

Rewolucja 3D w paleontologii kręgowców

Dawid Drózd¹, Małgorzata Czaja², Rafał Piechowski³



D. Drózd



M. Czaja



R. Piechowski

The 3D revolution in vertebrate palaeontology. *Prz. Geol.*, 74: 143–150; doi: 10.7306/2026.13

Redaktor prowadzący: Dawid Surmik

A b s t r a c t. The rapid development of digital technologies in the 21st century has led to a profound transformation of research methods in vertebrate palaeontology. This paper outlines the evolution of documentation techniques, from descriptive text and hand-drawn illustrations, through analogue and digital photography, to modern three-dimensional imaging methods. Particular emphasis is placed on the role of 3D models generated using photogrammetry, surface scanning, and computed tomography, which enable

precise documentation, remote comparative analyses, anatomical reconstructions, biomechanical simulations, and long-term archiving of palaeontological collections. The application of these methods is illustrated by case studies from the authors' research, including the taxonomic revision of Triassic turtles (notably the description of the new genus *Taichelys*), the identification of enigmatic vertebrate remains (*Saurodesmus robertsoni*), palaeopathological analyses of mesosaurs, and reconstructions of musculature and locomotion in early turtles. The paper also discusses the technological background that enabled the widespread adoption of 3D imaging, as well as challenges related to large data storage and the lack of clear legal regulations governing digital 3D models. In conclusion, 3D techniques have become a cornerstone of modern vertebrate palaeontology, substantially expanding the analytical and interpretative potential of the field, while highlighting the need for further development of infrastructure and standardized frameworks for data storage and sharing.

Keywords: 3D techniques, muscle reconstruction, biomechanics

Powszechnie wiadomo, jak bardzo postęp technologiczny XXI w. zrewolucjonizował sposób prowadzenia badań naukowych. Rozwój komputerów, Internetu, technologii analizy danych oraz sztucznej inteligencji dały badaczom mnóstwo nowych narzędzi, otwierając drzwi do dziedzin, w których jeszcze niedawno jakiegokolwiek badania były nieosiągalne, lub znacząco ułatwiły proces badawczy w istniejących dziedzinach. Takim właśnie narzędziem dla paleontologów zajmujących się kręgowcami jest technologia dokumentacji i wizualizacji 3D, która umożliwia tworzenie realistycznych, trójwymiarowych modeli badanych skamieniałości.

HISTORIA TECHNIK OBRAZOWANIA W PALEONTOLOGII

Dlaczego właśnie to narzędzie zyskało taką popularność? Aby odpowiedzieć na to pytanie, należy prześledzić historię dokumentowania i interpretowania danych w publikacjach paleontologicznych. W artykułach, w których głównym tematem jest opis badanej materii, np. dotyczących anatomii, nowych gatunków czy stanowisk, najważniejszym aspektem jest dokładna dokumentacja studiowanego materiału i umiejscowienie znaleziska w kontekście dotychczasowej wiedzy, np. przez porównanie do innych żyjących i wymarłych form.

Jeśli spojrzymy na publikacje XIX-wiecznych badaczy, takich jak Richard Owen, Thomas Henry Huxley czy Richard Lydekker, zauważymy, że poświęcali oni bardzo

dużo miejsca skrupulatnym, plastycznym opisom słownym, suplementując je odręcznymi szkicami lub rysunkami o wysokich walorach artystycznych (np. Owen, 1861; Huxley, 1877; Lydekker, 1887). Jednak, aby porównać dane znalezisko, badacz często nie miał innego wyjścia, jak tylko zajrzeć do kolekcji porównawczej, którą sam gromadził lub która znajdowała się w zbiorach uczelni, muzeum bądź prywatnych kolekcjonerów.

Kamieniem milowym było rozpowszechnienie się fotografii na początku XX w. Pierwsze fotografie nie były jednak bardzo dobrej jakości (np. praca Ermine'a Case'a z 1922 r.) i były trudne w reprodukcji. Co więcej, początkowo wymagały specyficznych warunków (np. długiego naświetlania, żmudnego wywoływania zdjęć, ich ręcznego przycinania i układania w formę plansz), dlatego wciąż wiodącym sposobem przedstawiania materiału były rysunki.

W XX w. zaczęto też inaczej podchodzić do tego, co powinno znajdować się na rysunku – coraz częściej przedstawiano rekonstrukcje, czyli interpretacje badacza dotyczące tego, jak dana kość wyglądała za życia, a nie faktyczny obraz okazu. Panował też pogląd, że rysunek jest lepszy, ponieważ pozwala uwypuklić szczegóły niewidoczne na fotografii. W drugiej połowie XX w. pogląd ten upowszechnił się na tyle, że mimo coraz większej dostępności aparatów, rysunki publikowano znacznie częściej niż zdjęcia. Te ostanie (jeśli w ogóle były obecne) przedstawiały tylko kluczowe i najbardziej kompletne znaleziska. O mniej istotnych okazach, które zdaniem badaczy nie zasługiwały na osobne plansze, po prostu wspomniano w tekście lub pre-

¹ Niezależny naukowiec, ORCID ID: 0000-0003-2779-6929

² Instytut Nauk Biologicznych, Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego, ul. Kazimierza Wóycickiego 1/3, 01-938 Warszawa; ORCID ID: 0009-0002-1634-4230

³ Zespół ewolucji i anatomii kopalnych czworonogów, Instytut Paleobiologii, Polska Akademia Nauk, ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa; rdpiechowski@twarda.pan.pl; ORCID ID: 0000-0003-2779-6929

