2008. 40. P. 1741-1750. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.02.014>.
50. Alvarez R., Berhongaray G. Soil organic carbon sequestration potential of Pampean soils: comparing methods and estimation for surface and deep layers. *Soil Research*. 2021. <https://doi.org/10.1071/SR20257> www.publish.csiro.au/journals/sr
51. The PRISMA Statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care Interventions: Explanation and elaboration / A. Liberati, D.G. Altman, J. Tetzlaff [et al.]. *PLOS Med*. 2009. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>.
52. Cai A., Feng W., Zhang W., Xu M. Climate, soil texture, and soil types affect the contributions of fine fraction-stabilized carbon to total soil organic carbon in different land uses across China. *J. Environ. Manag*. 2016. 172. P. 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.009>.
53. A conceptual model of carbon stabilisation based on patterns observed in different soils/ M. Kirschbaum, G. Moineau, C. Hedley [et al.]. *Soil Biology and Biochemistry*. 2020. 141. P. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107683>.
54. Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: A New Zealand case study / M.H. Beare, S.J. McNeil, D. Curtin [et al.]. *Biogeochemistry*. 2014. 120. P. 71-87. <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9982-1>.
55. Soil carbon sequestration potential of permanent pasture and continuous cropping soils in New Zealand / S.R. McNally, S. McNally, M.H. Beare [et al.]. *Glob. Change Biol*. 2017. 23. P. 4544-4555. <https://doi.org/10.1111/gcb.13720>.
56. Storage of soil carbon as particulate and mineral associated organic matter in irrigated woody perennial crops / A.J. Midwood, K.D. Hannam, T. Gebretsadikan [et al.]. *Geoderma*. December 2021, 403. Article 115185. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115185>.
57. Lavalley J.M., Soong J.L., Cotrufo M.F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Glob Change Biol*. 2020. 26. P. 261-273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.
58. Soil organic carbon. Stratification and spatial variation of different fractions in an Argiudoll under no tillage / M.P. Salazar, R. Villarreal, L.A. Lozano [et al.]. *Rev. Fac. Agron*. 2020. 119(2). P. 1-11. <https://doi.org/10.24215/16699513e053>.
59. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter / M.F. Cotrufo, M.G. Ranalli, M.L. Haddix [et al.]. *Nature Geoscience* (IF 13.566) Pub Date: 2019-11-18. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>
60. Effect of Land Use on Organic Carbon Storage Potential of Soils with Contrasting Native Organic Matter Content / S. Yeasmin, E. Jahan, Md.A. Molla [et al.]. *Hindawi International Journal of Agronomy*. 2020, Article ID 8042961, 9 pages <https://doi.org/10.1155/2020/8042961>

61. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review / M. Lützow, I. Kögel-Knabner, K. Ekschmitt [et al.]. *Eur. J. Soil Sci.* 2006. 57. P. 426-445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>
62. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales / M. Wiesmeier, L. Urbanski, E. Hobbey [et al.]. *Geoderma*. 2019. 333. P. 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>.
63. Saint-Laurent D., Berthelot J. S., Arsenault-Boucher L. Organic carbon sequestration in mineral soil layers of cold-temperate mixed forests. *J. Soil Sci. Environ. Manage.* 11(4). P. 142-152, October-December 2020. <https://doi.org/10.5897/JSSSEM2020.0845>.
64. Новітні інтегративні методи дослідження стабілізації органічного вуглецю за різного обробітку ґрунту / М.А. Попірій, О.П. Сябрук, Р.В. Акімова, М.В. Шевченко. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. Вип. 90. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". 2020. С. 13-28. <https://doi.org/10.31073/acss90-02>.
65. Chemical and Spectroscopic Investigation of Different Soil Fractions as Affected by Soil Management / F. De Mastro, C. Cocozza, G. Brunetti, A. Traversa. *Appl. Sci.* 2020. 10. 2571. <https://doi.org/10.3390/app10072571>.
66. Роль гранулометричного складу в параметризації ґрунтоутворення та його місце у класифікації ґрунтів / М.І. Полупан, В.Б. Соловей, В.А. Величко, В.Г. Ковальов. *Вісник аграрної науки*. 1999. №12. С. 17-22.
67. Лебедь В.В., Соловей В.Б. Кількісна діагностика ґрунтів різного ступеню гідроморфності на однолесових терасах річок Лівобережного Лісостепу України. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. Вип. 88. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". 2019. С. 22-30. <https://doi.org/10.31073/acss88-03>.
68. Шейн Е.В., Архангельская Т.А. Педотрансферные функции: состояние, проблемы, перспективы. *Почвоведение*. 2006. № 10. С. 1205–1217.
69. Медведєв В.В., Пліско І.В., Бігун О.М. Досвід педотрансферного моделювання у дослідженнях фізики ґрунтів. *Вісник аграрної науки*. 2015. 1. С. 17–24. URL: https://agrovisnyk.com/pdf/ua_2015_01_02.pdf
70. Дыдышко С.В. Азаренко Т.Н., Шульгина С.В. Взаимосвязь гумуса и гранулометрического состава дерново-палево-подзолистых лесосуслистых почв разной степени агрогенной трансформации *Почвоведение и агрохимия*. 2018. 2(61). С. 20-31.
71. Соколов Д.А., Мерзляков О.Э., Доможакова Е.А. Оценка литогенного потенциала гумусонакопления в почвах отвалов каменноугольных месторождений Сибири. *Вестник Томского государственного университета*. 2015. № 399. С. 247–253. <https://doi.org/10.17223/15617793/399/40>.
72. Артемьева З.С. Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. Москва: ГЕОС, 2010. 240 с. ISBN: 9785891185111
73. Лактіонова Т.М. Про можливість застосування в Україні класифікації гранулометричного складу ґрунтів USDA/FAO. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2011. Вип. 74. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". С. 28-36.
74. Шейн Е.В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций. *Почвоведение*. 2009. № 3. С. 309–317.
75. От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (Обзор) / А.В. Юдина, Д.С. Фомин, А.Д. Котельникова, Е.Ю. Милановский. *Почвоведение*, 2018. № 11. С. 1340–1362. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18110096>.

UDC 631.417.2

Lithogenic potential of pedosphere carbonization: theoretical-methodological, methodical and ecosystem approaches

Z.G. Hamkalo*, I.M. Shpakivska, O.G. Maryshevych

Institute of Ecology of the Carpathians, NASU, Lviv, Ukraine

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received 07.06.2021 Received in revised form 27.11.2021 Accepted 10.12.2021 Available online 20.12.2021</p> <p>Keywords:</p> <p>soil organic carbon; particle size distribution; C-protective capacity; C-saturation potential; C-saturation deficiency; C-sequestration; C-deposition</p>	<p>The problem of accumulation and preservation of organic matter (OM) in the pedosphere is one of the main in the world research space. Using the search engine "Google Academy" (Google Scholar) of full texts of scientific publications (articles) on this topic over the past 5 years, showed that the query "carbon sequestration" received – 452,000 sources, and "soil carbon" sequestration " and "soil carbon sequestration potential" – 59,700 and 56,900 sources, respectively, while on request in Ukrainian "carbon sequestration" – 178 and "soil carbon sequestration" – 85. Under these conditions, it is important to inform the Ukrainian reader about the latest achievements of world science on the problem of C-sequestration and C-deposition of various types ecosystems and land use. The presented literature review considers the gradual development of theoretical, methodological and methodical bases for the development of organic matter stabilization models, mainly by a matrix of mineral soils (<20 and <50 μm) using linear least squares regression equations, analysis of limit values and other methodical approaches. Approaches to the assessment of soil carbon capacity (Carbon Protective Capacity), carbon saturation by the mineral matrix (Carbon Saturation, CS), C-saturation of the soil (Saturation Deficit), as well as the functional features of C-sequestration and C-deposition are considered. The existing methods for assessing the stabilization potential of the OM and the reality of the successful implementation of the International Initiative "4 in 1000: Soils for Food Security and Climate", adopted in December 2015, have been critically evaluated. Taking into account the world experience, the need to move to a three-member classification of soil particle size distribution in Ukraine is considered.</p>

* E-mail: zenon.hamkalo@gmail.com

Citing: Hamkalo, Z. G., Shpakivska, I. M., Maryshevych, O. G. (2021). Lithogenic potential of pedosphere carbonization: theoretical-methodological, methodical and ecosystem approaches. *AgroChemistry and Soil Science*. 92, 41-51. [doi:10.31073/acss92-05](https://doi.org/10.31073/acss92-05) [in Ukrainian].

