УДК 581.812+ 582.52/.59 DOI: 10.14258/pbssm.2026066

Crenate-фитолиты листьев злаков некоторых культурных и диких видов *Aveninae* J. Presl: потенциал для реконструкции древнего земледелия

Crenate phytoliths of grasses leaves of some cultivated and wild species of *Aveninae* J. Presl: potential for reconstructing ancient agriculture

Соломонова М. Ю., Сперанская Н. Ю.

Solomonova M. Yu., Speranskaya N. Yu.

Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия. E-mail: m_solomonova@list.ru, speranskaj@mail.ru
Altai State University, Barnaul, Russia.

Реферат. В статье приводятся результаты сопоставления морфометрических характеристик Crenate (CRE) фитолитов из листьев диких видов *Aveninae* J. Presl юга Западной Сибири (*Helictotrichon pubescens* (Huds.) Pilg., *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Koeleria delavignei* Czern. ex Domin, *Trisetum altaicum* Roshev., *T. sibiricum* Rupr.) и аналогичных параметров у кремниевых частиц некоторых представителей рода овес (*Avena sativa* L., *A. fatua* L., *A. eriantha* Durieu). Исследовано девятнадцать морфометрических характеристик, описывающих форму и размер Crenate фитолитов. Для оценки различий между фитолитами отдельных видов представлены графики средних значений и стандартных отклонений для некоторых наиболее значимых характеристик. В качестве ординационного метода использован анализ главных компонент (PCA). Полученные результаты свидетельствуют о формировании у видов овса более крупных Crenate фитолитов по сравнению с дикими видами юга Западной Сибири. Наиболее важными морфометрическими характеристиками фитолитов, позволяющими отделить часть фитолитов *A. sativa* и *A. fatua* от частиц других видов являются длинна, периметр и некоторые показатели формы (компактность, удлиненность, соотношение сторон и др.). Важными параметрами также являются показатели выраженности лопастей фитолитов. Из диких видов злаков наиболее крупными формами Crenate обладает *T. sibirica*, но и его фитолиты меньше и компактнее по сравнению с фитолитами *A. sativa* и *A. fatua*.

Ключевые слова. Морфометрические характеристики, овес, фитолиты, *Avena*, *Aveninae*, Crenate.

Summary. This paper presents a comparative analysis of the morphometric characteristics of Crenate (CRE) phytoliths extracted from the leaves of wild *Aveninae* J. Presl species native to the southern part of Western Siberia (*Helictotrichon pubescens* (Huds.) Pilg., *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Koeleria delavignei* Czern. ex Domin, *Trisetum altaicum* Roshev., and *T. sibiricum* Rupr.) against those of silica particles from selected cultivated and wild oat species (*Avena sativa* L., *A. fatua* L., and *A. eriantha* Durieu). A total of nineteen morphometric descriptors, characterizing both the size and shape of the Crenate phytoliths, were examined. To visualize the differences among species, mean value plots accompanied by standard deviation bars are provided for several key parameters. Principal Component Analysis (PCA) was employed as the ordination method. The findings reveal that oat species tend to produce significantly larger crenate phytoliths compared to the wild Siberian grasses. Key morphometric traits – including length, perimeter, and several shape indices (such as compactness, elongation, and aspect ratio) – proved most effective in distinguishing a portion of *A. sativa* and *A. fatua* phytoliths from those of other species. Additionally, parameters reflecting lobe expression also contributed substantially to differentiation. Among the wild grasses, *T. sibiricum* produced the largest forms; however, its phytoliths remained smaller and more compact than those observed in *A. sativa* and *A. fatua*.

Key words. *Avena*, *Aveninae*, Crenate, morphometric parameters, oats, phytoliths.

Введение. Фитолитный анализ один из наиболее востребованных методов в археоботанике. Кремниевые фитолиты сохраняются во внешней среде длительное время и позволяют идентифицировать растение их сформировавшие (Гольева, 2001). Особенно детально для метода проработана идентификация фитолитов культурных злаков, включая их морофметрию (Ball et al., 1999, 2017; Wang et al., 2019; Yost et al., 2021). Поэтому современная система исследования введения в культуру представителей Poaceae Bernhard основывается на фитолитном анализе (Larson et al., 2014). Одной из проблем этого направления является то, что для некоторых территорий проблематично разделить фитолиты

культурных и диких видов злаков. Примером такой территории является юг Западной Сибири. Для исследований древнего земледелия на этой территории сложно применять некоторые стандартные формы культурных фитолитов злаков из-за формирования таких же структур дикими видами (Соломонова, Сперанская, 2026). Поэтому стоит вопрос о введении дополнительных морфотипов фитолитов для археоботанических исследований на территории юга Западной Сибири.