zentując rekonstrukcję, wymieniano, na podstawie jakich skamieniałości powstała (np. Walker, 1961; Bonaparte, 1969; Chatterjee, 1978, 1985). Paradoksalnie więc wiele okazów opisywanych w drugiej połowie XX w., a nawet w latach dwutyśnych do dziś nie doczekało się dokumentacji fotograficznej. Z drugiej strony trzeba przyznać, że jakość reprodukcji zdjęć (które w tamtym okresie były głównie czarno białe) często pozostawiała wiele do życzenia i rysunki w wielu przypadkach były bardziej informatywne. Jednak wykonanie dokładnego rysunku zajmuje dużo czasu i wymaga umiejętności plastycznych. Z powodu rosnącej presji na publikowanie coraz większej liczby artykułów badacze zaczęli poświęcać mniej czasu na przygotowanie ilustracji, co spowodowało, że na przestrzeni lat stawały się one coraz bardziej schematyczne. W związku z tym, aby wyrobić sobie opinię i wykonać adekwatne porównania, nadal konieczne były (często dalekie) podróże do kolekcji paleontologicznych, takie jak podróz Alicka Walkera z Newcastle do Stuttgartu w latach 50. XX w., celem zbadania pokrewieństw pomiędzy enigmatycznym wówczas *Aetosaurus ferratus*, a badanym przez niego *Stagonolepis robertsoni* (Walker, 1961). Wizyta pozwoliła mu ustalić, że te dwa gatunki są do siebie podobne i dziś zaliczamy je do tej samej grupy aetozaurów. Podróże do kolekcji paleontologicznych do dziś pozostają istotnym aspektem pracy paleontologów, w szczególności tych zajmujących się kręgowcami.

Wraz z upowszechnieniem aparatów cyfrowych rysunki zaczęły odchodzić na drugi plan. Fotografia cyfrowa oprócz szybkiej dokumentacji umożliwiła, dzięki Internetowi, łatwe dzielenie się danymi z innymi badaczami. To do dziś najczęstszy sposób prezentacji okazów w artykułach. Jednak nawet najlepsza fotografia jako dwuwymiarowy obraz nie zawsze w pełni oddaje charakter materiału, a raz uchwycona na zdjęciu perspektywa nie musi zgadzać się z ustawieniem kadrów w różnych publikacjach, utrudniając porównania. Próba odpowiedzi na to zjawisko były zdjęcia stereograficzne, które jednak jeszcze mocniej utrudniały wykonywanie fotografii i plansz, a ponadto do odczytu wymagały użycia stereoskopu – urządzenia dziś już w zasadzie niedostępnego (Evitt, 2012).

Wszystkie te problemy rozwiązują modele trójwymiarowe, które można obracać, powiększać, mierzyć i zestawiać w celach porównawczych z innymi okazami fizycznie znajdującymi się nawet na drugim końcu świata. Po raz pierwszy w historii paleontologii wyjeżdżający do odległej kolekcji mogą zabrać okazy „do domu” w formie cyfrowej, a jeśli to nie wystarczy – wydrukować je na drukarce 3D. A to tylko początek ich długiej listy zalet. Odpowiednie techniki 3D pozwalają na uzyskanie trójwymiarowych odpowiedników zarówno małych, jak i dużych obiektów. W paleontologii są wykorzystywane do digitalizacji tropów, a nawet całych ścieżek, zbyt dużych, aby było można je zabrać do kolekcji. Tworzenie modeli 3D podczas prac wykopaliskowych pomaga w prowadzeniu dokumentacji terenowej. W przypadku gdy niezbędne jest zniszczenie okazu, np. w celu przeprowadzenia analiz histologicznych, model 3D pozwoli na utrwalenie jego pierwotnego kształtu. Modele 3D uzyskane ze skanów tomograficznych umożliwiają zobaczenie struktur tkwiących w skale, które mogłyby ulec uszkodzeniu w trakcie preparacji mechanicznej lub chemicznej. Takie modele mogą stanowić swoistą „kopię bezpieczeństwa” kolekcji na wypadek kataklizmów, a ich udostępnianie w repozytoriach (np. MorphoSource,

Sketchfab) ułatwia dostęp do materiału i porównania z okazami z całego świata. Co więcej, praca na wirtualnych reprezentacjach delikatnych, małych lub ciężkich i nieporęcznych okazów zapobiega ich przypadkowym uszkodzeniom, może też ułatwiać prowadzenie badań osobom niepełnosprawnym. Modele znacząco ułatwiają wreszcie rekonstrukcje naukowe – można zestawić elementy szkieletu, które fizycznie są zbyt duże lub przechowywane osobno. Modele trójwymiarowe można też poddać symulacjom biomechanicznym i wytrzymałościowym, co bez tej technologii byłoby niemożliwe.

ROZWÓJ TECHNOLOGICZNY

Dlaczego dopiero teraz modele 3D tak się upowszechniły? Ponieważ dopiero teraz upowszechniły się narzędzia służące do ich tworzenia i obróbki. Wyświetlanie w czasie rzeczywistym trójwymiarowego obiektu wymaga ogromnej mocy obliczeniowej. Rozwój ten można prześledzić na przykładzie gier komputerowych – pierwsze modele 3D z końca XX w. były proste i kanciaste, dostosowane do możliwości ówczesnych komputerów. Obecnie zaś standardem jest wyświetlanie złożonych, realistycznych scen.

Rozwój komputerów osobistych oraz rosnący rynek gier, a także rozkwit komputerowych efektów specjalnych w kinematografii spowodowały powstanie i rozwój narzędzi do modelowania 3D, takich jak open *source* Blender, czy MeshLab. Popyt na taką grafikę napędzał też technologie pozwalające szybko tworzyć realistyczne modele rzeczywistych obiektów, które z czasem stały się ogólnodostępne. Przykładem jest program RealityScan do fotogrametrii, dziś darmowy do pobrania w serwisie Epic Games Store.

Duże zapotrzebowanie na technologie obrazowania trójwymiarowego ma też medycyna. To na jej potrzeby powstał pierwszy tomograf komputerowy EMI Scanner z lat 70. ub. w. (Hounsfield, 1977). Rozwój tomografii był ściśle powiązany z rozwojem komputerów, a upowszechnienie skanerów doprowadziło do powstania narzędzi do obróbki danych tomograficznych, dziś powszechnie używanych również przez paleontologów.

Obrazowanie 3D jest także wykorzystywane w inżynierii i produkcji, gdzie stosuje się różne skanery optyczne i laserowe. Dopiero od niedawna instytucje naukowe mogą sobie pozwolić na ich zakup. Ogromne znaczenie miał też rozwój systemów przechowywania danych i tzw. chmury, bez nich istnienie repozytoriów, jak MorphoSource czy SketchFab, byłoby niemożliwe.

