

Adam WALANUS^a, Michał KOKOWSKI^b

^a Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; www.adamwalanus.pl; walanus@geol.agh.edu.pl

^b Zakład Historii Nauk Ścisłych, Przyrodniczych i Techniki, Instytut Historii Nauki im. Ludwika i Aleksandra Birkenmajerów PAN; Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych; www.cyfronet.pl/~n1kokows/index.html; michal.kokowski@gmail.com

Możliwość wykorzystania radiowęglowej metody datowania w badaniach grobu Mikołaja Kopernika¹

Streszczenie

Rozpatrzono potencjalną przydatność metody radiowęglowej do datowania grobu Mikołaja Kopernika, którego wiek w zasadzie wykracza poza zakres metody służącej raczej archeologii niż historii. Krytycznym elementem w tym wypadku jest tzw. krzywa kalibracyjna, której kształt uniemożliwia odróżnienie niektórych „dat”. Podano diagram wskazujący na wiek próbek, jakie można odróżnić metodą ¹⁴C.

Słowa kluczowe: radiowęgiel, ¹⁴C, datowanie bezwzględne, krzywa kalibracyjna, datowanie domniemanego grobu Mikołaja Kopernika.

1. Wstęp

Jak wynika z publikacji zespołu prof. Jerzego Gąssowskiego (zob. np. Gąssowski 2005; Gąssowski (red.) 2005; Gąssowski (red.) 2008), w poszukiwaniach grobu i samych szczątków Mikołaja Kopernika przy ołtarzu św. Krzyża archikatedry fromborskiej nie zastosowano radiowęglowej metody datowania. Dlatego w tym artykule przypominamy podstawowe informacje na temat tej metody i wskazujemy pewne możliwości jej zastosowania w konkretnym przypadku badań grobu Mikołaja Kopernika.

¹ Recenzent artykułu: prof. dr hab. inż. Marek Krąpiec (Pracownia Dendrochronologii i Malakologii, Katedra Analiz Środowiskowych, Kartografii i Geologii Gospodarczej, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków).

2. Sformułowanie problemu: przydatność wyników datowania za pomocą izotopu węgla ^{14}C

Radiowęglowa metoda datowania, bazująca na izotopie węgla ^{14}C , jest szeroko wykorzystywana w archeologii, gdzie służy do „datowania” próbek o wieku do ok. 50 tys. lat. Wynikiem datowania jest zakres wieku taki, że rzeczywisty (prawdziwy) wiek badanego obiektu mieści się w podawanym zakresie z zadaniem prawdopodobieństwem, wynoszącym 0,95 lub, zależnie od epistemologicznych preferencji badacza, 0,68 (liczby te wynikają, odpowiednio, z zakresu $\pm 2\sigma$ i $\pm 1\sigma$ rozkładu normalnego, gdzie σ to odchylenie standardowe).