Crenate – распространенный морофтип для видов подсемейства *Pooideae* Benth. (Neumann et al., 2019). В предыдущих исследованиях было показано, что некоторые виды *Avena* L. формируют этот морфотип, в том числе *Avena sativa* L. и близкородственный ему *Avena fatua* L. (Соломонова, Сперанская, 2026). Более этого эти два вида обладают очень крупными фитолитами. Целью представленного исследования является сопоставление морфометрических характеристик фитолитов морфотипа Crenate видов *Avena* с дикими представителями подтрибы *Aveninae* J. Presl юга Западной Сибири.

Материалы и методы. В качестве фоновых видов подтрибы были исследованы *Helictotrichon pubescens* (Huds.) Pilg., *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Koeleria delavignei* Czern. ex Domin, *Trisetum altaicum* Roshev., *T. sibiricum* Rupr., образцы фитолитов из листьев которых хранятся в коллекции кафедры ботаники Алтайского государственного университета. Также были исследованы листья пяти видов овса: овес посевной (*Avena sativa*), овес пустой (*A. fatua*), овес мохнатоцветковый (*A. eriantha* Durieu), овес щетинистый (*A. strigosa* Schreb.), овес волосистый (*A. pilosa* (Roem. et Schult.) Bieb.). Из них только у трех формируются фитолиты морфотипа Crenate (*Avena sativa*, *A. fatua*, *A. eriantha*). Для образцов были получены микрофотографии фитолитов с помощью микроскопа Olympus BX-51, камеры Olympus XC-50 и программного обеспечения cellSens Standart. Морфометрические исследования были выполнены с помощью программы ImageJ и специализированного плагина Phytoliths_Batch. Оценивались стандартные морфометричесикие параметры (Ball et al., 2016) и степень выраженности лопастей (Соломонова и др., 2025). Выборка частиц для морфометрии составила 200–300 фитолитов каждого вида. Статистическая обработка и визуализация данных проведена на языке R в программной среде RStudio.

Результаты. Среди диких видов юга Западной Сибири, относящихся к *Aveninae* наиболее крупными Crenate фитолитами обладает *Trisetum sibiricum,* однако некоторые его характеристики, например, степень выраженности лопастей (L1, L2) соотносится со значениями у других представителей этой подтрибы. Некоторые отличия наблюдаются в фитолитах *Helictotrichon pubescens*. Особенными характеристиками этого вида являются ширина и связанные с ней характеристики формы, например, соотношение сторон (Aspect ratio). В то же время часть других характеристик, в том числе, степень выраженности лопастей, сопоставима с другими видами.

Crenate фитолиты рода *Avena* отличаются от остальных изученных видов в первую очередь степенью выраженности лопастей (L1, L2), фитолиты овса в среднем более вытянутые (elongation, aspect ratio) и крупные (area, length). Из этого рода наиболее близкими к видам юга Западной Сибири морфометрическими характеристиками Crenate фитолитов обладает *A. eriantha*, но и его фитолиты отличаются степенью выраженности лопастей.

При ординации данных по всем девятнадцати параметрам на плоскость двух первых компонент, наблюдается пересечение облаков точек (рис. 2). Наибольшая вариабельность в распределении точек наблюдается по первой компоненте (60,7 % изменчивости). По этой же компоненте наблюдается расхождение облаков данных по роду *Avena* от основного массива. Наибольшее количество Crenate фитолитов, отличающихся от диких видов юга Западной Сибири, наблюдается у *A. sativa* и *A. fatua*. Основные характеристики размера определяющие отличия части фитолитов этих видов это характеристики периметра (perimeter, convex perimeter) и длинны (length, fiber length). По форме Crenate фитолиты *A. sativa* и *A. fatua* отличаются большей степенью вытянутости (elongathion) и соотношением сторон (aspect ratio), а фоновые виды имеют более компактную (compactness) форму.

