

Author: Vakhovskaya, Zinaida S.- Boldyrev, Kirill A. - Sobolev, Denis A. - Kosheleva, Naraia E.
Affiliation: Russian State University for the Humanities, Lomonosov Moscow State University, Russian Academy of Sciences
Title: THE IMPACT OF PRECIPITATION ON MOSCOW'S MONUMENTS
Citation: Metszet, Vol 16, No 5 (2025), pp 50-55, DOI: 10.33268/Met.2025.5.7

<https://doi.org/10.33268/Met.2025.5.7>

ANALYSIS, MONITORING, GEOCHEMICAL MODELING, MOSCOW, RUSSIA

This study employed PHREEQC thermodynamic modeling to assess the impact of precipitation on Moscow's granite, marble, and concrete monuments. Data from March to September 2022 revealed that low-rainfall, acidic pH episodes are the most destructive. Modeling confirmed that concrete is the most vulnerable material, due to mineral dissolution. Crucially, the Langelier Saturation Index (LSI) showed a strong correlation with dissolution potential, establishing it as an effective rapid assessment method for predicting precipitation's corrosive effect on these materials.



01

A LÉGKÖRI CSAPADÉK HATÁSA MOSZKVA MŰEMLÉKEIRE

ELEMZÉS, MONITOROZÁS, GEOKÉMIAI* MODELLEZÉS

SZERZŐ | AUTHOR

Zinaida S. Vakhovskaya, Kirill A. Boldyrev, Denis A. Sobolev, Natalia E. Kosheleva

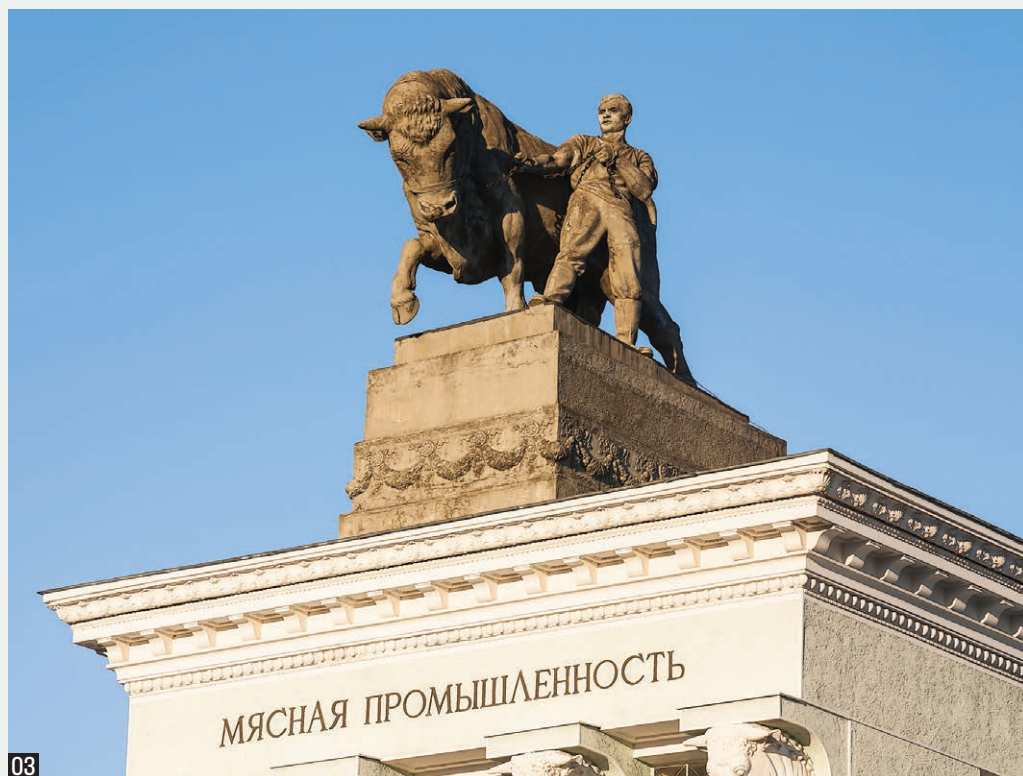
—Moszkva kulturális örökségének jelentős részét gránitból, bronzból, betonból készült, önmagukban álló műemlékek és köztéri műalkotások, szobrok képezik. [1] P. Brimblecombe [2] az angliai párás éghajlat kulturális örökségre gyakorolt hatásának elemzése során öt fő külső hatást nevez meg, amelyek kockázatot jelentenek, első helyen a csapadékot említve. A csapadék hatása az ásványi anyagok kioldódásában, a fémek korróziójában nyilvánul meg, a pusztulás ütemét pedig a csapadék kémiai összetétele, hőmérséklete, valamint az érintkezési felület mérete határozza meg. A műemlékek anyaga és a csapadék közötti kölcsönhatás felszíni károsodást okoz, de növeli a víz és az oldott anyagok pórusokon és repedéseken keresztüli behatolásának kockázatát is, ami tovább gyorsítja a pusztulást. [3] A víz a műemlékek pusztulásának fő okozója, legalábbis Európában. [4] Az építéshez használt kő (például a gránit) károsodása tömegvesztésben, a porozítás megváltozásában, elszíneződésben és rideggé válásban nyilvánul meg. [5] Az éghajlatváltozás következtében az utóbbi években egyre gyakoribbak a szélsőséges időjárási jelenségek, [6] amelyek újabb potenciális veszélyforrást jelentenek, mivel egyrészt gyorsítják az eróziós folyamatot, másrészt új helyzeteket is teremtenek. [7] A termodinamikai modellezés módszereinek fejlődése, valamint ezek sikeres alkalmazása