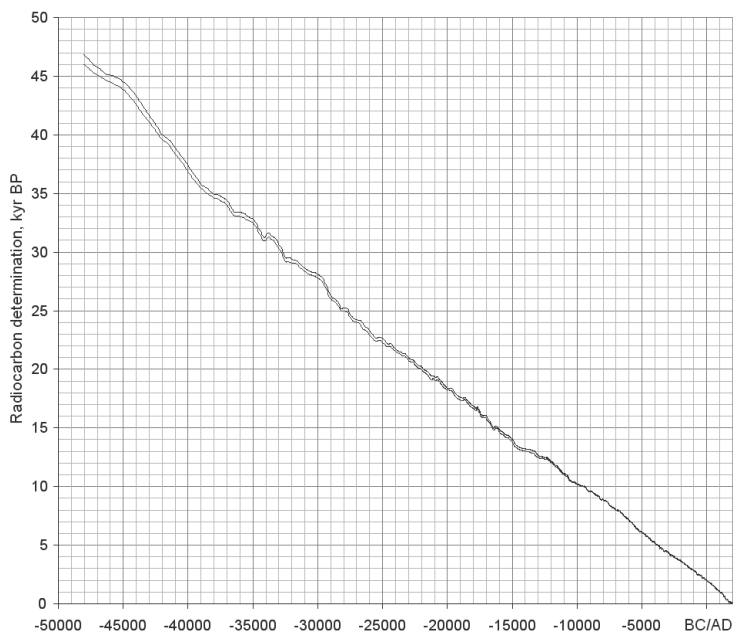
Podkreślić trzeba w tym kontekście, że dla okresu historycznego niezbyt odległego od czasów współczesnych (ostatnie 500 lat) metoda ta jest mniej użyteczna niż dla czasów odległych, z powodu względnie dużej niepewności pomiarowej, czyli szerokości wspomnianego przedziału wieku. O ile na przykład data 7060BC–6750BC jest akceptowalna i może wносить wiele informacji w badaniach archeologicznych, to historyczna data 1490AD–1650AD może być przydatna jedynie w jakiejś ekstremalnej sytuacji zupełnego braku wiedzy *a priori* o obiekcie. Niemniej jednak metoda ^{14}C wykorzystywana jest do datowania obiektów historycznych. Trzeba więc bardziej szczegółowo przeanalizować dokładność tej metody pomiarowej.

3. Krzywa kalibracyjna

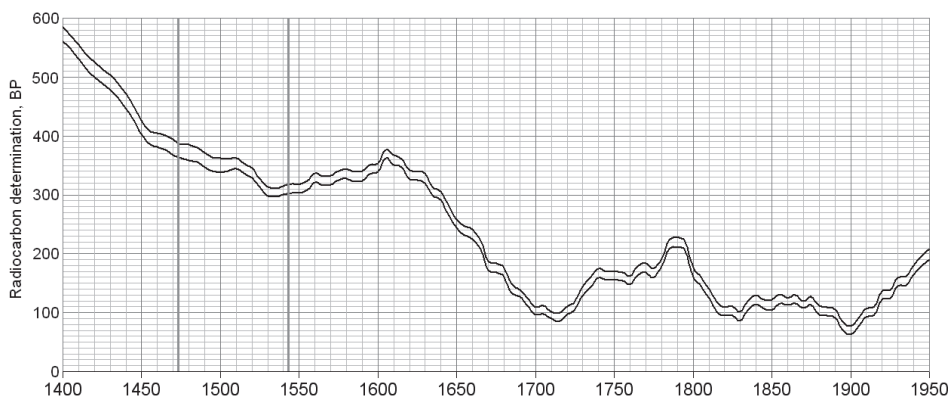
Metoda radiowęglowa jest silnie zależna od tzw. kalibracji. Mianowicie, z przyrodniczego faktu, że koncentracja ^{14}C w atmosferze w przeszłości nie była dokładnie stała, wynika konieczność stosowania w procedurze pomiarowej tzw. krzywej kalibracyjnej (ryc. 1), która otrzymywana jest dzięki przeprowadzeniu pomiarów tysięcy próbek o wieku znanym skądinąd, np. z dendrochronologii (Reimer *et al.* 2009). Dzięki temu metoda ta jest zasadniczo wolna od tzw. systematycznego błędu przesunięcia – pewne niuanse tego problemu zauważył Adam Walanus (2009).

Na ryc. 2 zamieszczony jest fragment krzywej kalibracyjnej dotyczący ostatnich sześciuset lat. Na tym powiększonym wykresie łatwo wytłumaczyć „działanie” kalibracji.