Степень выраженности лопастей играет меньшую роль в отличиях фитолитов видов овса, но все еще является важным.

Обсуждение результатов. Представленное исследование является первой попыткой оценить потенциал морфометрических показателей Crenate фитолитов листьев овса в качестве палео-индикатора культурных злаков. Этот морфотип встречается и в колосковых чешуях, например, в статье М. Портилло с соавторами имеются его изображения в боковой проекции (Portillo et al., 2006, Fig. 5).

Род овес формирует очень крупные Crenate фитолиты, особенно *A. sativa* и *A. fatua.* Морфометрические показатели фитолитов этих двух видов превосходят не только аналогичные характеристики

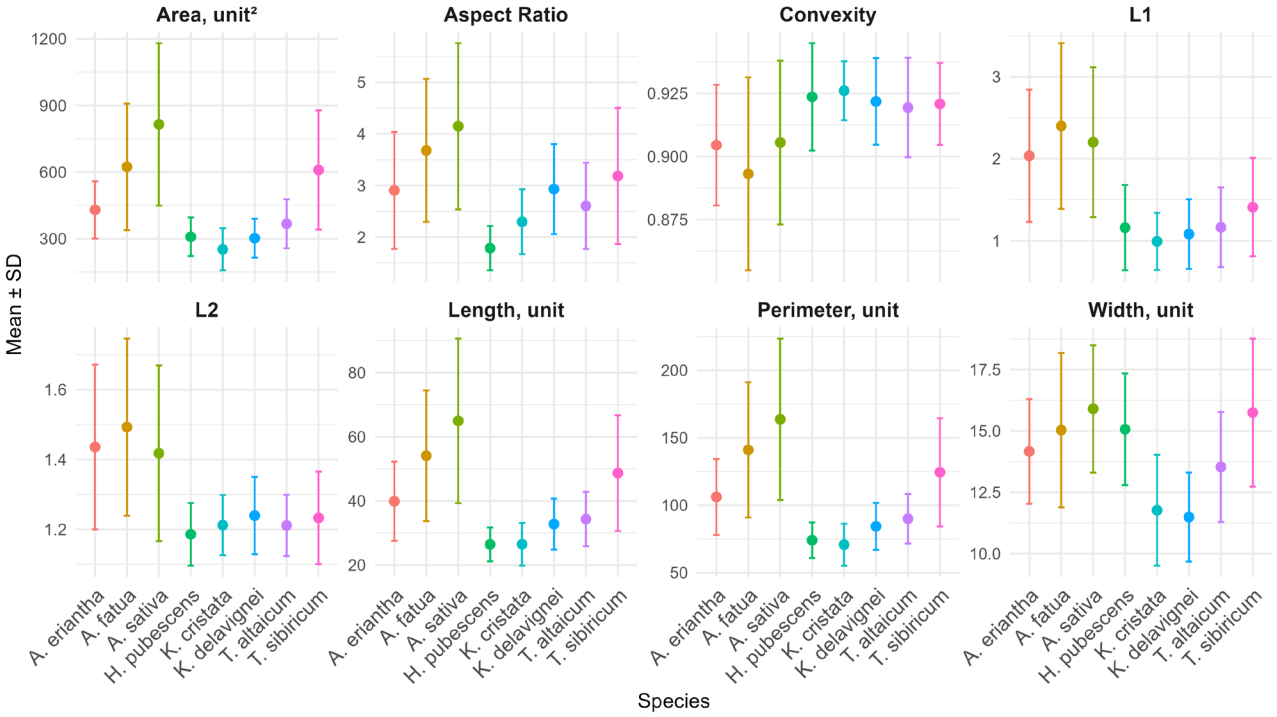


Рис. 1. Средние значения и стандартное отклонения по некоторым морфометрическим характеристикам Crenate-фитолитов *Aveninae* J. Presl. Изученные виды: *Avena eriantha* Durieu, *A fatua* L., *A. sativa* L., *Helictotrichon pubescens* (Huds.) Pilg., *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Koeleria delavignei* Czern. ex Domin, *Trisetum altaicum* Roshev., *T. sibiricum* Rupr.