01



02

- 01 Mészkövet és fekete gránitot használtak az Orosz Állami Könyvtár épületéhez, amely a Vozdvizhenka utca 3/5. szám alatt található (Forrás: Wikimedia Commons)
- 02 Szürke beton és üveg a TASS épületében, a Tverszkij körút 2. szám alatt (Forrás: Wikimedia Commons / Ludvig14)
- 03 Beton és márvány a VDNKh 51. számú „Húsipari” pavilonján, a Mira sugárút 119. szám alatt, az 51. épületben (Forrás: Wikimedia Commons / AlixSaz)



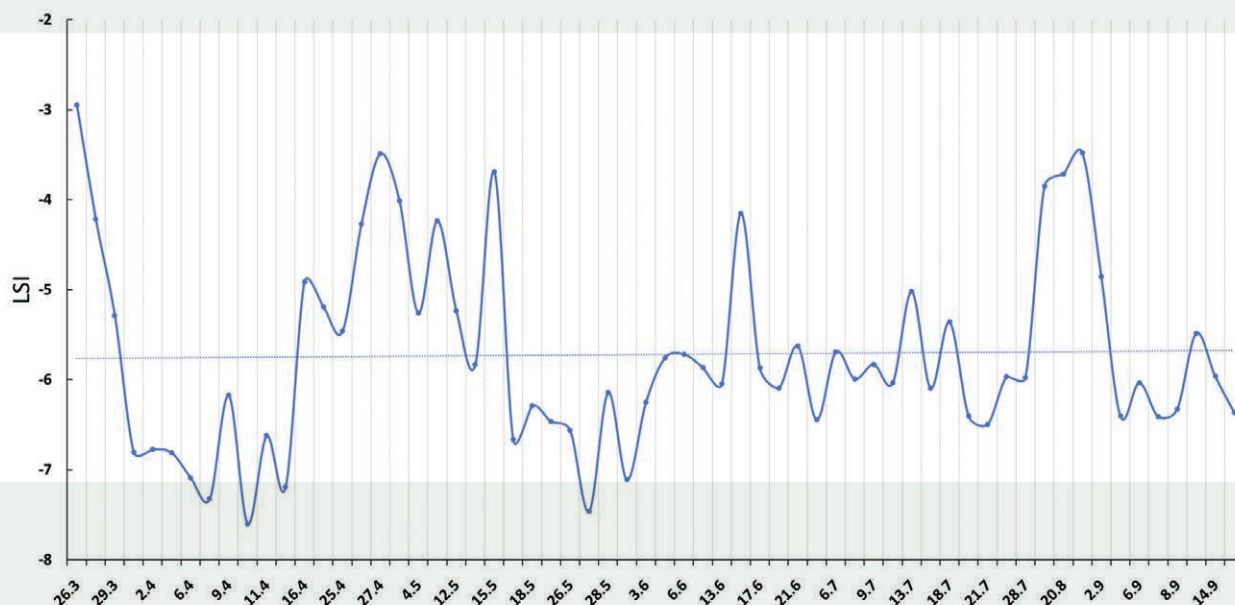
03

olyan területeken, mint a beton kioldódása, [8] a cement összetételének javítása, [9] a karbonátos kőzetek savas eső okozta mállása [10] lehetővé teszi felhasználásukat a csapadék műemléki anyagokra gyakorolt hatásainak előrejelzésére is. A modellezéshez célszerű a PHREEQC nevű, szabadon elérhető geokémiai modellező szoftvert használni, amelyet az Egyesült Államok Földtani Szolgálat (USGS) fejlesztett ki. [11]

—A tanulmány célja értékelést adni a légköri csapadéknak (hőmérséklet, mennyiség, kémiai összetétel) Moszkva műemlék anyagaira gyakorolt hatásáról a betonra, gránitra és márványra vonatkozó termodinamikai modellezés alapján.