NAJCZĘŚCIEJ STOSOWANE TECHNIKI 3D

Badane okazy kopalne są cyfryzowane przy użyciu nowoczesnych technik trójwymiarowych: fotogrametrii, skanowania powierzchniowego 3D oraz tomografii komputerowej. Metody te pozwalają tworzyć dokładne modele cyfrowe, które wiernie odwzorowują kształt i wygląd skamieniałości, a jednocześnie umożliwiają ich dalsze badania bez konieczności fizycznego kontaktu z oryginałem.

Fotogrametria (ryc. 1B), oparta na serii zdjęć wykonywanych z różnych stron, pozwala uzyskać bardzo szczegółowe modele o wysokiej jakości odwzorowania powierzchni i kolorów, choć wymaga więcej czasu. Z kolei skanowanie 3D (ryc. 1A) jest szybsze i sprawdza się zwłaszcza w przypadku większych lub trudniej dostępnych okazów. Wybór



Ryc. 1. Popularne metody pozyskiwania modeli 3D. **A** – skanowanie powierzchniowe, na zdjęciu R. Piechowski używający skanera powierzchniowego Shining 3D; **B** – fotogrametria z wykorzystaniem stolika obrotowego i statywu (na fot. G. Czaja); **C** – zrzut ekranu z programu Agisoft Metashape do fotogrametrii przedstawiający zestawienie zdjęć po wykonaniu fotogrametrii z wykorzystaniem stolika obrotowego. Zdjęcia wykonano w grudniu 2025 r. podczas wizyty w kolekcji Instytutu Paleontologii Kęrgowców i Paleantropologii Chińskiej Akademii Nauk w Pekinie

Fig. 1. Common methods of acquiring 3D models. **A** – surface scanning, the photograph shows R. Piechowski using a Shining 3D surface scanner; **B** – photogrammetry using a turntable and a tripod (in the photo is G. Czaja); **C** – screenshot from Agisoft Metashape (programme for obtaining models via photogrammetry) showing the aligned set of pictures after performing photogrammetry using a turntable and a tripod. The photographs were taken in December 2025 during a visit to the collection of the Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing

metody zależy od rodzaju i liczby badanych obiektów, jednak w praktyce obie techniki dają porównywalnie dobre rezultaty.

Gotowe modele 3D są skalowane do rzeczywistych rozmiarów i opracowywane w specjalistycznym oprogramowaniu (ryc. 1C), a następnie udostępniane w otwartych repozytoriach cyfrowych. Dzięki temu cenne okazy kopalne stają się dostępne dla naukowców i pasjonatów na całym świecie, a jednocześnie ich cyfrowe kopie są zabezpieczeniem na wypadek zniszczenia prawdziwego okazu.

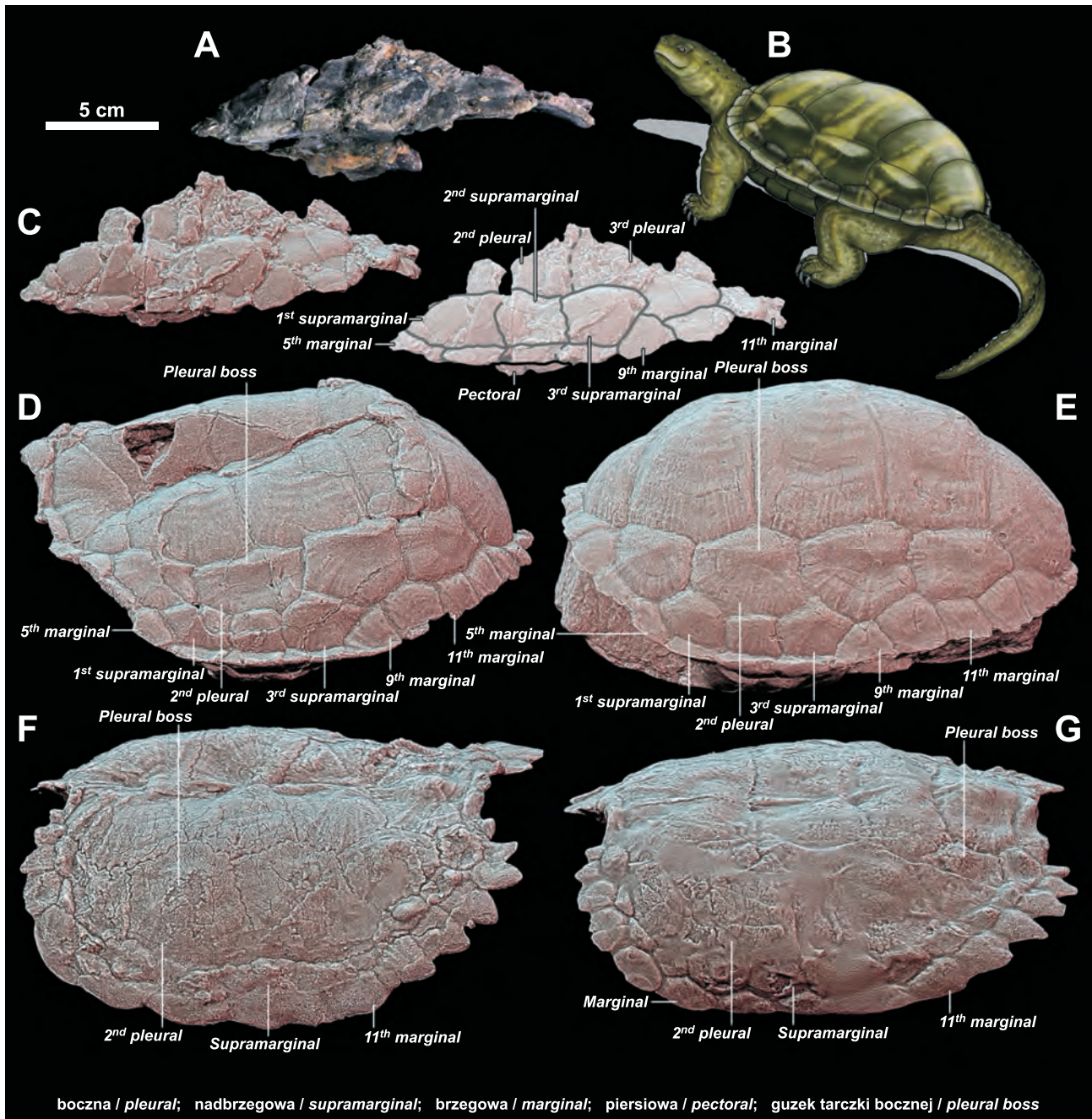
Tomografia komputerowa (TK) umożliwia nieinwazyjne badanie wnętrza skamieniałości bez ich uszkodzenia. Pozwala na uzyskanie trójwymiarowych obrazów struktur wewnętrznych, takich jak kości, zęby czy jamy czaszkowe, które są niedostępne przy użyciu tradycyjnych metod. Technika ta jest szczególnie przydatna w analizie czaszek, rekonstrukcji jamy mózgowej oraz badaniach rozwojowych wymarłych organizmów. W paleontologii stosuje się zarówno tomografię medyczną, jak i mikrotomografię komputerową (micro-CT), zapewniającą bardzo wysoką rozdzielczość, zwłaszcza w badaniach drobnych skamieniałości. Mimo pewnych ograniczeń technicznych i kosztów, tomografia komputerowa znacząco poszerza możliwości badawcze paleontologii i stanowi jedno z kluczowych narzędzi w analizie materiału kopalnego.