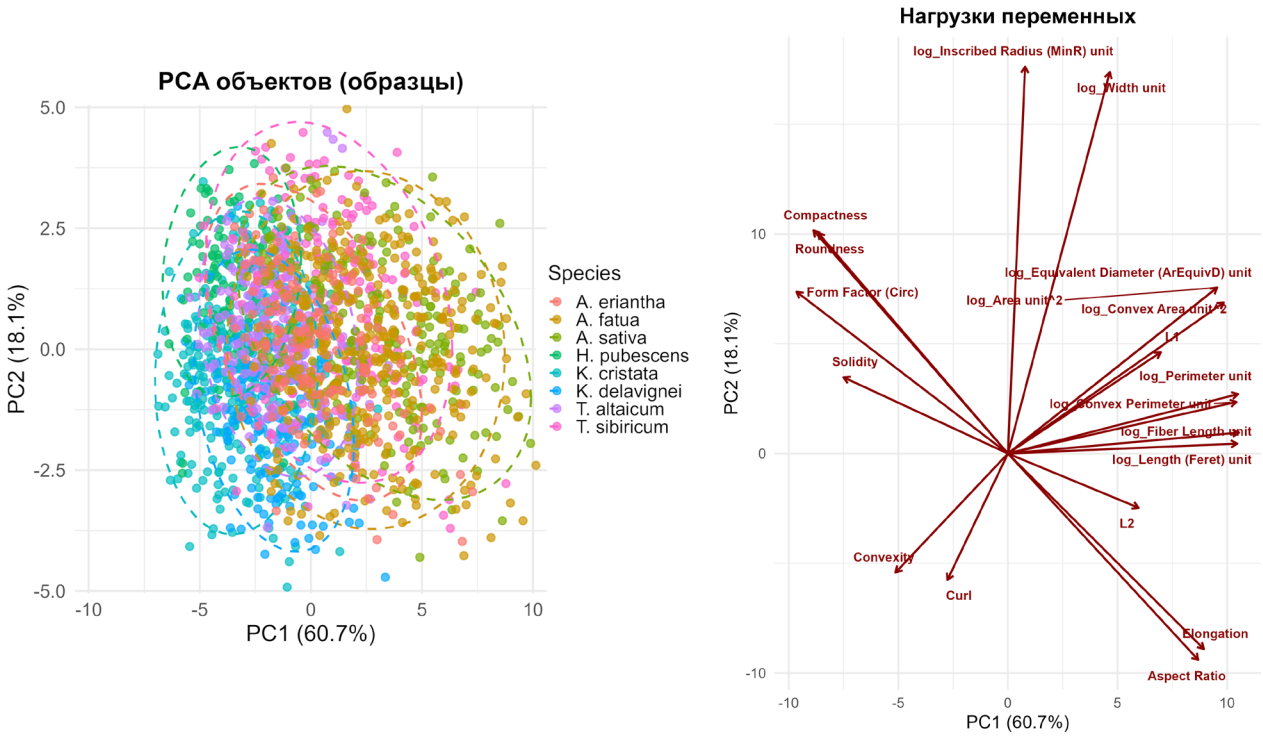


Рис. 2. Результаты ординационного анализа методом главных компонент: облака данных и нагрузки на 19 переменных (с учетом логарифмирования). Изученные виды: *Avena eriantha* Durieu, *A fatua* L., *A. sativa* L., *Helictotrichon pubescens* (Huds.) Pilg., *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Koeleria delavignei* Czern. ex Domin, *Trisetum altaicum* Roshev., *T. sibiricum* Rupr.

у представителей исследуемой подтрибы, но и ряда других видов трибы *Poeae* (Котов и др., 2023; Соломонова, 2024). В таксономическом отношении из изученных диких видов юга Западной Сибири наиболее близким к *Avena* является *Helictotrichon*, входящий с ним в одну кладу (Saarela et al., 2017). Однако и его фитолиты значительно уступают в размерах и степени вытянутости формам у *A. sativa* и *A fatua*. Близость формы и размера фитолитов родов *A. sativa* и *A. fatua* объясняется генетической близостью этих видов (Лоскутов и др., 2021), вплоть до того, что некоторыми авторами (Ladizinsky, Zohary, 1971; Ladizinsky, 2012) овес пустой рассматривается в качестве одной из форм овса посевного.