Na pionowej osi podany jest wynik pomiaru koncentracji ^{14}C w próbce. Jak każdy typowy wynik pomiaru podlega on normalnemu rozkładowi prawdopodobieństwa (widocznemu na ryc. 3). Typowym wynikiem może być pokazana na górnym wykresie „data” radiowęglowa 500 ± 30 lat BP (lat radiowęglowych *before present*). W zapisie tym 500 lat BP to właśnie tzw. data radiowęglowa,

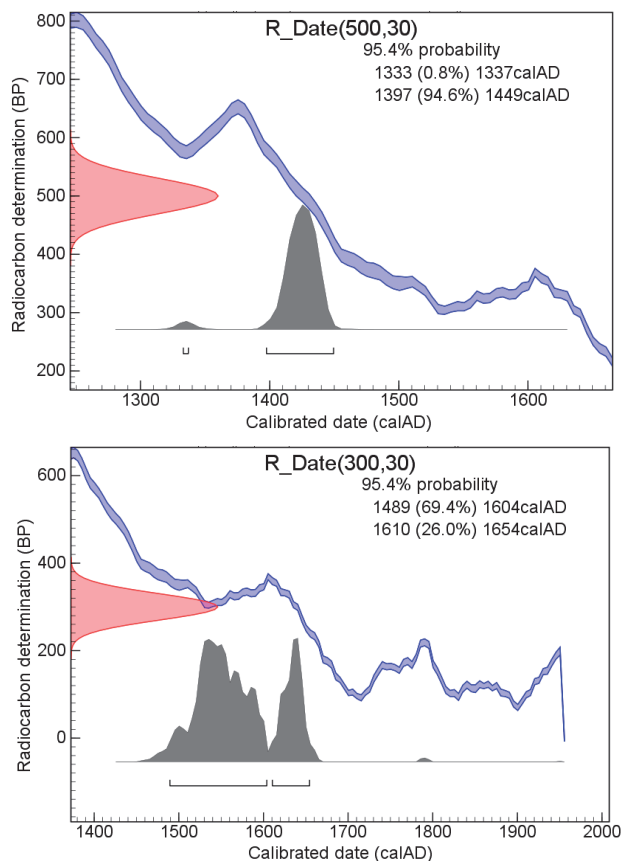


Ryc. 1. Krzywa kalibracyjna radiowęglowej metody datowania (IntCal09). Linia ma załamania ze względu na niestabilność szybkości produkcji ^{14}C , a także zmienność szybkości wymiany węgla między atmosferą i oceanem światowym. Na osi poziomej jest wiek w latach, na osi pionowej natomiast względna koncentracja radiowęglą w próbce wyrażona w tzw. latach radiowęglowych (właściwie w tysiącach lat, skrót BP oznacza *before present*, gdzie *present* to rok 1950AD)



Ryc. 2. Fragment radiowęglowej krzywej kalibracyjnej odpowiadający omawianemu tematowi. Dwie linie ilustrują ograniczoną dokładność krzywej. Ponieważ, ponadto, typowa niepewność pomiarowa w metodzie radiowęglowej wynosi 30–50 lat BP, odróżnić można takie daty historyczne, dla których *radiocarbon determination* różni się co najmniej o 60–100 lat BP. Zaznaczone są daty urodzin i śmierci Kopernika. Osie wykresu jak na poprzednim rysunku

albo lepiej *radiocarbon determination*. Natomiast wartość 30 lat to niepewność pomiarowa. Wielkość błędu pomiarowego charakteryzuje w jakimś sensie jakość pomiaru – za osiągnięcie małej niepewności pomiarowej trzeba więcej zapłacić, gdyż wymaga to dłuższego pomiaru. Wartości błędu 20, 30 lat otrzymać można na specjalne zamówienie. Typową wartością jest ± 40 lat lub nieco więcej, w przedziale wieku do 10 tys. lat.