—A műemlékek erodálódási mechanizmusainak és tényezőinek megértéséhez ismernünk kell az anyagösszetételüket. Moszkva műemlékeinek anyagait és használati gyakoriságukat katalógusadatok [1] alapján elemeztük. (1. táblázat) Megállapítható, hogy a természetben előforduló anyagok közül a gránit és a márvány, a mesterségesen előállított anyagok közül pedig a bronz és a beton a leggyakoribbak ezeken az épületeken és köztéri alkotásokon.

06
02



04

—A csapadék monitorozása napi mintavétellel történt 2022. március 16. és szeptember 15. között a Moszkvai Állami Egyetem Meteorológiai Obszervatóriumának területén. Ezt az időintervallumot a moszkvai csapadékviszonyok változékonysága indokolta. [12,13]. A pH-értéket EXPERT-001-3pN (Oroszország) pH-mérővel mértük. A fajlagos elektromos vezetőképességet (SEC) EXPERT-002-2-6-P konduktométerrel, RS232C interfésszel mértük (Oroszország). A kationok (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) és anionok (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) koncentrációját JetChrom (PortLab, Oroszország) ionkromatográf, Shodex oszloppal határoztuk meg. A különböző csapadékesemények során a koncentrációk jelentősen eltértek, ezért a kéthetes időszak összehasonlításához térfogattal súlyozott koncentrációkat számoltunk a következő képlettel:

$$C = (\sum(C_i \cdot X_i)) / X_s, \quad (1)$$

ahol C_i az ionkoncentráció (mg/l), X_i a lehullott csapadék mennyisége (mm) az i -edik eseménynél, X_s pedig a vizsgált időszak összesített csapadékmennyisége (mm).

—A modellezés során figyelembe vett potenciálisan képződő ásványfázisok beton, gránit és márvány esetén: kalcit (CaCO_3), portlandit (Ca(OH)_2), CSH és CH hidratált kalcium-szilikátok (CaH_2SiO_3), ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), hidrogarnet ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), hidrogarnet C_3AH_3 ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), jennit ($\text{Ca}_{1.67}\text{SiO}_2(\text{OH})_{3.33} \cdot 0.43\text{H}_2\text{O}$), hidrotalkit ($\text{Mg}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{14} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), gipsz ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), anortit ($\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$), muszkovit ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$).

Az egyes ásványfázisok telítettségi indexét (SI) a következő képlettel számoltuk:

$$\text{SI} = \log \text{IAP} - \log K_{\text{sp}}, \quad (2)$$

ahol IAP az ionaktivitások szorzata az oldatban, K_{sp} az adott ásvány oldhatósági állandója. Ha $\text{SI} > 0$, akkor a fázis kicsapódása lehetséges, ha $\text{SI} < 0$, akkor ez nem valószínű. Az ionaktivitások szorzatát a csapadék-mintákból mért koncentrációk alapján számítottuk. A modell csak pozitív hőmérsékleten alkalmazható.

A víz termotabilitásának becslésére széles körben alkalmazzák a **Langelier-telítettségi indexet (LSI)**, amelyhez kevesebb paraméter szükséges: pH, SEC, hőmérséklet, Ca^{2+} és HCO_3^- koncentrációk:

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s, \quad (3)$$

$$\text{ahol } \text{pH}_s = (9,3 + A + B) - (C + D),$$

$$A = 0,1 \times \lg [\text{SEC}];$$

$$B = -13,12 \times \lg (T(^{\circ}\text{C}) + 273) + 34,55;$$

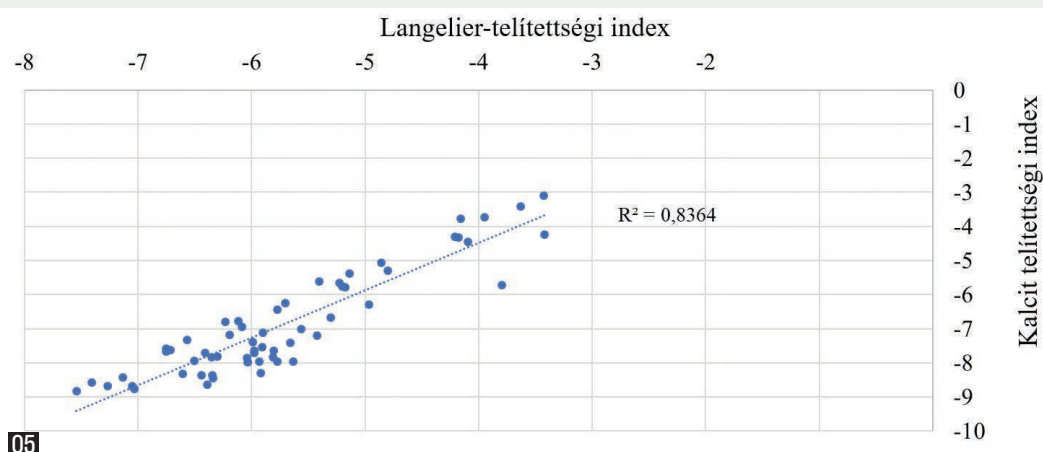
$$C = \lg [\text{keménység}] - 0,4;$$

$$D = \lg [\text{alkalitás}].$$

—2022-ben az események 67,7%-ában kis mennyiségű eső esett (<5 mm/nap). A legalacsonyabb pH-értéket ($4,10 \pm 0,03$) július 6-án regisztrálták. A fajlagos elektromos vezetőképesség (SEC) maximális értéke ebben az időszakban $1247 \mu\text{S}/\text{cm}$ volt. Ezt az augusztusban lehullott második eső mintájában mérték, atipikus, mindössze 2 mm-es csapadékmennyiséggel. Az első augusztusi eső augusztus 8-án (1,7 mm), a második

04

05



- 04 1. ábra. A Langelier-telítési indexek, amelyeket a 2022. március 28. és szeptember 15. közötti vizsgálati időszakban minden csapadékepizódra kiszámítottak. A megfigyeléseket március 16. óta végezték, az első csapadék március 28-án esett
- 05 2. ábra. Összefüggés a Langelier-telítési index és a kalcit telítetési index között

augusztus 20-án (0,3 mm) esett. Áprilisban a SEC 19–158 $\mu\text{S}/\text{cm}$, májusban és júniusban 22–111, illetve 20–124 $\mu\text{S}/\text{cm}$, júliusban 21–239 $\mu\text{S}/\text{cm}$ között változott.

—Júniusban a csapadékmennyiség az átlag 52%-a volt, augusztusban csupán 2,5%-a. Nagy mennyiségű csapadék esetén az ionkoncentrációk csökkentek – a legkisebb koncentrációk a május 27. utáni mintákban jelentkeztek, amikor egy nap alatt 33,8 mm eső esett.

—A termodinamikai modellezés lehetővé tette azon csapadékesemények azonosítását, amelyek a legnagyobb károsító hatást gyakorolták az anyagokra – ezek kis csapadékmennyiséggel és savas pH-val jellemezhetők. Ilyen események a nyári hónapokban nem fordultak elő. A legnagyobb csapadékreteget adó esemény (33,8 mm) nem volt egyben a legkárosabb is.

—Megállapítható, hogy a legsebezhetőbbek a betonból készült műemlékek, mivel az összetevő ásványok (ettringit, portlandit, hidrotalkit) telítettség indexei a legmagasabbak. Az anyagerózió folyamatának jobb megértéséhez szükséges az egyes ásványfázisok oldódási sebességének meghatározása az adott csapadékjellemzők mellett.

—A műemlékek esetében célszerű hosszú távú előrejelzéseket készíteni az állapotváltozásokra vonatkozóan, [14] beleértve a környezeti feltételek változásaiból eredő állapotromlást is. Minden vizsgált csapadékeseménynél negatív Langelier-index értéket kaptunk. (1. a-b ábra) Az SI és LSI értékek között erős összefüggés volt megfigyelhető az ásványfázisok többsége esetében, kivéve az albitot és a gipszet. (2. táblázat)

—Az SI és LSI közötti szignifikáns korreláció azt mutatja, hogy a Langelier-index számításához használt paraméterek (pH, vezetőképesség, hőmérséklet, Ca^{2+} és HCO_3^- koncentráció) jelentős hatással vannak a termodinamikai számításokra, így a módszer gyors becslésre is alkalmas.