PRZYKŁADY PRAC NASZEGO ZESPÓŁU Z ZASTOSOWANIEM TECHNIK 3D

Taichelys

W ramach grantu dr. Tomasza Szczygielskiego zajmujemy się rewizją różnych opisanych gatunków żółwi triasowych. Dzięki zastosowaniu technik 3D zidentyfikowaliśmy nowy rodzaj żółwia triasowego z Tajlandii – *Taichelys ruchae* (Szczygielski i in., 2025; ryc. 2). Początkowo, w latach 80. XX w., żółw ten został przez francuską paleontolog France de Broin przypisany do rodzaju *Proganochelys* (Broin, 1984). Materiał jest jednak bardzo fragmentaryczny, a w czasach powstawania pierwotnej publikacji znanych było znacznie mniej triasowych żółwi. Nie odkryto jeszcze m.in. żółwia z Polski – *Proterochersis porebensis*, a jego niemiecki krewniak – *Proterochersis robusta*, był bardzo słabo poznany. Konieczna była więc rewizja.

W tym celu jeden z autorów (D. Drózd) wybrał się do kolekcji paleontologicznej Muzeum Sirindhorn w Tajlandii, gdzie obejrzał okazy i sporządził ich modele 3D. Po powrocie do Polski przekazał modele dr. Tomaszowi Szczygielskiemu, który kontynuował badania nad żółwiami z Tajlandii. Bazując na modelach oraz obszernej danych porównawczych z innych kolekcji triasowych zawierających triasowe



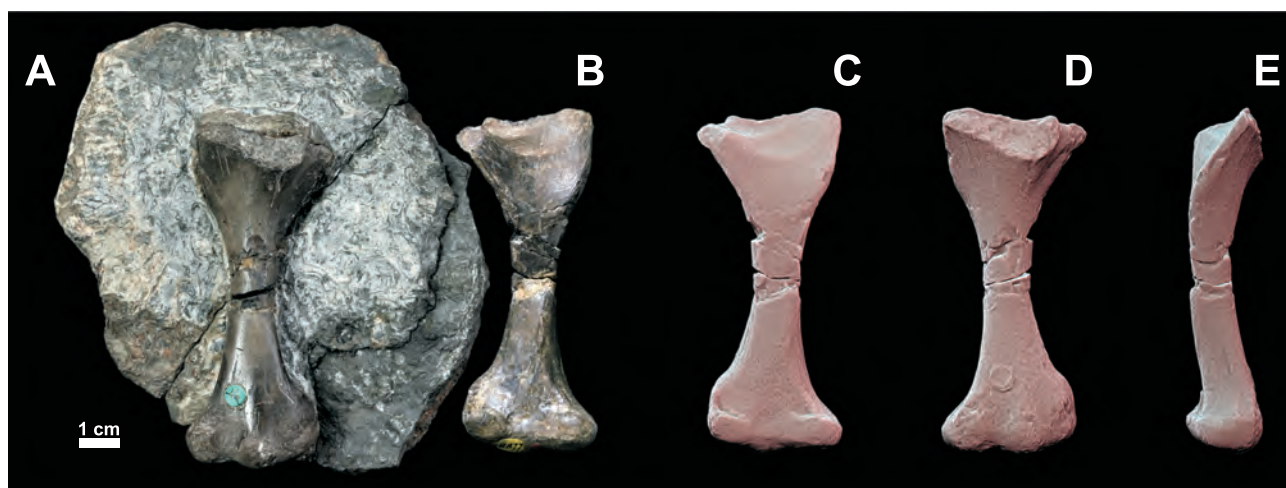
Ryc. 2. *Taichelys ruchae*, nowy rodzaj kopalnego żółwia z Tajlandii. **A–C** – *Taichelys ruchae*: **A** – fotografia najbardziej informatywnego okazu SM2017-1-124, **B** – rekonstrukcja artystyczna autorstwa Sity Manikooka, **C** – widok boczny okazu SM2017-1-124 z ilustracją opisową po prawej stronie; **D–G** – porównanie morfologii karapaksu u triasowych żółwi (lewa strona, widok w przybliżeniu prostopadły do powierzchni nadbrzegowej, część przednia skierowana w lewo, przeskalowane do zbliżonej długości pancerza): **D** – *Proterochersis porebensis* ZPAL V. 39/48 (holotyp), **E** – *Proterochersis robusta* SMNS 17561, **F** – *Proganochelys quenstedtii* MB.1910.45.2, **G** – *Proganochelys quenstedtii* SMNS 16980; obrazy modeli 3D przedstawiono z włączonym shaderem Radiance Scaling (Lit Sphere) w celu uwydatnienia detali geometrycznych. Zmodyfikowano na podstawie Szczygielskiego i in. (2025)

Fig. 2. *Taichelys ruchae* the new genus of fossil turtle from Thailand. **A–C** – *Taichelys ruchae*: **A** – photo of the most informative specimen SM2017-1-124, **B** – artistic reconstruction by Sita Manikoon, **C** – lateral view of the SM2017-1-124 with descriptive picture on the right; **D–G** – comparison of carapace morphology in Triassic turtles (left side, view approximately perpendicular to the supramarginal surface, anterior towards the left, scaled to roughly the same shell length): **D** – *Proterochersis porebensis* ZPAL V. 39/48 (holotype), **E** – *Proterochersis robusta* SMNS 17561, **F** – *Proganochelys quenstedtii* MB.1910.45.2, **G** – *Proganochelys quenstedtii* SMNS 16980, pictures of the 3D models presented with the Radiance Scaling (Lit Sphere) shader enabled to enhance the geometric detail. Modified from Szczygielski et al. (2025)

żółwie, doszliśmy do wniosku, że ten gatunek nie należy do rodzaju *Proganochelys*, lecz do grupy Proterochersidae – tej samej, do której należą gatunki z Polski i Niemiec. Przy czym dr T. Szczygielski, który jest inspiratorem badań nigy na żywo nie widział okazów z Tajlandii.