Ryc. 3. Dwa przykłady wyników datowania metodą radiowęglową, w pełnej formie. Surowy wynik pomiaru, czyli tzw. data radiowęglowa, podany jest u góry każdego wykresu i wynosi odpowiednio 500±30 lat BP i 300±30 lat BP. Ten wynik, ilustrowany przez krzywą Gaussa, na osi pionowej transformowany jest poprzez krzywą kalibracyjną do postaci skomplikowanej krzywej umieszczanej na osi wieku historycznego, stanowiącej końcowy wynik datowania. Podaje się też zakresy wieku odpowiadające różnym prawdopodobieństwom (poziomom ufności) zawierania rzeczywistego (nieznanego) wieku. Na przykład zapis „1610 (26.0%) 1654calAD” oznacza, że z prawdopodobieństwem (poziomem ufności) 0,26 rzeczywisty wiek próbki mieści się w przedziale lat 1610–1654. Wykresy wg programu OxCal4

4. Przydatność datowania za pomocą izotopu węgla ^{14}C do weryfikacji tez archeologicznych

Pamiętając o niepewności pomiarowej wielkości umieszczonej na załączonych powyżej wykresach na osi pionowej, która to niepewność zwykle wynosi ± 40 lat, a także uwzględniając własną niepewność pomiarową krzywej kalibracyjnej (na wykresach jest ona paskiem, a nie dokładną linią), można teraz przystąpić do sformułowania odpowiedzi, czy metoda radiowęglowa może dać rozstrzygnięcie konkretnego zagadnienia. Na przykład, czy może odpowiedzieć na pytanie, czy interesujący nas kawałek drewna powstał (drzewo rosło) w roku 1500 AD, czy raczej dużo później?

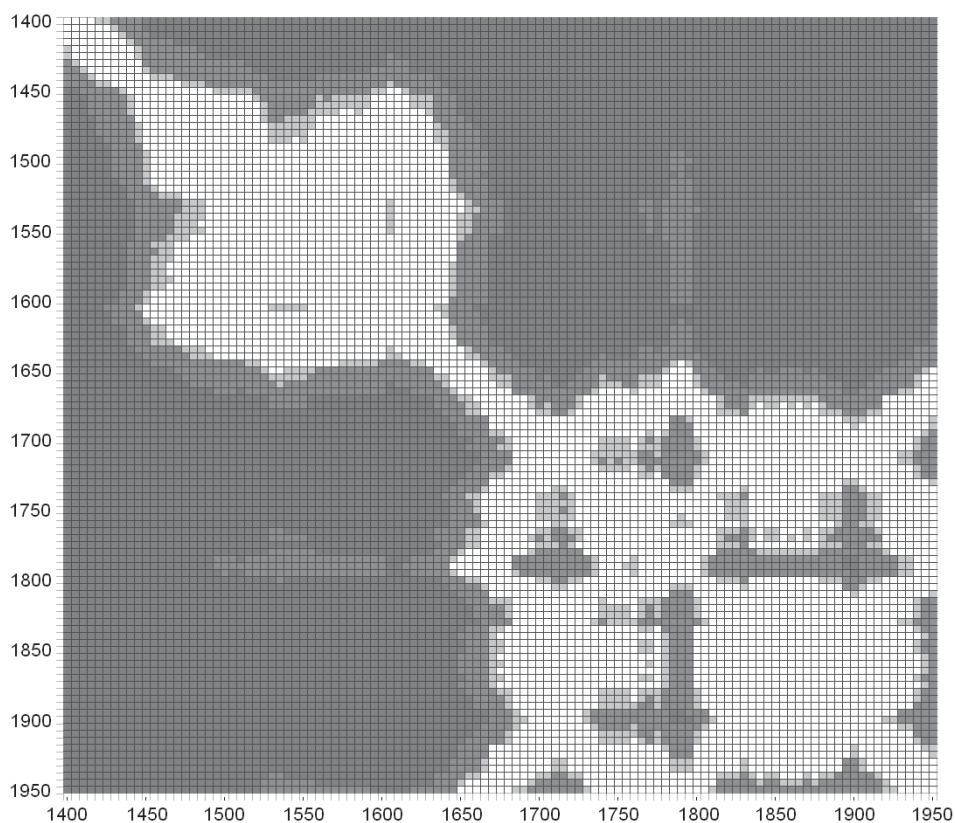
Jak łatwo odczytać z wykresu zamieszczonego na ryc. 2, dla następujących dat: 1500AD–1520AD, 1595AD–1602AD, 1610AD–1615AD wiek radiowęglowy (*radiocarbon determination*) powinien wynosić 350 BP. Co za tym idzie, datowanie radiowęglowe nie może odróżnić od siebie próbek drewna (kości itp.) pochodzących z tych lat, gdyż mają one mniej więcej taką samą koncentrację ^{14}C .