Одним из диких видов трибы обладающих более крупными фитолитами является *Trisetum sibiricum*. Его фитолиты отличаются от *T. altaicum* в большую сторону. Возможно, это объясняется тем, что эти два вида принадлежат разным секциям (Barbera et al., 2017; 2018). Тем не менее, и относительно *T. sibiricum*, два вида овса *A. sativa* и *A. fatua* формируют большое число несопоставимых ни с кем по размеру форм (по данным PCA), которые и будут индикаторными.

Заключение. Морфометричесике характеристики Crenate фитолитов овса являются потенциальными формами для идентификации древнего земледелия. *A. sativa*, *A. fatua* формируют часть Crenate, сопоставимых с другими видами трибы *Aveninae*. Однако, часть фитолитов у этих двух видов обладает характеристиками, позволяющими их отделить от «диких» форм Crenate и высказать предположение о наличии древнего земледелия. Дальнейшее изучение потенциала этого морфотипа как палео-индикатора должно включить в себя и исследование внутри трибы *Triticeae* Dumort.

Благодарности. Научно-исследовательская работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания, проект FZMW-2026-0008 (тема «Применение цифровых технологий и естественнонаучных методов для реконструкции древней истории Алтая и сопредельных территорий на основе археологических источников»). Гербарные образцы *Avena eriantha*, *A. strigosa*, *A. pilosa* были предоставлены к. б. н. Иреной Георгиевной Чухиной (Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова).

ЛИТЕРАТУРА

Гольева А. А. Фитолиты и их информационная роль в изучении природных и археологических объектов. – М: Элиста; Сыктывкар: Полтекс, 2001. – 140 с.

Котов С. Д., Соломонова М. Ю., Сперанская Н. Ю. Изменчивость морфометрических характеристик фитолитов *Dactylis glomerata* L. в различных климатических условиях // Почвы и окружающая среда. Всеросс. науч. конф. с междунар. участием, посвященная 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (2–6 октября 2023 г., г. Новосибирск). – Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. – С. 825–828.

Лоскутов И. Г., Гнутиков А. А., Блинова Е. В., Родионов А. В. Происхождение и ресурсный потенциал диких и культурных видов рода овес (*Avena* L.) // Генетика, 2021. – Т. 57, № 6. – С. 632–652. https://doi.org/10.31857/S0016675821060060

Соломонова М. Ю., Лященко А. Д., Сперанский Г. А., Блинников М. С., Сперанская Н. Ю. Два новых морфометрических параметра для классификации Crenate-фитолитов *Pooideae* Benth. // Turczaninowia, 2025. – Т. 28, № 3. – С. 145–153. https://doi.org/10.14258/turczaninowia.28.3.17.

Соломонова М. Ю. Crenate фитолиты эпидермы листьев *Agrostidinae* Fr. Потенциал морфометрических исследований // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии, 2024. – № 23(2). – С. 425–428. https://doi.org/10.14258/pbssm.2024132

Соломонова М. Ю., Сперанская Н. Ю. Фитолиты злаков – потенциал реконструкции древнего земледелия на юге Западной Сибири на примере двух морфотипов // Археология и этнография Южной Сибири: наследие, исследования, перспективы: матер. Междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения выдающегося ученого, д. ист. н., заслуженного деятеля науки Республики Хакасия, лауреата Государственной премии Республики Хакасия им. Н. Ф. Катанова Якова Ивановича Сунчугашева и 140-летию со дня рождения ученого-этнографа, общественного и политического деятеля Степана Дмитриевича Майнагашева (17–21 июня 2026 года, г. Абакан). В 2 частях., Ч 1: Археология. – Абакан: Хакасское книжное издательство имени В. М. Торосова, 2026. – С. 36–43.