Saurodesmus

W ramach naszych badań, dzięki technikom 3D, udało się również ustalić przynależność taksonomiczną enigmatycznego triasowego okazu kości ze Szkocji opisywanej



Ryc. 3. *Saurodesmus robertsoni* NHMUK PV OR 28877 ze Szkocji, prawa kość udowa triasowego cynodonta. Fotografie okazu: **A** – widok od przodu wraz z fragmentem skały, w której okaz był znaleziony, **B** – widok od tyłu; model 3D: **C** – widok od tyłu, **D** – od przodu, **E** – od zewnętrznego boku; zrzuty ekranu wykonane z włączonym shaderem Radiance Scaling (Lit Sphere) w celu uwydatnienia detali geometrycznych. Zmodyfikowano na podstawie Szczygielskiego i in. (2024)

Fig. 3. *Saurodesmus robertsoni* NHMUK PV OR 28877 from Scotland, right femur of the Triassic cynodont. Photograph of the specimen: **A** – in anterior view with surrounding sediment, **B** – in posterior view; 3D model in: **C** – posterior, **D** – anterior, **E** – lateral view, presented with the Radiance Scaling (Lit Sphere) shader enabled to enhance the geometric detail. Modified from Szczygielski et al. (2024)

jako *Saurodesmus robertsoni*, która na przestrzeni prawie dwustu lat była przypisywana do przedstawicieli niemal wszystkich głównych gałęzi drzewa filogenetycznego kręgowców. Okazało się, że to kość udowa eucynodonta – praprzodka ssaków (Szczygielski i in., 2024; ryc. 3).

Historia tej identyfikacji jest skomplikowana i również zaczyna się od badań nad żółwiami. Kość była wielokrotnie uznawana za należącą do przedstawiciela tej grupy – innych szczątków triasowych żółwi z Wielkiej Brytanii jednak nigdy nie opisano. Dr T. Szczygielski (inicjator prac nad tym projektem) znalazł szkice z XIX-wiecznych publikacji i odwiedzając kolekcję Muzeum Historii Naturalnej w Londynie, wykonał nowe zdjęcia okazu. Na ich podstawie mógł jednak jedynie odrzucić hipotezę o żółwiowym pochodzeniu kości i dalsze badania odłożył na później.

W związku z realizacją grantu Narodowego Centrum Nauki dr T. Szczygielski postanowił wrócić do tematu. Zbieg okoliczności sprawił, że zaprzyjaźniony paleontolog Marc van de Brandt z RPA był akurat w Londynie i odwiedził kolekcję Muzeum Historii Naturalnej. Mógł więc wykonać zdjęcia kości *Saurodesmus robertsoni* do fotogrametrii. Został więc zaproszony do projektu i przesłał zdjęcia drogą elektroniczną. Na podstawie zrobionych przez niego zdjęć stworzyliśmy model 3D kości *Saurodesmus*. Porównując go do licznych zdjęć i modeli 3D okazów z całego świata (m.in. z Anglii, Argentyny, Brazylii, Chin, Niemiec, Polski, RPA i USA), które zostały pozyskane bezpośrednio przez nas lub udostępnione zdalnie przez badaczy i kuratorów różnych kolekcji zagranicznych, udało się nam definitywnie wykluczyć żółwie oraz inne proponowane dotąd grupy. Ostateczną diagnozę pomógł nam sformułować specjalista od cynodontów, dr Leonardo Gaetano z Brazylii, również posługując się jedynie modelem 3D.

Mezozaur

Inny przykład zastosowania modeli 3D, tym razem z tomografii komputerowej, dotyczy patologicznego kręgosłupa mezozaura *Stereosternum tumidum*, znajdującego