References

1. Sanderman, J., Hengl, T., & Fiske, G.J. (2017). Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *PNAS*, 114(36), 9575–9580. doi: 10.1073/pnas.1706103114.
2. Amundson, R., & Biardeau, L. (2018). Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *PNAS*, 115(46), 11652–11656. doi: 10.1073/pnas.1815901115.
3. Baliuk, S., Medvedev, V., Kucher, A., Solovey, V., Levin, A., & Kolmaz, Yu. (2017). Control over organic carbon of soil in a context of food safety and climate fluctuation. *Bulletin of Agricultural Science*, 95(9), 11-18. doi: 10.31073/agrovisnyk201709-02. [in Ukrainian].
4. Sustainable Development Goals: Ukraine. National report. URL: <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/cili-stalogo-rozvitku-ta-ukrayina> (last accessed: 11.08.2021) [in Ukrainian].

5. Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A report of the Science-Policy Interface. URL: <https://www.unccd.int/publications/scientific-conceptual-framework-land-degradation-neutrality-report-science-policy> (last accessed: 11.08.2021).
6. The 4 per 1000 Initiative in a few words. URL: <https://www.4p1000.org/4-1000-initiative-few-words> (last accessed: 11.08.2021).
7. Basile-Doelsch, I., Balesdent, J., & Pellerin, S. (2020, February 19). Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil. *Biogeosciences*, 1-25. Preprint. doi: 10.5194/bg-2020-49.
8. Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays D., Chamberset, A. ... Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59-86. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002.
9. Zomer, R. J., Bossio, D. A., Sommer, R., & Verchot, L. V. (2017). Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils. *Sci Rep.* 7, 15554. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15794-8>.
10. Kogut, B., M., & Semenov, V., M. (2020). Assessment of soil organic carbon saturation. Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute, 102, 103-124. doi: 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124. [in Russian].
11. Körschens, M. (2018). Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments. Vortrag zum 2. Symposium "Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft am 12 Oktober 2018 im UFZ Leipzig".
12. Kurganova, I. N., Lopes de Gerenyu, V. J., Six, J., & Kuzyakov, Y. (2014). Carbon cost of collective farming collaps in Russia. *Glob. Change Biol.* 20(3), 938-947. doi: 10.1111/gcb.12379.
13. Gamkalo, Z. G., Shpakivska, I. M., & Mariskevich, O. G. (2021). Estimation of stabilization potential of carbon compounds in soil: theoretical and methodological approaches. In Proceedings of the XXIV Int. scientific-practical Conf. "Ecology, environmental protection and balanced nature management: education – science – production" (April 29-30) (pp. 29-32). Kharkiv, Karazin Univ. [in Ukrainian].
14. Batjes, N.H. (2016). Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*, 269, 61–68. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.01.034.
15. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – technical summary*. Rome. 2015. ISBN 978-92-5-108960-6.
16. Fan, S., Guan, F., Xu, X., David, I., Forrester, D. I., Ma, W., & Tang, X. (2016). Ecosystem carbon stock loss after land use changing subtropical forests in China. *Forests*, 7(7), 142. doi: 10.3390/f7070142.
17. Joseph, A., Oluwakem, A., & Olanrewaju, O. (2018). Climate change effect and adaptation measures on selected soil properties. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 9(10), 154-163. doi: 10.5897/JSEEM2018.0700.
18. De Marco, A., Fioretto, A., Giordano, M., Innangi, M., Menta, C., Papa, S., & Virzo de Santo, A. (2016). C Stocks in forest floor and mineral soil of two Mediterranean beech forests. *Forests*, 7(8), 181. doi: 10.3390/f7080181.
19. Amundson, R., Berhe, A.A., Hopmans, J. W., Olson, C., Szein, A. I., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348, Issue 6235:1261071. doi: 10.1126/science.1261071.
20. Walter, K., Don, A., Tiemeyer, B., & Freibauer, A. (2016). Determining soil bulk density for carbon stock calculations: a systematic method comparison. *Soil Science Society American Journal*, 80, 579-591. doi: 10.2136/sssaj2015.11.0407.
21. Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. & Pustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant & Soil*, 241(2), 155-176. doi: 10.1023/A:1016125726789.
22. Feller, C., & Beare, M. H. (1997). Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79, 69-116. doi: 10.1016/S0016-7061(97)00039-6.
