

Prof. dr hab. Stanisław Mazur
Instytut Nauk Geologicznych
Polskiej Akademii Nauk

Kraków, 06/08/2018

Ocena rozprawy doktorskiej mgr. Pawła Poprawy

pt. „Mechanizmy subsydencji neoproterozoiczno-dolnopaleozoicznych basenów sedymentacyjnych na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego”, przygotowanej pod opieką naukową prof. dr. hab. inż. Wojciecha Góreckiego na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej im. Staszica.

Recenzowana rozprawa doktorska przedstawia studium historii subsydencji basenów sedymentacyjnych rozwiniętych w ediakarze i wczesnym paleozoiku na południowo-zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego od Morza Bałtyckiego po Morze Czarne. Baseny te rozciągają się, w większości pod przykryciem młodszych osadów, bezpośrednio na północny-wschód od strefy Teisseyre’a-Tornquista. W ich skład wchodzi, z północnego zachodu na południowy wschód, basen bałtycki, basen lubelsko-podlaski i basen wołyńsko-podolsko-mołdawski. Ilościowa analiza subsydencji została przeprowadzona w oparciu o metodę jednowymiarowego ‘wstecznego usuwania’ (ang. *backstripping*) dla 85 otworów lub syntetycznych profili pionowych z obszaru południowo-zachodniej Skandynawii, państw bałtyckich, Polski, zachodniej i południowo-zachodniej Ukrainy, Mołdawii i północno-zachodniej Rumunii. Krzywe subsydencji tektonicznej były analizowane w celu ustalenia mechanizmów odpowiedzialnych za powstanie i ewolucję badanych basenów sedymentacyjnych oraz środowisk tektonicznych w jakich następował ich rozwój. Natomiast obliczenia tempa sedymentacji posłużyły jako dane do analizy aktywności obszarów źródłowych detrytus.

Struktura i zawartość rozprawy

Tekst rozprawy obejmuje 153 strony druku. Składa się na nie polskojęzyczne streszczenie oraz pięć recenzowanych artykułów naukowych opublikowanych w latach 1999-2018. W przypadku dwóch artykułów mgr Poprawa jest ich jedynym autorem, a w pozostałych trzech pracach pełni rolę pierwszego autora. Artykuły zostały opublikowane w *Geological Quarterly*, *Pracach Państwowego Instytutu Geologicznego* (dwa artykuły), *Przeglądzie Geologicznym* i *Tectonophysics*. Artykuły składające się na rozprawę doktorską zostały umieszczone w tekście w odwróconym porządku chronologicznym względem roku ich wydania:

1. Poprawa, P., Radkovets, N. Rauball, J., 2018. Ediacaran-Paleozoic subsidence history of the Volyn-Podillya-Moldavia Basin (W and SW Ukraine, Moldova, NE Romania). *Geological Quarterly*, **62**(3), 459–486.
2. Poprawa, P., 2006a. Neoproterozoiczny rozpad superkontynentu Rodinii/Panotii – zapis w rozwoju basenów osadowych na zachodnim skłonie Baltiki. W: Matyja, H., Poprawa, P. (red.),

- Ewolucja facjalna, tektoniczna i termiczna pomorskiego segmentu szwu transeuropejskiego oraz obszarów przyległych. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, **186**, 165–188.
3. Poprawa, P., 2006b. Rozwój kaledońskiej strefy kolizji wzdłuż zachodniej krawędzi Baltiki oraz jej relacje do basenu przedpola. W: Matyja, H., Poprawa, P. (red.), *Ewolucja facjalna, tektoniczna i termiczna pomorskiego segmentu szwu transeuropejskiego oraz obszarów przyległych. Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, **186**, 189–214.
 4. Poprawa, P., Paczeńska, J., 2002. Rozwój ryftu w późnym neoproterozoiku-wczesnym paleozoiku na lubelsko-podlaskim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego – analiza subsydencji i zapisu facjalnego. *Przegląd Geologiczny*, **50**, 49–61.
 5. Poprawa, P., Šliaupa, S., Stephenson, R.A., Lazauskienė, J., 1999. Late Vendian-Early Palaeozoic tectonic evolution of the Baltic basin: regional implications from subsidence analysis. *Tectonophysics*, **314**, 219–239.