W tym momencie trzeba jednak zwrócić uwagę na możliwość zastosowania pewnego, szczególnego podejścia do łącznego datowania kilku próbek metodą radiowęglową. Chodzi o tzw. *wiggle matching*, czyli dopasowanie grupy dat do załamania krzywej kalibracyjnej (Walanus, Goslar 2009). Jest to sposób postępowania dający bardzo precyzyjne daty nawet w zakresie tzw. *plateau* radiowęglowych (płaskich fragmentów krzywej kalibracyjnej). Jednak metoda ta wymaga posiadania próbek „połączonych” w czasie. W praktyce dotyczy to niemal wyłącznie próbek drewna, w których daje się policzyć słoje przyrostów rocznych. Jeśli dysponujemy belką zbudowaną z 50 słoików, może okazać się, że jednak jest to za mało, by datować drzewo dendrochronologicznie, ale może wystarczyć do zastosowania *wiggle matching*. Para dat otrzymanych ze skrajnych słoików belki musi wpasować się w załamania krzywej kalibracyjnej, co w korzystnej sytuacji może bardzo poważnie zmniejszyć niepewność pomiarową.

Podsumowując, wykres z ryc. 2 wykorzystać można w następujący sposób: jeżeli dla dwóch dat historycznych (AD, oś pozioma) wartości odczytane z krzywej kalibracyjnej na osi pionowej (BP) są podobne, to metoda radiowęglowa nie będzie w stanie wskazać, która z dwóch dat jest prawdziwa dla danej próbki; jeżeli natomiast dla dwóch przypuszczalnych dat AD otrzymuje się zupełnie inne wartości BP, to warto zainwestować w datowanie. Przykładem tej ostatniej sytuacji może być pytanie, czy dana próbka pochodzi z czasu życia Kopernika, czy też jest późniejsza niż 1650 AD.

Rozważane zagadnienie dotyczy porównania dwóch dat historycznych (w aspekcie radiowęglu). Dlatego przydatny powinien być wykres, na którym na obu osiach są daty historyczne (AD). Wykres taki zaproponowany jest na

ryc. 4, odczytuje się go w następujący sposób: jeżeli punkt określony przez dwie hipotetyczne daty historyczne (wiek „prawdziwego” obiektu i wiek przypuszczalnego falsyfikatu) jest biały, to pomiar ^{14}C nic nie da; natomiast kolor ciemny wskazuje na dużą zdolność metody radiowęglowej do odróżnienia dwóch dat. Pośrednie stopnie szarości określone są przez odpowiednie stopnie oczekiwanej pewności. Trzy granice pomiędzy różnymi stopniami szarości odpowiadają trzem poziomom istotności: $\alpha=0,1$; $0,05$; $0,001$, z których ostatni (najmniejszy) odpowiada najciemniejszemu kolorowi. (Stopień pewności albo poziom ufności związany jest z poziomem istotności w ten sposób, że suma ich wartości równa jest 1).