23. Leinweber, P., & Reuter, G. (1992). The influence of different fertilization practices on concentrations of organic carbon and total nitrogen in particle-size fractions during 34 years of a soil formation experiment in loamy marl. *Biology & Fertility of Soils*, 13, 119-124.
24. Hassink, J. (1997). The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant & Soil*, 191, 77-87. doi: 10.1023/A:1004213929699.
25. Zhang, X., Xin, X., Zhu, A., Zhang, J., & Yang, W. (2017). Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain. *Catena*, 156, 176-183. doi: 10.1016/j.catena.2017.04.012.
26. Krause, L., Biesgen, D., Treder, A., Schweizer, S.A., Klumpp, E., Knief, C., & Siebers, N. (2019). Initial microaggregate formation: Association of microorganisms to montmorillonite-goethite aggregates under wetting and drying cycles. *Geoderma*, 351, 250-260. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.05.001.
27. Redmile-Gordona, M., Gregory, A.S., Whit, R.P., & Watts, C.W. (2020). Soil organic carbon, extracellular polymeric substances (EPS), and soil structural stability as affected by previous and current land-use. *Geoderma*, 363, 114-143. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114143.
28. Matus, F. J. (2021). Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta-analysis. *Sci. Rep.*, 11, 6438. doi: 10.1038/s41598-021-84821-6.
29. Hassink, J. (1994). Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization. *Soil Biol. Biochem.*, 26, 1221-1231.
30. Adams, T. M. (1980). Macroorganic matter content of some Northern Ireland soils. *Record of Agricultural Research*, 28, 1-11.
31. Christensen, B. T. (1992). Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In Stewart, B.A. (Ed.), *Advances in Soil Science*, 20. Springer, New York, NY. doi: 10.1007/978-1-4612-2930-8_1.
32. Hassink, J., & Whitmore, A. (1997). A model of the physical protection of organic matter in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 131-139. doi: 10.2136/sssaj1997.03615995006100010020x.
33. Tate, K. R., & Theng, B. K. G. (1980). Organic matter and its interactions with inorganic soil constituents. In B. K. G. Theng (Ed.), *Soil with a variable Charge*, (pp. 225-249). New Zealand Soc. Soil Sci., Lower Hutt.
34. Wilding, L. P., Smek, N. E., & Drees, L. R. (1977). Silica in soils: quartz, cristobalite, tridymite, and opal. In R. C. Dinuer (Ed.), *Minerals in Soil Environments*, (pp. 471-552). SSSA, Madison, WI.
35. Huang, P. M. (1990). Role of soil minerals in transformations of natural organics and xenobiotics in soil. In J. M. Bollag & G. Stotzky (Eds.), *Soil Biochemistry*, 6. (pp. 29-115). Marcel Dekker Inc. still.2018.11.001
36. Robert, M. & Chenu, C. (1992). Interactions between soil minerals and microorganisms. Eds. In G. Stotzky & J. M. Bollag (Eds.), *Soil Biochemistry*, 7. (pp. 307-404). Marcel Dekker Inc., New York.
37. Travníkova, L. S. (2002). Regularities of humus accumulation: new data and their interpretation. *Pochvovedenie*, 7, 832-843.
38. Caravaca, F., Lax, A., & Albaladejo, J. (2004). Aggregate stability and carbon characteristics of particle-size fractions in cultivated and forested soils of semiarid Spain. *Soil & Tillage Research*, 78, 83-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.02.010>.
39. Carter, M. R., Angers, D. A., Gregorich, E. G., & Bolinder, M. A. (2003). Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions. *Can. J. Soil Sci.*, 83, 11-23. doi: 10.4141/S01-087.
40. Elustondo, J., Angers, D. A., Laverdière, M. R., & N'Dayegamiye, A. (1990). Étude comparative de l'agrégation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques de sept sols sous culture de maïs ou en prairie. *Can. J. Soil Sci.*, 70, 395-402. doi: 10.4141/cjss90-039.
41. Matus, F. J., Lusk, C. H., & Maire, C. R. (2008). Effects of soil texture, carbon input rates, and litter quality on free organic matter and nitrogen mineralization in Chilean rain forest and agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(1-2), 187-201. doi: 10.1080/00103620701759137.
42. Matus, F., Hidalgo, C., Monreal, C., Estrada, I., Fuentes, M., & Etchevers, J. (2011). Land use impacts on physical-based soil organic matter fractions on three hillside Ferrasols in Mexico. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71, 283-292.
43. Feng, W., Plante, A., & Six, J. (2013). Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry*, 112, 81-93. doi: 10.1007/s10533-011-9679-7.
44. Feng, W., Plante, A. F., Aufdenkampe, A. K. & Six, J. (2014). Soil organic matter stability in organo-mineral complexes as a function of increasing C loading. *Soil Biol. Biochem.*, 69, 398-405. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.11.024.