Streszczenie

Streszczenie obejmuje 22 strony tekstu wraz ze spisem literatury oraz dwustronicowy angielskojęzyczny abstrakt. Na streszczenie składa się 6 podrozdziałów, do których należą: wstęp, metodyka, 3 rozdziały prezentujące kolejne aspekty wyników badań doktoranta i jednocześnie zawierające dyskusję tych wyników na tle literatury przedmiotu oraz podrozdział poświęcony wnioskowi. Streszczenie zawiera 8 figur i spis wykorzystanej literatury obejmujący 126 pozycji.

Wstęp omawia główne rysy budowy geologicznej obszaru oraz przegląd wcześniejszych badań. Metodyka zawiera wprowadzenie do jednowymiarowej analizy subsydencji przy wykorzystaniu backstrippingu (wstecznego usuwania) oraz charakteryzuje dane otworowe i wiekowe wykorzystane w rozprawie. Analiza subsydencji polega na usuwaniu obciążenia basenu osadowego wywołanego przez sukcesje osadowe, a w przypadku sedimentacji morskiej także kolumnę wody i obliczaniu wyrównania izostatycznego. Sukcesje osadowe usuwa się kolejno od góry do dołu przy założeniu, że kompensacja izostatyczna odbywa się zgodnie z teorią Airy’ego to znaczy obciążana płyta nie ma zdolności do elastycznego uginania się pod wpływem obciążenia. Jednocześnie usuwa się efekt kompaktacji niższej sukcesji osadowych. Obliczenia biorą również pod uwagę eustatyczne zmiany poziomu morza. Analizę subsydencji we wszystkich pracach składających się na rozprawę doktorską przeprowadzono z wykorzystaniem programu komputerowego BasinMod 1-D. W części metodycznej przedstawiono także, w oparciu o literaturę, przegląd kształtów krzywych subsydencji, które są wskaźnikowe dla różnych reżimów tektonicznych w których dochodzi do formowania się basenów osadowych.

Wyniki zawarte we wszystkich artykułach składających się na rozprawę doktorską dowodzą, że baseny osadowe w całym obszarze badań wykazują wspólną historię subsydencji. Baseny te ewoluowały w czasie zarówno pod względem ich geometrii jak i mechanizmów subsydencji będących wyrazem zmieniających się reżimów tektonicznych. Ewolucja badanych basenów rozpoczęła się od epizodu szybkiej subsydencji tektonicznej w późnym ediakarze. Wydarzenie to było związane z ryftingiem podczas rozpadu paleokontynentu Rodinii. Ediakarska subsydencja zwiększała się ku SW w kierunku strefy Teisseyre’a-Tornquista poza którą znajdowała się prawdopodobnie oś ryftu przebiegającego wzdłuż całej południowo-zachodniej krawędzi Baltiki od Skandynawii po Morze Czarne. Charakterystyka subsydencji w kambrze i ordowiku jest typowa dla basenów post-ryftowych, w których malejące tempo subsydencji termicznej idzie w parze z lateralnym wzrostem obszaru

depocentrów. Południowo-zachodnie obrzeżenie Baltiki przekształciło się w tym czasie w pasywną krawędź kontynentu istniejącą aż po środkowy ordowik. Post-ryftowa subsydencja na pasywnym obrzeżeniu Baltiki została przerwana na niemal całym badanym obszarze przez późnokambryjski epizod podniesienia i erozji. Przyczyna tego wydarzenia nie jest jeszcze do końca poznana, ale mogło się ono wiązać z propagacją naprężeń kompresyjnych wygenerowanych w odległych obszarach Baltiki lub przebudową struktury termicznej litosfery. Od późnego ordowiku zaznacza się stopniowa zmiana mechanizmu subsydencji na fleksuralne uginanie płyty. W tym przypadku obniżaną płytą przedpola było pasywne obrzeżenie Baltiki, a działającym na nią obciążeniem tektonicznym orogen kaledoński powstający w następstwie kolizji Awalonii i Baltiki. Krzywe subsydencji wzdłuż całego południowo-zachodniego obrzeżenia Baltiki od późnego ordowiku lub wczesnego syluru począwszy mają kształt kolankowy, który jest typowy dla zapadlak przedgórskich. Obserwuje się także stopniowy wzrost tempa subsydencji, który swe maksimum osiąga w późnym sylurze. Ewolucja basenu przedgórskiego na południowo-zachodnim obrzeżeniu Baltiki przebiegała w sposób diachroniczny. Wzrost tempa subsydencji oraz przejście od stadium basenu wygłodniałego (ang. *starving basin*) do fazy zapełniania basenu (ang. *overfilled basin*) następowało stopniowo od północnego zachodu na południowy wschód. Sugeruje to skośny charakter kolizji Awalonii i Baltiki i propagację obciążenia tektonicznego na południowy wschód od najpóźniejszego ordowiku (rów Oslo) przez wenlok w basenie bałtyckim po ludlow w basenach lubelsko-podlaskim i wołyńsko-podolsko-mołdawskim.