Ryc. 4. Mapa prawdopodobieństw (p-wartości) odróżnienia dwóch dat historycznych. Białe pole na przekątnej odpowiada parom dat zupełnie nieodróżnialnych metodą radiowęglową. Najciemniejszy obszar wskazuje pary dat, które na pewno dałyby różne wyniki w pomiarze ^{14}C . Granice między kolejnymi stopniami jasności wyznaczone są przez poziomy istotności: $\alpha=0,01$; $0,05$; i $0,001$. Wykres utworzono, zakładając niepewność pomiarową $\sigma=30$ lat

Osobnym zagadnieniem jest datowanie próbek, które nazwać można współczesnymi, a konkretnie młodszych od 1950 AD. Ze względu na prowadzone po tym roku próby z bronią jądrową poziom ^{14}C w atmosferze wzrósł dwukrotnie, co przy datowaniu próbek z tego czasu nie pozostawia żadnych wątpliwości co do ich wieku. Jest to tak zwany efekt bombowy (patrz np. Walanus, Goslar 2009).

Mówiąc o możliwości zastosowania metody radiowęglowej, trzeba wspomnieć o rodzaju i ilości materiału nadającego się do datowania. Jako że ^{14}C to izotop węgla, próbka musi zawierać ten pierwiastek w sensownej ilości. Z tego i innych względów najlepsze są kawałki drewna. Przed zadaniem pytania o konieczną masę próbki trzeba zauważyć, że równolegle funkcjonują dwie zupełnie różne metody pomiarowe ^{14}C : starsza metoda scyntylicyjna i nowa metoda AMS, akceleratorowej spektrometrii masowej. Mają one inną czułość pomiarową. Pierwsza wymaga gramów węgla, druga miligramów. To jest zasadnicza między nimi różnica. Na szczęście cena datowań akceleratorowych nie jest aż tysiąc razy wyższa. Jest oczywiste, że znacznie łatwiej zdobywać do pomiarów małą próbkę. Dlatego też dopiero po ustabilizowaniu się techniki AMS datowano np. Całun Turyński (zob. Damon *et al.* 1989). W Polsce Poznańskie Laboratorium Radiowęglowe, stosujące metodę akceleratorowej spektrometrii masowej, zaleca następujące masy próbek: węgiel drzewny 2–5 mg; torf 5–10 mg; drewno 5–10 mg; muszle 20–50 mg; nacieki i inne utwory węglanowe 20–50 mg; kości 1–5 g (zob. Poznańskie Laboratorium Radiowęglowe 2010). Natomiast Laboratorium Datowań Bezwzględnych w Skale, stosujące metodę scyntylicyjną, zaleca większe próbki: drewno 10–50 g, minimalnie 2–5 g; węgiel drzewny 5–30 g, minimalnie: 1–3 g; torf 50–100 g, minimalnie: 2 g; kości 200–300 g, minimalnie 30 g (zob. Laboratorium Datowań Bezwzględnych w Skale 2010).

Konieczna jest jeszcze uwaga dotycząca momentu czasu, który datowany jest metodą ^{14}C . Otóż data wskazuje na czas, kiedy tkanka roślin pobierała „świeży” węgiel z atmosfery (CO_2). Dalsze krążenie węgla (zjadanego przez zwierzęta w postaci trawy itp.) odbywa się praktycznie momentalnie. Jednak na przykład kolagen w kościach wymienia się dość wolno, co może już mieć pewne znaczenie dla datowania. Najbardziej niekorzystna jest sytuacja roślin wodnych, których datowania trzeba unikać. Otóż pobierają one węgiel z wody, który przynajmniej częściowo jest pochodzenia mineralnego, a więc z punktu widzenia ^{14}C jest bardzo stary i nie zawiera już w ogóle tego izotopu. Drewno jest bardzo dobrym materiałem do datowania, jednak pamiętać trzeba, że po pierwsze – w badanej konstrukcji użyty mógł być bardzo stary (już wtedy) kawałek drewna, a po drugie – nawet w przypadku świeżo ściętego pnia można mieć do czynienia z jego środkową częścią, która mogła mieć już w wieku zrębu sto lat i więcej.