45. Wiesmeier, M., Barthold, F., Spörlein, P., Geuss, U., Hangen, E., Reischl, ..., Kögel-Knabner I. (2014). Estimation of total organic carbon storage and its driving factors in soils of Bavaria (southeast Germany). *Geoderma Reg.*, 1, 67-78. doi: 10.1016/j.geodrs.2014.09.001.
46. Chen, S., Arrouays, D., Angers, D. A., Martin, M. P., & Walter, C. (2019). Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept. *Soil & Tillage Research*, 188, 53-58. doi: 10.1016/j.still.2018.11.001.
47. Angers, D. A., Arrouays, D., Saby, N. P. A. & Walter, C. (2011). Estimating and mapping the carbon saturation deficit of French agricultural topsoils. *Soil Use Man.*, 27, 448-452. doi: 10.1111/j.1475-2743.2011.00366.x.
48. Matus, F., Garrido, E., Hidalgo, C., Paz, F., Etchevers, J., Merino, C., & Báez, A. (2016). Carbon saturation in the silt and clay particles in soils with contrasting mineralogy. *Terra Latinoam. [online]*. 34(3), 311-319. ISSN 2395-8030.
49. Stewart, C.E., Paustian, K., Conant, R.T., Plante, A.F., & Six, J. (2008). Soil carbon saturation: Evaluation and corroboration by long term incubations. *Soil Biology & Biochemistry*, 40, 1741-1750. doi: 10.1016/j.soilbio.2008.02.014.
50. Alvarez, R., & Berhongaray, G. (2021). Soil organic carbon sequestration potential of Pampean soils: comparing methods and estimation for surface and deep layers. *Soil Research*, doi: org/10.1071/SR20257.
51. Liberati, A., Altman, D.G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C. ... Moher, D. (2009). The PRISMA Statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care Interventions: Explanation and elaboration. *PLoS Med.* doi: 10.1371/journal.pmed.1000100.
52. Cai, A., Feng, W., Zhang, W. & Xu, M. (2016). Climate, soil texture, and soil types affect the contributions of fine fraction-stabilized carbon to total soil organic carbon in different land uses across China. *J. Environ. Manag.*, 172, 2-9. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.02.009.
53. Kirschbaum, M., Moinet, G., Hedley, C., Beare, M. & McNally, S. (2020). A conceptual model of carbon stabilisation based on patterns observed in different soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 141, 1-13. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107683.
54. Beare, M. H., McNeil, S. J., Curtin, D., Parfitt, R. L., Jones, H. S., Dodd, M., B., & Sharp, J. (2014). Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: A New Zealand case study. *Biogeochemistry*, 120, 71-87. doi: 10.1007/s10533-014-9982-1.
55. McNally, S. R., McNally, S., Beare, M. H., Curtin, D., Meenken, E. D., Keliher, F. M. ... Baldock, J. (2017). Soil carbon sequestration potential of permanent pasture and continuous cropping soils in New Zealand. *Glob. Change Biol.*, 23, 4544-4555. doi: 10.1111/gcb.13720.
56. Midwood, A. J., Hannam, K. D., Gebretsadikan, T., Emde, D., & Jones, M. D. (2021). Storage of soil carbon as particulate and mineral associated organic matter in irrigated woody perennial crops. *Geoderma*, 403, 115185. doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115185.
57. Lavallee, J. M., Soong, J. L., & Cotrufo, M. F. (2020). Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Glob. Change Biol.*, 2020; 26, 261-273. doi: 10.1111/gcb.14859.
58. Salazar, M. P., Villarreal, R., Lozano, L. A., Otero, M. F., Polich, N.G., Bellora, G. L., & Soracco, C. G. (2020). Soil organic carbon. Stratification and spatial variation of different fractions in an Argiudoll under no tillage. *Rev. Fac. Agron.*, 119(2), 1-11. doi: 10.24215/16699513e053.