KÖVETKEZTETÉSEK

—A csapadékmunkitorozás eredményei szerint a legkárosabb események tavasszal és ősszel fordultak elő. A hosszú száraz periódusokat követő alacsony csapadékmennyiségű esőzések különösen veszélyesek lehetnek. Bár a vizsgált időszak nem elég hosszú ahhoz, hogy ezt egyértelműen kijelenthessük, általánosan elmondható, hogy minél hosszabb a száraz időszak és minél kisebb a lehullott csapadék mennyisége utána, annál koncentráltabb és agresszívebb a csapadék. A modellezés azt mutatta, hogy a főbb ásványfázisok (gránit, beton, márvány) oldódása lehetséges az adott paraméterek mellett. A legkárosítóbb helyzetek kis mennyiségű, savas esők mellett alakultak ki, amikor a megelőző napon alacsony volt a hőmérséklet. A legsebezhetőbb anyagnak a beton bizonyult. A termodinamikai modellezés fontos eszközzé válhat a csapadék hatásának értékelésére, és hozzájárulhat a tudományos alapokon nyugvó műemlékvédelemhez. A globális trendek az extrém időjárási események gyakoriságának növekedését mutatják – a vizsgált időszakban ilyen volt például az augusztusi esemény, amikor mindössze 2 mm eső esett. Gyors becslési módszerként gránit, beton és márvány esetén a Langelier-index ajánlható.

1. táblázat. Anyagok előfordulási gyakorisága műemlékeken Moszkva egyes kerületeiben (anyagok [1] alapján)

Anyagok	Műemlékek száma az egyes kerületekben								
	Központi	Északi	Észak-keleti	Keleti	Délkeleti	Déli	Délnyugati	Nyugati	Észak-nyugati
Természetben előforduló anyagok									
Gránit	177	68	56	55	74	28	51	71	26
Labradorit	4	-	-	-	-	-	-	1	1
Gabbro-diabáz	2	1	3	1	1	1	2	-	-
Márvány	16	1	18	9	10	2	5	5	4
Kő	1	-	3	-	-	-	-	-	-
Homokkő	1	2	-	-	-	-	1	1	1
Spiáter	2	1	-	1	1	-	1	1	1
Fa	1	-	2	1	-	-	1	1	-
Mesterségesen előállított anyagok									
Bronz	151	49	36	28	37	17	25	41	6
Aranyozás	6	6	-	2	1	-	-	1	1
Öntöttvas	3	5	11	3	2	2	-	2	-
Egyéb fém	6	4	8	22	15	2	11	10	7
Réz	5	2	2	-	-	-	3	1	-
Sárgaréz	6	3	3	3	4	-	3	3	1
Vas	1	2	2	3	3	1	4	2	3
Acél	3	1	2	2	4	1	5	3	6
Vasbeton	16	12	21	36	31	12	32	17	17
Műkő	2	3	4	14	9	3	2	-	-
Összes objektum	220	86	86	79	95	32	69	79	37

06

- 06 Anyagok előfordulási gyakorisága műemlékeken Moszkva egyes kerületeiben (anyagok [1] alapján)
- 07 Korrelációs együtthatók a Langelier-telítettségi index és az ásványfázis telítettségi indexek között beton, gránit és márvány anyagok esetén

2. táblázat: Korrelációs együtthatók a Langelier-telítettségi index és az ásványfázis telítettségi indexek között beton, gránit és márvány anyagok esetén

LSI/SI közötti korrelációs együtthatók	Kalcit (beton, márvány)	Jennit (beton)	CSH (beton)	CH (beton)	C ₃ AH ₆ (Hidrogarnet) (beton)	Ettringit (beton)	Hidrogarnet (beton)	Hidrotalkit (beton)	Portlandit (beton)	Gipsz (gipsz, alabástrom)	Albit (gránit)	Anortit (gránit)	Muszkovit (gránit)
	0.91	0.94	0.93	0.95	0.91	0.86	0.83	0.91	0.87	0.43	0.46	0.87	0.83

Megjegyzés: n = 62 epizódos mintavétel esetén a minimális szignifikáns korrelációs együttható p = 0,95 esetén 0,25.