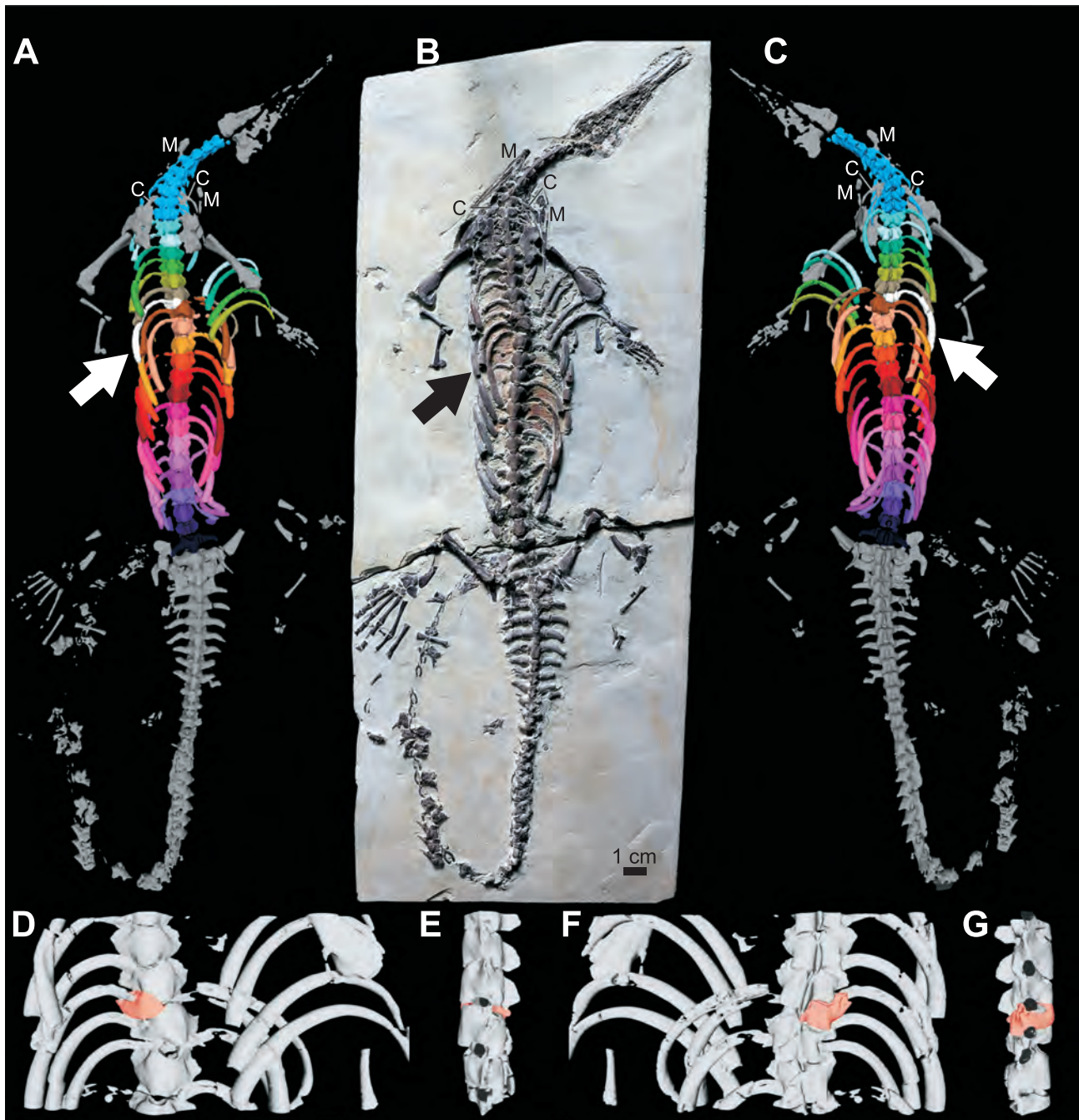
się w kolekcji Instytutu Paleobiologii PAN w Warszawie. Dr Tomasz Szczygielski, dr Dawid Surmik, prof. Bruce Rothschild i Agnieszka Kapuścińska opublikowali pracę, w której zdiagnozowali zmianę patologiczną kręgosłupa tego zwierzęcia – wrodzoną skoliozę (Szczygielski i in., 2017). Praca zawierała zdjęcia oraz rysunki i początkowo spotkała się ze sceptycznym przyjęciem. Aby uzyskać pewniejsze dane, wykonaliśmy skany tomograficzne, które po segmentacji i wygenerowaniu modelu 3D jednoznacznie ukazały patologiczne kręgi i dodatkowe żebro (Szczygielski i in., 2019; ryc. 4).

Proganochelys – rekonstrukcja mięśni i lokomocji

Modele 3D wykorzystujemy także do rekonstrukcji układu mięśniowego i sposobu poruszania się triasowych żółwi. Zainspirowała nas praca o *Orobates pabsti*, w której dzięki skanom tomograficznym, tropom i symulacjom komputerowym odtworzono sposób lokomocji tego bardzo prymitywnego owodniowca (Nyakatura i in., 2019).

We współpracy z naukowcami z Wielkiej Brytanii prof. Johnem Hutchinsonem i Junedem Zariwalą stworzyliśmy trójwymiarowy model szkieletu wymarłego triasowego żółwia *Proganochelys*, wykorzystując skany powierzchniowe i fotogrametrię; głównie na podstawie materiałów Muzeum Historii Naturalnej w Stuttgarcie. Wirtualnie zestawiliśmy elementy, przygotowując model do symulacji ruchu (ryc. 5A). Kolejnym etapem będzie rekonstrukcja 3D mięśni. Wstępne wyniki naszej prac były prezentowane na międzynarodowych konferencjach EAVP w Krakowie i SVP w Birmingham (ryc. 5A, B).

Wcześniej, na podstawie analizy przyczepów mięśniowych na kościach i w oparciu o modele 3D udało się zrekonstruować układ mięśniowy kończyn *Proganochelys* (RP; ryc. 5B). Obszerna publikacja naukowa z ilustracjami w stylu atlasu anatomicznego jest w ostatniej fazie przygotowań. Rekonstrukcje objętościowe mięśni u wymarłych taksonów są rzadkie i zwykle dotyczą jedynie mięśni żuchwy. Lokomocja najwcześniejszych żółwi nie została