W związku z tematem grobu Mikołaja Kopernika celowe wydaje się również przybliżenie kwestii datowania kości. Otóż pomiarowi wieku podlega tu kolagen

wydzielony z kości. Kolagen jest względnie trwałą substancją, niewymieniającą węgla z otoczeniem w trakcie zalegania kości w ziemi. Jednak laboratoryjna preparatyka kości jest trudna i czasochłonna. Bardzo dobrze zachowane, niezbyt stare kości zawierają co najmniej 20% początkowej ilości kolagenu, czyli więcej niż 40 mg kolagenu na 1 g kości. Gdy włókni poddane były kremacji lub uległy spaleni z innych powodów, kości nie zawierają w ogóle kolagenu i nie mogą być preparowane standardową techniką. Jednak bardzo często w kościach jest zachowany węglan strukturalny. Ten węglan, odkładany w tkance kostnej przez cały czas życia organizmu, zawiera informację o prawdziwym wieku ^{14}C (Walanus, Goslar 2009).

5. Konkluzja

Wydaje się, że datowanie radiowęglowe próbek organicznych z grobów przy ołtarzu św. Krzyża archikatedry fromborskiej może stanowić dodatkowy test trafności tezy o odkryciu grobu Kopernika. Postulat wykonywania takich dodatkowych testów został już zgłoszony (Kokowski 2008; 2009; 2010), podobnie jak sugestia precyzyjnego określenia przez zespół prof. Jerzego Gąssowskiego zastosowanych metod datowania archeologicznego (Kokowski 2005b/2007).

Zastosowanie radiowęglowej metody pomiarowej do analizy szczątków przypisywanych Mikołajowi Kopernikowi jest stosunkowo proste, gdyż szczątki te znajdują się w zabezpieczonej trumnie. Podkreślić jednak w tym kontekście należy, że w pomiarach tego typu trzeba zachować dużą skrupulatność, aby uniknąć zarzutu o nieprzestrzeganie elementarnych zasad wykonywania tego rodzaju pomiarów².

Ponadto, aby zwiększyć wartość dowodową zgromadzonego materiału empirycznego, należałoby też przebadac za pomocą tej metody pomiarowej inne obiekty archeologiczne odkryte przy ołtarzu św. Krzyża. Byłoby to już jednak organizacyjnie znacznie trudniejsze, gdyż wymagałoby powtórzenia prac archeologicznych, bowiem – o ile nam wiadomo – obiekty te zostały umieszczone na swoich pierwotnych miejscach w otoczeniu tego ołtarza.

Bibliografia

DAMON P.E., DONAHUE D.J., GORE B.H., HATHEWAY A.L., JULL A.J.T., LINICK T.W., SERCEL P.J., TOOLIN L.J., BRONK C.R., HALL E.T., HEDGES R.E.M., HOUSLEY R., LAW I.A., PERRY C., BONANI G., TRUMBORE S., WOELFLI W., AMBERS J.C., BOWMAN S.G.E., LEESE M.N., TITE M.S.

1989: *Radiocarbon dating of the Shroud of Turin*, „Nature”, t. 337, nr 6208, s. 611–615, 16th February; <http://www.shroud.com/nature.htm>.

² Por. problem zaniedbań metodycznych w datowaniu Całunu Turyńskiego metodą spektroskopii masowej (Marion, Lucotte 2008, s. 79–85).

GĄSSOWSKI Jerzy

2005: *Poszukiwanie grobu Kopernika* [w:] O. Gingerich, J. MacLachlan, *Mikołaj Kopernik: gdy Ziemia stała się planetą*. Przeł. Jarosław Włodarczyk, przedm. Jacek Jezierski, posł. Jerzy Gąssowski. Pułtusk: Wyższa Szkoła Humanistyczna im. Aleksandra Gieysztora, s. 127–136.

GĄSSOWSKI Jerzy

(red.) 2005 / (ed.) 2006: *Poszukiwanie grobu Mikołaja Kopernika*. „Castrī Dominae Nostrae Letterae Annales” t. II. Pułtusk: Wyższa Szkoła Humanistyczna im. Aleksandra Gieysztora, Bałtycki Ośrodek Badawczy; ang. tłum. (ed.) (2006a): *The Search for Nicolaus Copernicus's Tomb*. Pułtusk: The Pułtusk Academy of Humanities, Institute of Anthropology and Archaeology; Fundacja Kronenberga, Citibank Handlowy.