Ball T. B., Gardner J. S., Anderson N. Identifying inflorescence phytoliths from selected species of wheat (*Triticum monococcum, T. dicoccum*, *T. dicoccoides* and *T. aestivum*) and barley (*Hordeum vulgare* and *H. spontaneum*) (Gramineae) // American Journal of Botany, 1999. – № 86 (11). – P. 1615–1623. https://doi.org/10.2307/2656798

Ball T., Vrydaghs L., Mercer T., Pearce M., Snyder S., Lisztes-Szabó Z., Pető A. A morphometric study of variance in articulated dendritic phytolith wave lobes within selected species of *Triticeae* and *Aveneae* // Vegetation History and Archaeobotany, 2017. – № 26. – P. 85–97. https://doi.org/10.1007/s00334-015-0551-x

Ball T. B., Davis A., Evett R. R., Ladwig J. L., Tromp M., Out W.A., Portillo M. 2016. Morphometric analysis of phytoliths: recommendations towards standardization from the International Committee for Phytolith Morphometrics // Journal of Archaeological Science, 2016. – № 68. – P. 106–111. https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.03.023

Barbera P., Romero-Zarco C., Aedo C. Taxonomic revision of *Trisetum* section *Sibirica* (Poaceae: *Pooideae: Aveninae*) // Systematic botany, 2017. – Vol. 42, № 4. – P. 1–25. https://doi.org/10.1600/036364417X696564

Barbera P., Romero-Zarco C., Aedo C. Taxonomic revision of *Trisetum* sect. *Trisetum* (Poaceae: *Pooideae: Aveninae*) from Eurasia and North Africa // Annals of the Missouri Botanical Garden, 2018. – Vol. 103, № 3. – P. 350–392. https://doi.org/10.3417/2018067

Ladizinsky G. Studies in Oats Evolution: A Man's Life with *Avena*. – Heidelberg e.a.: Springer, 2012. – 87 p. https://doi.org/10.1017/S0014479712000956

Ladizinsky G., Zohary D. Notes on species delimitation, species relationships and polyploidy in *Avena* L. // Euphytica, 1971. – Vol. 20. – P. 380–395.

Larson G., Piperno D. R., Allaby R. G., Purugganan M. D., Andersson L., Arroyo-Kalin M., Barton L., Vigueira C. C., Denham T., Dobney K., Doust A. N, Gepts P., Gilbert M. T. P., Gremillion K. J., Lucas L., Lukens L., Marshall F. B., Olsen K. M., Pires J. Ch., Richerson P. J., Rubio de Casas R., Sanjur O. I., Thomas M. G., Fuller D. Q. Current perspectives and the future of domestication studies // PNAS, 2014. – Vol. 111, № 17. – P. 6139–6146. https://doi.org/10.1073/pnas.1323964111

Neumann K., Strömberg C., Ball T., Alber R. M., Vrydaghs L., Cummings L. S. International code for phytolith nomenclature (ICPN) 2.0 // Annals of Botany, 2019. – № 124. – P. 189–199. https://doi.org/10.1093/aob/mcz064.

Portillo M., Ball T., Manwaring J. Morphometric analysis of inflorescence phytoliths produced by *Avena sativa* L. and *Avena strigosa* Schreb. // Economic Botany, 2006. – Vol. 60, № 2. – P. 121–129. https://doi.org/10.1663/0013-0001(2006)60[121:MAOIPP]2.0.CO;2

Saarela J. M., Bull R. D., Paradis M. J., Ebata S. N., Peterson P. M., Soreng R. J., Paszko B. Molecular phylogenetics of cool-season grasses in the subtribes *Agrostidinae*, *Anthoxanthinae*, *Aveninae*, *Brizinae*, *Calothecinae*, *Koeleriinae* and *Phalaridinae* (Poaceae, *Pooideae, Poeae, Poeae* chloroplast group 1) // PhytoKeys, 2017. – Vol. 87. – P. 1–139. https://doi.org/10.3897/phytokeys.87.12774

Wang C., Lu H., Zhan J., Mao L., Ge Y. Bulliform phytolith size of rice and its correlation with hydrothermal environment: a preliminary morphological study on species in Southern China // Frontiers in Plant Science, 2019. – Vol. 10. – 1037. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01037

Yost C. L., Michas M. C., Adams K. R., Swarts K., Puseman K., Ball T. An in situ and morphometric study of maize (*Zea mays* L.) cob rondel phytoliths from Southwestern North American landraces. // J. Archaeol. Sci. Reports, 2021. – Vol. 35. – 102732. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102732