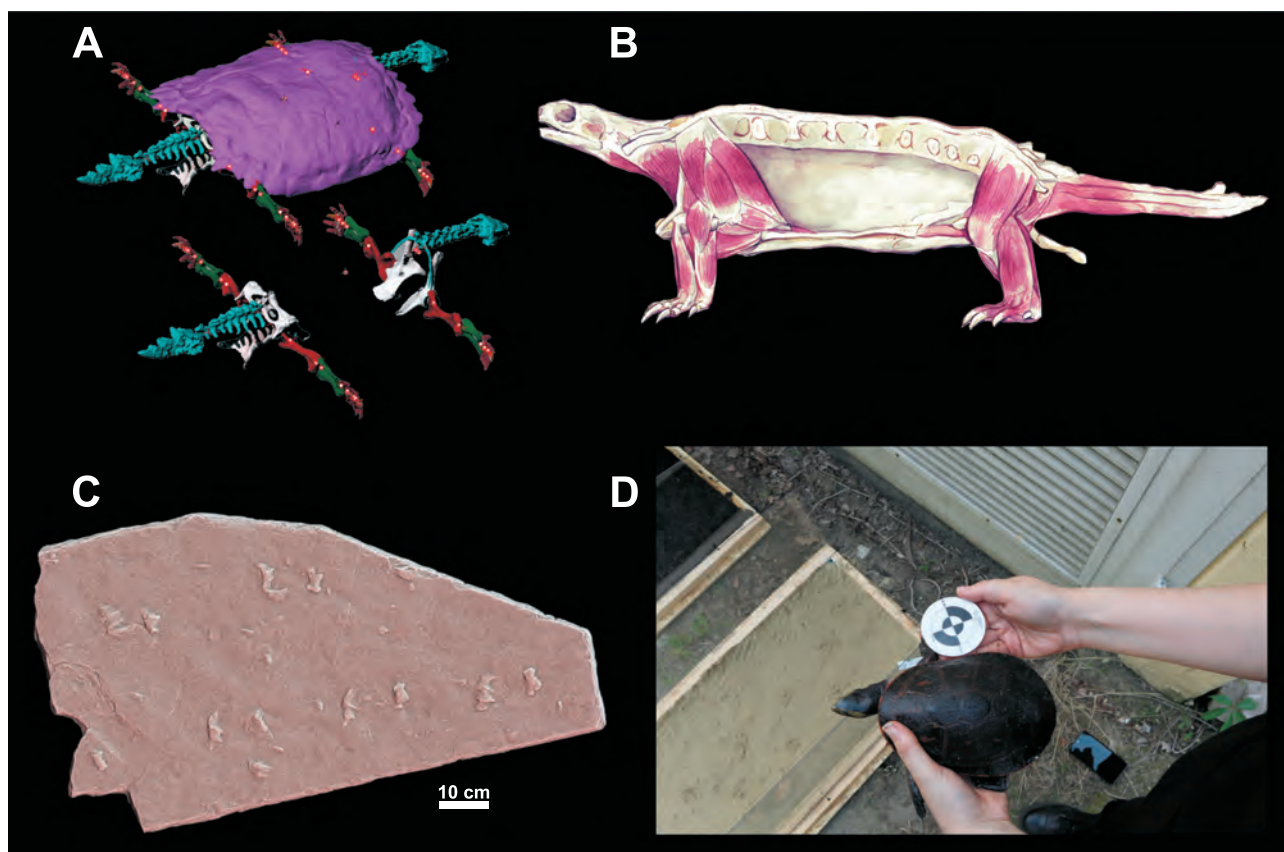


Ryc. 4. Okaz mezozaura ZPAL R VII/1 z wrodzoną skoliozą. **A–C** – widok całego okazu: **A** – model 3D wygenerowany na podstawie skanu tomograficznego w widoku brzuszny, **B** – zdjęcie tak jak fizycznie jest zachowany, w widoku brzuszny, **C** – model 3D w widoku grzbietowym, od strony, której nie widać. Strzałki wskazują położenie patologicznego kręgu i żebra. Wszystkie zachowane kręgi szyjne i żebra oznaczono tym samym odcieniem niebieskiego, każdy z kręgów grzbietowych i odpowiadających im żeber zaznaczono odrębnym kolorem, natomiast patologiczny krąg oraz związane z nim żebro oznaczono kolorem białym; **D–G** – patologiczny obszar kręgosłupa przedstawiony jako model 3D z wyróżnionym patologicznym kręgiem: **D** – w widoku brzuszny, zgodnie z jego fizyczną ekspozycją w okazie, **E** – w widoku bocznym lewym, **F** – grzbietowym, **G** – bocznym prawym. Objasnienia: C – obojczyk, M – zuchwa. Zmodyfikowano na podstawie Szczygielskiego i in. (2019)

Fig. 4. Mesosaur specimen ZPAL R VII/1 with congenital scoliosis. **A–C** – entire specimen: **A** – 3D model of the specimen, generated from the tomographic scan in ventral view, **B** – photo of the specimen in ventral view as it is physically preserved, **C** – 3D model in dorsal view, the side that is not visible in the specimen. The arrows indicate position of the pathological vertebra. All preserved cervical vertebrae and ribs coloured using the same shade of blue, each of the dorsal vertebrae and their respective ribs coloured using separate hue, the pathological vertebra and the associated rib coloured white; **D–G** – pathological region of the vertebral column in 3D surface render with highlighted hemivertebra: **D** – in ventral view, as physically exposed in the specimen, **E** – lateral left view, **F** – dorsal view, **G** – lateral right view. Explanations: C – clavicle, M – mandible. Modified from Szczygielski et al. (2019)

dotąd rygorystycznie zbadana, a różnice w obręczy barkowej, kościach kończyn i prawdopodobnym układzie mięśniowym sugerują, że ich sposób poruszania mógł być inny niż dotychczas zakładano.

Planujemy również porównać kopalne tropy ichtnotaksonu *Chelonipus*, tradycyjnie interpretowane jako pozostawione przez żółwie, z tropami współczesnych gatunków (ryc. 5C). W tym celu stworzyliśmy specjalne tory, po któ-



Ryc. 5. Badania nad lokomocją triasowych żółwi. **A** – model *Proganochelys quenstedtii* w programie Rhinoceros, stanowiący etap początkowy rekonstrukcji mięśni i ruchu; **B** – rekonstrukcja artystyczna obręczy oraz mięśni kończyn u *Proganochelys quenstedtii*, rekonstrukcja autorstwa R. Piechowski, akwarela: G. Czaja; **C** – holotyp ichnogatunku *Chelonipus pliningeri* SMNS 19107, przypisywany żółwiom; **D** – mały żółw z rodzaju *Emydura* (Pleurodira), mierzony po próbie przejścia przez przygotowane tory, lato 2025 r., ZOO w Płocku

Fig. 5. Studies on the locomotion of Triassic turtles. **A** – a *Proganochelys quenstedtii* model created in Rhinoceros software, representing the initial stage of muscle and movement reconstruction; **B** – artistic reconstruction of the girdles and limb musculature of *Proganochelys quenstedtii*, reconstruction by R. Piechowski; watercolour by G. Czaja; **C** – holotype of the ichnospecies *Chelonipus pliningeri* SMNS 19107, attributed to turtles; **D** – little turtle of the genus *Emydura* (Pleurodira), measured after an attempt to traverse prepared tracks, summer 2025, Płock ZOO

rych żółwie mogły się poruszać, przy okazji zostawiając odciski stóp i tworząc ścieżki (ryc. 5D). Choć żółwie z ZOO w Płocku nie zawsze chciały współpracować, wyniki wstępne sugerują, że *Chelonipus* przypomina bardziej tropy żółwi wodnych niż lądowych.