Streszczenie dobrze podsumowuje dane i interpretacje przedstawione w zestawie publikacji składających się na rozprawę doktorską. Stanowi syntezę obserwacji zebranych przez mgr. Poprawę w trakcie niemal dwudziestu lat pracy nad ewolucją ediakarsko-dolnopaleozoicznych basenów południowo-zachodniego obrzeżenia kratonu wschodnioeuropejskiego. We właściwy sposób podkreśla główne osiągnięcia doktoranta i oparte na nich nowe hipotezy geologiczne. Streszczenie zawiera jedynie drobne uchybienia i błędy oraz stwierdzenia o dyskusyjnym charakterze. Wyliczam je poniżej w kolejności odpowiadającej ich malejącemu znaczeniu:

1. Współczynniki ekstensji obliczone na podstawie krzywych subsydencji dla basenu lubelsko-podlaskiego są bardzo niskie (1,11 i 1,28 – strona 6) w porównaniu z np. pasywnym obrzeżeniem Atlantyku. W konsekwencji albo ediakarski ryfting zatrzymał się przed osiągnięciem dojrzałego stadium albo oś ryftu znajdowała się znacznie dalej na południowy zachód.
2. Jeśli ryfting został zainicjowany umiejscowieniem skał wulkanicznych jak pisze autor streszczenia (strona 23) to mamy do czynienia z nietypowym przypadkiem. Dobrze udokumentowany przykład powstania Atlantyku pokazuje, że duże prowincje magmowe tworzyły się w dojrzałej fazie ryftingu na kilka milionów lat przed otwarciem się oceanu. Jeśli wulkanizm w basenie lubelsko-podlaskim i wołyńskim trwał już od początku depozycji osadów syn-ryftowych to jego geneza wiązała się raczej z obecnością pióropusza płaszcz (ang. *mantle plum*), którego istnienie jest postulowane przez autora.
3. Przy definiowaniu ram czasowych ediakarskiego ryftingu podane wieki są niespójne. Jeśli ryfting zakończył się 590-580 mln lat temu (strona 6) to nie rozpoczął się 567 mln lat temu (strona 7). Skróty „mln lat” i „Ma” (łac. *mega-annum*) nie są konsekwentnie stosowane w streszczeniu.
4. Podłoże krystaliczne badanej części platformy wschodnioeuropejskiej ma wiek paleo- i mezoproterozoiczny, a nie archaiczno-mezoproterozoiczny (strona 1).

5. Trzech cytowanych prac brakuje w spisie literatury: Bakun-Czubarow i in. (2000), Cocks (2000) oraz Torsvik i in. (2009). Artykuł Lazauskiene (2002) jest pracą zbiorową.
6. Końcowa część zdania na stronie 15 została obcięta w trakcie edycji pracy.
7. Skrót „ER” i „KZP” nie są objaśnione na Figurach 4 do 7.
8. W kilku miejscach pojawiają się niejednoznaczne stwierdzenia:
 - „W analizowanym przypadku...” na stronie 3 nie wiadomo o jaki przypadek chodzi,
 - „...w końcowej fazie rozpadu tego superkontynentu” – na stronie 10 nie wiadomo, czy chodzi o Rodinię czy Panotię.
9. Występują drobne błędy gramatyczne. Powinno być:
 - „neoproterozoiczno-wczesnopaleozoicznej ewolucji” na stronie 3,
 - „subsydencji tektonicznej charakterystycznej” w objaśnieniu do Figury 3,
 - „nadsubdukcyjnego łuku wyspowego” na stronie 16,
 - „kratonu wschodnioeuropejskiego” na stronie 16.