59. Cotrufo, M. F., Ranalli, M. G., Haddix, M. L., Six, J., & Lugato, E. (2019). Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter *Nature Geoscience*, 12, 989-994. doi: 10.1038/s41561-019-0484-6.
60. Yeasmin, S., Jahan, E., Molla, Md. A., Islam, A. K. M. M., Anvar, Md. P., Rashid, Md. H., & Chungopast, S. (2020). Effect of Land Use on Organic Carbon Storage Potential of Soils with Contrasting Native Organic Matter Content. *Hindawi International Journal of Agronomy*, Article ID 8042961, 9 pages. doi: 10.1155/2020/8042961.
61. von Lütow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmit, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *Eur. J. Soil Sci.*, 57, 426-445. doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x.
62. Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lütow, M., Marin-Spiotta, E., ... Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils – a review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.07.026.
63. Saint-Laurent, D., Berthelot, J. S., & Arseneault-Boucher, L. (2020). Organic carbon sequestration in mineral soil layers of cold-temperate mixed forests. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 11(4), 142-152. doi: 10.5897/JSSEM2020.0845.
64. Popirny M.A., Siabruk O.P., Akimova R.V., & Shevchenko M.V. (2020). The newest integrative methods of research of soil organic carbon stabilization at different tillage. *Agrochemistry and Soil Science*, 90, 13-28. doi: 10.31073/acss90-02. [in Ukrainian].
65. De Mastro, F., Cocozza, C., Brunetti G., & Traversa, A. (2020). Chemical and Spectroscopic Investigation of Different Soil Fractions as Affected by Soil Management. *Appl. Sci.*, 10, 2571, doi: 10.3390/app10072571.
66. Polupan, M. I., Solovey, V. B., Velichko, V. A., & Kovalev, V. G. (1999). The role of granulometric composition in the parameterization of soil formation and its place in the classification of soils. *Bulletin of Agricultural Science*, 12, 17-22. [in Ukrainian].
67. Lebed, V. V., & Solovey, V. B. (2019). Quantitative diagnostics of soils varying hydromorphy degrees of one-loess terraces of rivers in the Forest-Steppe. *Agrochemistry and Soil Science*, 88, 22-30. doi: 10.31073/acss88-03. [in Ukrainian].
68. Shein E.V., Arkhangelskaya, T. A. (2006). Pedotransfer functions: state, problems, prospects. *Soil Science*, 10, 1205-1217. [in Russian].
69. Medvedev, V. V., Plisko, I. V., & Bigun, O. M. (2015). Experience of pedotransfer simulation in probes of soil physics. *Buletin of Agricultural Sci.*, 1, 17-24. URL: https://agrovisnyk.com/pdf/ua_2015_01_02.pdf. [in Ukrainian].
70. Dydyshko, S. V., Azarenok, T. N., & Shulgina, S. V. (2018). Interrelation of humus and granulometric composition of soddy-pale-podzolic light loamy soils of varying degrees of agrogenic transformation. *Soil science and agrochemistry*, 2(61), 20-31. [in Russian].
71. Sokolov, D. A., Merzlyakov, O. E., & Domozhakova, E. A. (2015). Assessment of the lithogenic potential of humus accumulation in the soils of dumps of Siberian coal deposits. *Bulletin of Tomsk State University*, 399, 247-253. doi: 10.17223/15617793/399/40. [in Russian].
72. Artemieva, Z. S. (2010). *Organic matter and granulometric system of the soil*. Moscow: GEOS. ISBN: 9785891185111.
73. 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].
74. Shein, E. V. (2009). Granulometric composition of soils: problems of research methods, interpretation of results and classifications. *Soil Science*, 3, 309-317. [in Russian].
75. Yudina, A. V., Fomin, D. S., Kotelnikova, A. D., & Milanovsky, E. Yu. (2018). From the concept of an elementary soil particle to granulometric and microaggregate analyzes (Review). *Soil Science*, 11, 1340-1362. doi: 10.1134/S0032180X18110096. [in Russian].