PROBLEMY ZWIĄZANE Z TECHNIKAMI 3D

Badania z wykorzystaniem technik 3D otwierają nowe możliwości, jednak niosą też wyzwania. Generowanie modeli z fotogrametrii lub danych tomograficznych wiąże się z ogromną ilością danych źródłowych. Jedna seria zdjęć do fotogrametrii może zajmować kilka gigabajtów, a uzyskane modele – setki megabajtów. Podobnie jest ze skanami tomograficznymi. Materiały zebrane przez nasz zespół na przestrzeni niecałych dziesięciu lat aktywności obejmują już kilka tysięcy modeli 3D i setki tysięcy zdjęć – łącznie kilkanaście terabajtów.

Repozytoria nie są w stanie magazynować tak dużych zasobów, a przechowywanie danych na nośnikach zewnętrznych grozi ich utratą. Utrzymanie serwerów wiąże się z kosztami, na które instytucje naukowe często nie mogą sobie pozwolić. Rozwiązaniem mogłoby być stworzenie ogólnokrajowych lub ogólnoeuropejskich platform z dużą

przestrzenią dyskową dla instytucji naukowych. Bardzo korzystny byłby system raportowania danych, indeksowania ich, wyszukiwania i współdzielenia. Wirtualne zbiory stanowiące odpowiednik dużej kolekcji muzealnej mogłyby stanowić nieoceniony materiał porównawczy i pomagać w optymalizacji wydatków w ramach projektów badawczych, choćby przez ograniczanie redundantnych wyjazdów badawczych mających na celu dokumentację już zdigitalizowanych skamieniałości. Byłoby to rozwiązanie atrakcyjne z punktu widzenia niedofinansowanych jednostek naukowych, a zwłaszcza młodych badaczy.

Innym problemem jest brak regulacji prawnych dotyczących modeli 3D. Z obawy o bezpieczeństwo i nieuprawnione wykorzystanie instytucje niechętnie udostępniają swoje dane. Rozwiązaniem mogłoby być traktowanie korzystania z modeli 3D jako cytowania – z korzyścią zarówno dla autorów, jak i instytucji.

PODSUMOWANIE

Techniki 3D zrewolucjonizowały paleontologię kręgowców w ciągu ostatnich dwóch dekad. Dzięki upowszechnieniu narzędzi do generowania i obróbki modeli stały się one codziennością pracy paleontologów, otwierając nowe

możliwości dokumentacji i badań oraz umożliwiając rozwój dziedzin takich jak biomechanika. Mamy nadzieję, że trudności związane z dostępnością modeli i przechowywaniem danych uda się w najbliższych latach rozwiązać.

Dziękujemy: Recenzentowi za cenne uwagi i wskazówki, które wpłynęły na ostateczną formę artykułu, naszym współpracownikom Johnowi Hutchinsonowi i Junedowi Zariwala oraz Wiktorii Wieliczko, Przemysławowi Świsiovi i pracownikom Ogrodu Zoologicznego w Płocku, Piotrowi Ceryngierowi za uwagi do artykułu. Szczególne podziękowania kierujemy do Tomasza Szczygielskiego – naszego *spiritus movens*. Źródło finansowania: NCN 2020/39/B/NZ8/01074.

LITERATURA

- BONAPARTE J.F. 1969 – Dos nuevas “faunas” de reptiles triásicos de Argentina. 1st International IUGS Symposium of Gondwana: 283–306.
- BROIN F.D.L. 1984 – *Proganochelys rucha* n.sp., Chélonien du Trias supérieur de Thaïlande. *Geologica Salmantica*, 1: 87–97.
- CASE E.C. 1922 – New reptiles and stegocephalians from the Upper Triassic of western Texas. Carnegie Institution of Washington, Washington, No 321.
- CHATTERJEE S. 1978 – A primitive parasuchid (phytosaur) reptile from the Upper Triassic Maleri formation of India. *Palaeontology*, 21 (1): 83–127.
- CHATTERJEE S. 1985 – Postosuchus, a new Thecodontian reptile from the Triassic of Texas and the origin of Tyrannosaurs. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 309 (1139): 395–460.
- EVITT W.R. 2012 – Stereophotography as a tool of the paleontologist. *Journal of Paleontology*, 23 (5): 566–570, Sep., 1949; <https://www.jstor.org/stable/1299485>
- HOUNSFIELD G.N. 1977 – The E.M.I. scanner. *Proceedings of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 195 (1119): 281–289.
- HUXLEY T.H. 1877 – The crocodilian remains found in the Elgin Sandstones, with remarks on the ichnites of Cummington. HM Stationery Office, London, Vol. 1.
- LYDEKKER R. 1887 – The fossil Vertebrata of India. *Records of the Geological Survey of India*, 20: 51–80.
- NYAKATURA J.A., MELO K., HORVAT T., KARAKASILIOTIS K., VIVIAN R., FISCHER M.S., IJSPEERT A.J. 2019 – Reverse Engineering the Locomotion of a Stem Amniote. *Nature*, 565: 351–355.
- OWEN R. 1861 – Palaeontology or systematic summary of extinct animals and their geological relations. Second edition. Adam and Charles Black, Edinburgh.
- SZCZYGIELSKI T., DRÓŹDŹ D., CHANTHASIT P., MANITKOON S., DITBANJONG P. 2025 – The Triassic turtle of Thailand – revision of ‘*Proganochelys rucha*’. *PLoS ONE*, 20 (3), e0316338.
- SZCZYGIELSKI T., DRÓŹDŹ D., SURMIK D., KAPUŚCIŃSKA A., ROTHSCHILD B.M. 2019 – New tomographic contribution to characterizing mesosaurid congenital scoliosis. *PLoS ONE*, 14 (2), e0212416.
- SZCZYGIELSKI T., SURMIK D., KAPUŚCIŃSKA A., ROTHSCHILD B.M. 2017 – The oldest record of aquatic amniote congenital scoliosis. *PLoS ONE*, 12 (9), e0185338.
- SZCZYGIELSKI T., VAN DEN BRANDT M.J., GAETANO L., DRÓŹDŹ D. 2024 – *Sauromesomus robertsoni* Seeley 1891 – The oldest Scottish cynodont. *PLoS ONE*, 19 (5), e0303973.
- WALKER A.D. 1961 – Triassic reptiles from the Elgin area: Stagonolepis, Dasygnathus and their allies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 244 (709): 103–204.

Praca wpłynęła do redakcji 6.11.2025 r.
Akceptowano do druku 6.02.2026 r.