Artykuł 1

Pierwszy z artykułów wchodzących w skład rozprawy doktorskiej prezentuje wyniki jednowymiarowej analizy subsydencji dla 21 otworów zlokalizowanych w basenie wołyńsko-podolsko-mołdawskim. Basen ten znajduje się na południowo-zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego na obszarze zachodniej i południowo-zachodniej Ukrainy, Mołdawii i północno-wschodniej Rumunii. W oparciu o wyniki analizy subsydencji autorzy rekonstruują ewolucję basenu wołyńsko-podolsko-mołdawskiego od ediakaru do wczesnego karbonu. Następnie umieszczają rezultaty swoich badań w szerszym kontekście tektonicznym ediakarskiego ryftingu i późnoorowicko-sylurskiej konwergencji pomiędzy Baltiką i Awalonią.

Praca ta choć poświęcona basenowi wołyńsko-podolsko-mołdawskiemu stanowi również rodzaj podsumowania całokształtu dokonań mgr. Pawła Poprawy w zakresie badań ediakarsko-paleozoicznych basenów osadowych rozwiniętych na skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego w sąsiedztwie strefy Teisseyre'a-Tornquista. Ponieważ okazało się, że ewolucja basenu wołyńsko-podolsko-mołdawskiego zasadniczo nie odbiega od ewolucji wcześniej zbadanych basenów występujących na obszarze Polski – basenów podlasko-lubelskiego i bałtyckiego – to autorzy są w stanie dokonać syntezy obserwacji dla całej południowo-zachodniej strefy krawędziowej kratonu wschodnioeuropejskiego od Morza Bałtyckiego po Morze Czarne.

W świetle badań autorów ewolucja basenów położonych na południowo-zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego rozpoczęła się od fazy ediakarskiej ekstensji, którą zainicjowało umiejscowienie trapów wołyńskich i szybka syn-ryftowa subsydencja tektoniczna. Tempo subsydencji zwiększało się ku południowemu zachodowi, to jest w kierunku osi ryftu Tornquista. Ryfting wiązał się z rozpadem paleokontynentu Rodinii na przełomie ediakaru i kambru. Po zakończeniu fazy subsydencji tektonicznej i otwarciu Oceanu Tornquista skłon kratonu przekształcił się w pasywne obrzeżenie paleokontynentu Baltiki zdominowane przez subsydencję termiczną stopniowo słabnącą od kambru po późny ordowik. Faza post-ryftowa została przerwana przez epizod wyniesienia i erozji w późnym kambrze. Kontekst tektoniczny tego wydarzenia nie jest do końca jasny i jego pełne wyjaśnienie będzie wymagało dalszych badań w przyszłości. Autorzy sugerują, że wyniesienie późnokambryjskie mogło być następstwem naprężeń kompresyjnych wygenerowanych w innych częściach Baltiki i propagujących na znaczne odległości. Od wlenoku począwszy w basenie wołyńsko-

podolsko-mołodawskim obserwuje się przejście do sedimentacji w basenie fleksuralnym, co manifestuje się między innymi kolankowym kształtem krzywych subsydencji. Basen ten jest interpretowany jako zapadlisko przedgórskie kaledonidów. Autorzy zwracają uwagę na diachroniczność ewolucji basenu, która przejawia się stopniowym postępowaniem konwergencji od północnego zachodu na południowy wschód co może się wiązać ze skośną kolizją Awalonii i Baltiki. Faza fleksuralnego uginania obrzeżenia Baltiki zakończyła się w lochkowie ustępując miejsca post-orogenicznej subsydencji w pragu i emsie. W tym czasie basen wołyńsko-podolsko-mołodawski był częścią systemu basenów oldredowych, których subsydencja wiązała się z kolapsem skorupy pogrubionej w trakcie orogenezy kaledońskiej i odzyskiwaniem równowagi izostatycznej w obrębie litosfery.