07

IRODALOM

- [1] Katalog «Pamyatniki monumental'nogo iskusstva Moskvyy. Sprav. izdanie. / Departament kul'turnogo naslediya g. Moskvyy. – M.: OOO Milk Edzhensi», 2016 – 404 s.:il. [orosz nyelven]
- [2] **Brimblecombe, P.**: „Refining climate change threats to heritage”, *Journal of the Institute of Conservation*, Issue 37 (2014), pp 85–93, DOI:<<https://doi.org/10.1080/19455224.2014.916226>> [utolsó belépés: 2025-09-16].
- [3] **Panova, E – Vlasov, D – Zelenskaya, M – Vlasov, A.** Granite Weathering Under Urban Condition, in E Panova (ed): *The History of Natural Stone in Saint-Petersburg*, Springer, Cham, Switzerland, 2023, pp 211–223, DOI: <<https://doi.org/10.1007/978-3-031-18861-9>> [utolsó belépés: 2025-09-16].
- [4] **Sesana, E – Gagnon, A S – Ciantelli, C – Cassar, J – Hughes, J J.**: „Climate change impacts on cultural heritage: A literature review”, *WIREs Climate Change*, Vol 12, No 4 (2021), e710, DOI:<[10.1002/wcc.710](https://doi.org/10.1002/wcc.710)> [utolsó belépés: 2025-09-16].
- [5] **N R Butlin**: „Effects of air pollutants on buildings and materials”, *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Section B: Biological Sciences*, 97 (1990) 255–272, DOI: <<https://doi.org/10.1017/S0269727000005376>> [utolsó belépés: 2025-09-16].
- [6] „Klimat Moskvyy v usloviyah global'nogo potepleniya”, in A V Kislov (ed): *Monographiya*, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta Moskva, 2017, p 288.
- [7] **C Bertolin**: „Preservation of cultural heritage and resources threatened by climate change”, *Geosciences*, 9(6) (2019) 250, DOI: <<https://doi.org/10.3390/geosciences9060250>> [utolsó belépés: 2025-09-16].
- [8] **N Schiopu – L Tiruta-Barna – E Jayr – J Méhu – P Moszkowicz**: „Modelling and simulation of concrete leaching under outdoor exposure conditions”, *Science of The Total Environment*, 407(5) (2009) 1613–1630, DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.027>> [utolsó belépés: 2025-09-16].
- [9] **N Holmes – M Tyrer – R West – A Lowe – D Kelliher**: „Using PHREEQC to model cement hydration”, *Construction and Building Materials*, 319 (2022) 126129, DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126129>> [utolsó belépés: 2025-09-16].
- [10] **Tianming Huang – Yifan Fan – Yin Long – Zhonghe Pang**: „Quantitative calculation for the contribution of acid rain to carbonate weathering”, *Journal of Hydrology*, 568 (2019) 360–371, DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.003>> [utolsó belépés: 2025-09-16].
- [11] **D L Parkhurst – C A J Appelo**: „Description of input and examples for PHREEQC version 3 – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations”, *US Geological Survey Techniques and Methods*, (2013) book 6, chap A43, p 497.
- [12] **I D Eremina – A E Aloyan – V O Arutyunyan – I K Larin – N E Chubarova – A N Yermakov**: „Hydrocarbonates in atmospheric precipitation of Moscow: Monitoring data and analysis”, *Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics*, Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom), 53(3) (2017) 334–342, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0001433817030069> [utolsó belépés: 2025-09-16].
- [13] **D Vlasov – N Kasimov – I Eremina – G Shinkareva – N Chubarova**: „Partitioning and solubility of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity”, *Atmospheric Pollution Research*, 12(1) (2021) 255–271, DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.09.012>> [utolsó belépés: 2025-09-16].
- [14] **P Brimblecombe – C M Grossi**: „Millennium-long damage to building materials in London”, *Science of The Total Environment*, 407(4) (2009) 1354–1361, DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.037>> [utolsó belépés: 2025-09-16].
- [15] Nachalas' restavraciya betonnyh figur na «Dome u Kaluzhskoj zastavy», *Betonhouse* 09 12, 2018 – 12 29, 2022, 2022, DOI: <<https://beton-house.com/novosti/restavraciya-betonnyh-figur>> [utolsó belépés: 2025-09-16].

A kutatást az Orosz Tudományos Alap támogatása tette lehetővé (projektszám: 19-77-30004-P).

* PHREEQC-modellezés, a rövidítés kifejtése: „ph redox equilibrium in C”

Fordította: Ware-Nagy Orsolya