2008: *Badania nad identyfikacją grobu Kopernika / The Search for identity of Copernicus Tomb*. Pułtusk: Akademia Humanistyczna im. Aleksandra Gieysztora, Fundacja Kronenberga przy Citi Handlowy.

KOKOWSKI Michał

2005a: *Poszukiwania grobu Kopernika. Refleksje advocati diaboli*, wersja internetowa: cz. I; http://www.cyfronet.pl/~n1kokows/poszukiwania_cz_1_pl.html.

2005b: *Poszukiwania grobu Kopernika. Refleksje advocati diaboli*; wersja internetowa: cz. II; http://www.cyfronet.pl/~n1kokows/poszukiwania_cz_2_pl.html.

2007: *Poszukiwania grobu Kopernika. Refleksje advocati diaboli*, cz. 1–2, „Kwartalnik Historii Nauki i Techniki”, nr 1, s. 121–131, 131–151.

2008: zob. Kostrzeva 2008.

2009: *Poszukiwania grobu Kopernika. Refleksje advocati diaboli*; cz. 1–3. „Symposium Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych” (Kraków, 20.03.2009) (referat).

2010: *Procedura identyfikacji szczątków nr 13/05 jako szczątków Kopernika w świetle racjonalności uzasadnienia i retoryki perswazji*. Referat przedstawiony podczas konferencji naukowej „Tajemnica grobu Kopernika. Dialog ekspertów” (Kraków, 22–23 lutego 2010 r.).

KOSTRZEWA Jarosław

2008: *Naukowcy szukają włosa Kopernika*, „Dziennik Polski”, 6–7 grudnia, nr 285 (19599), R. LXIV, s. A4; <http://www.dziennikpolski24.pl/pl/aktualnosci/kraj/888031-o-wlos-kopernika.html>.

LABORATORIUM DATOWAŃ BEZWZGLĘDNYCH W SKALE

2010: „*Wymagane masy próbek*”; <http://www.c14.pl/informacje-dla-zleceniodawcow> (dostęp 12.02.2010).

MARION André, LUCOTTE Gérard

2008: *Tunika z Argenteuil i Całun Turyński*. Kraków: Wydawnictwo M; <http://books.google.pl/books?id=0s9LQkwCEWsC>.

POZNAŃSKIE LABORATORIUM RADIOWĘGLOWE

2010: „*Rodzaje próbek*”; http://radiocarbon.pl/index.php?option=com_content&task=view&id=7&Itemid=7 (dostęp 12.02.2010).

REIMER P.J., BAILLIE M.G.L., BARD E., BAYLISS A., BECK J.W., BLACKWELL P.G., BRONK RAMSEY C., BUCK C.E., BURR G.S., EDWARDS R.L., FRIEDRICH M., GROO-TES P.M., GUILDERSON T.P., HAJDAS I., HEATON T.J., HOGG A.G., HUGHEN K.A., KAI-SER K.F., KROMER B., McCORMAC F.G., MANNING S.W., REIMER R.W., RICHARDS D.A., SOUTHON J.R., TALAMO S., TURNEY C.S.M., VAN DER PLICHT J., WEYHENMEYER C.E.
2009: *IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP*, „Radiocarbon”, t. 51(4), s. 1111–1150.

WALANUS Adam

2009: *Systematic bias of radiocarbon method*, „Radiocarbon”, t. 51, s. 433–436.
2010: *Tajemnice ^{14}C , czyli po co nam radiowęgiel*, „Archeologia Żywa”, nr 1(47), s. 44–48.

WALANUS Adam, GOSLAR Tadeusz

2009: *Datowanie radiowęglowe*. Kraków: Wydawnictwo AGH.