УДК 631.417.2

Литогенный потенциал карбонизации педосферы: теоретико-методологические, методические и экосистемный подходы

З. Г. Гамкало*, И. М. Шпакивская, О. Г. Марискевич

Институт экологии Карпат НАНУ, Львов, Украина
E-mail: zenon.hamkalo@ukr.net

Проблема аккумуляции и сохранения органических соединений карбона в педосфере (ОКП) является одной из топовых в мировом исследовательском пространстве. С использованием поисковой системы Google Scholar, по полным текстам научных публикаций (статей) по исследуемой тематике за последние 5 лет, на запрос «carbon sequestration» получено – 452 000 источников, а «soil carbon sequestration» и «soil carbon sequestration potential», соответственно – 59 700 и 56 900 источников, тогда как на запрос на украинском «секвестрація вуглецю» – 178 и «секвестрація вуглецю ґрунтом» – 85 источников. В обзорной статье авторы информируют читателя о последних достижениях мировой науки по проблеме

секвестрации и депонирования ОКП в различного типа экосистемах и землепользовании. В представленном обзоре литературы рассмотрены поэтапное развитие теоретико-методологических и методических основ разработки моделей стабилизации ОКП, в основном, минеральной матрицей почв (<20 и <50 мкм) с использованием уравнений линейной регрессии наименьших квадратов, анализа предельных значений и других методических подходов. Также рассмотрены существующие подходы к оценке защитной емкости относительно карбона (Carbon Protective Capacity), насыщенности карбоном минеральной матрицы (Carbon Saturation, CS), дефицита С-насыщенности почвы (Saturation Deficit), а также охарактеризованы функциональные особенности процессов С-секвестрации и С-депонирования. Дана критическая оценка существующим способам определения потенциала стабилизации ОКП и реальности успешной реализации Международной инициативы "4 на 1000: Почвы для продовольственной безопасности и климата", принятой в декабре 2015 года. Учитывая мировой опыт, рассмотрена необходимость перехода в Украине на трёхчленную классификацию гранулометрического состава почвы.

Ключевые слова: гранулометрический состав; дефицит С-насыщенности; органический карбон почвы; потенциал С-насыщенности; С-защитная способность; С-депонирование; С-секвестрация

Форма цитирования: Гамкало З.Г., Шпакивская И.М., Марискевич О.Г. Литогенный потенциал карбонизации педосферы: теоретико-методологические, методические и экосистемный подходы. *Агрохимия и почвоведение*. Межвед. тем. научн. сборник. 2021. Вып. 92. Харьков: ННЦ "ИПА им. О.Н. Соколовского". С. 41-51. <https://doi.org/10.31073/acss92-05>