Przedstawione w pracy wyniki badań oraz ich synteza z rezultatami wcześniejszych obserwacji na obszarze Polski nie budzą zastrzeżeń. Analiza subsydencji została przeprowadzona w sposób fachowy, a zaprezentowana interpretacja ma dobre uzasadnienie w wynikach badań. Wyprowadzone wnioski nie wybiegają poza zakres zgromadzonych danych. Jediną słabością pracy jest niska rozdzielczość czasowa analizy subsydencji. Jej dokładność jest ograniczona do epok stratygraficznych w kambrze, sylurze i karbonie. Jedynie w przypadku ordowiku i dewonu w analizie są stosowane piętra stratygraficzne. Ma to swoje następstwa szczególnie dla syluru, gdzie postulowana jest diachroniczność kolizji Awalonii i Baltiki, a co za tym idzie także diachroniczność ewolucji basenu przedgórskiego kaledonidów. Z rozdzielczością ograniczoną do epok stratygraficznych syluru taka zmienność nie może być w pełni udokumentowana. Niska rozdzielczość czasowa analizy subsydencji utrudnia także korelację z danymi biostratygraficznymi i geochronologicznymi.

Artykuł 2

Druga z prac składających się na rozprawę doktorską dotyczy powstania ediakarsko-dolnopaleozoicznych basenów osadowych położonych na południowo-zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego. W artykule przedstawiono wyniki analizy subsydencji dla 15 otworów wiertniczych z obszaru basenu bałtyckiego dla okresu czasu obejmującego ediakar, kambr i ordowik. Dodatkowo zaprezentowano także rezultaty dla 3 syntetycznych profilów ze stref stanowiących północno-zachodnie przedłużenie basenu bałtyckiego. Dyskusję wyników rozszerzono również na basen lubelsko-podlaski i terran Brunovistulikum. W przypadku basenu lubelsko-podlaskiego posłużono się krzywymi subsydencji opublikowanymi wcześniej przez Poprawę i Pacześną (2002). Dla terranu Brunovistulikum użyto natomiast 6 niepublikowanych wcześniej krzywych subsydencji. Osobną część pracy stanowi rozdział pod nieco mylącym tytułem „Ilościowa Analiza Subsydencji Tektonicznej”. Tytuł nie jest do końca adekwatny, ponieważ krzywe subsydencji są również narzędziem analizy ilościowej. Natomiast wspomniany wyżej rozdział dotyczy obliczania współczynnika ekstensji dla wybranych otworów z basenu lubelsko-podlaskiego. Zaprezentowano tam wyniki uzyskane przy wykorzystaniu dwóch metod. W pierwszym przypadku analizowano 12 otworów (Figura 9) w tym 6 tych, poza otworem Stadniki IG-1, które wcześniej użyto do porównania z basenem bałtyckim i terranem Brunovistulikum (na Figurze 5). Stosując drugą metodę obliczono współczynnik ekstensji dla 5 otworów (Figura 10). Cztery z nich zostały również użyte w metodzie pierwszej (Figura 9), a trzy wykorzystano do porównania z basenem bałtyckim i terranem Brunovistulikum (Figura 5). Już sama złożoność powyższych wyjaśnień pokazuje, jak zmienna baza danych stosowana w różnych częściach omawianego artykułu zaburza jego przejrzystość.

Krzywe subsydencji zaprezentowane w pracy zostały zbudowane i zinterpretowane w profesjonalny sposób. Również główne przesłanie artykułu dotyczące ediakarskiego ryftingu podczas rozpadu paleokontynentu Rodinii i późniejszej subsydencji termicznej południowo-zachodniego obrzeżenia Baltiki w kambrze i ordowiku nie budzi zastrzeżeń. W tym zakresie wyciągnięte wnioski znajdują pełne uzasadnienie w przedstawionych wynikach. Obok tych podstawowych zalet artykuł ma także słabsze strony. Należy do nich w pierwszym rzędzie zbytnia wielowątkowość oraz zbyt daleko sięgająca dyskusja regionalna, która wykracza poza zgromadzone dane. Niektóre fragmenty artykułu robią wrażenie bardziej pracy przeglądowej niż analitycznej.

W artykule znajduje się kilka interesujących stwierdzeń, które nie były rozwijane w późniejszych pracach i z tego tytułu zasługują na podkreślenie:

1. Wyniki datowania detrytycznych muskowitów (Poprawa i in., 2006) stanowi przesłankę na rzecz płytkiego metamorfizmu w czasie pierwszej fazy ryftingu, zachodzącego w strefie stanowiącej następnie pod koniec neoproterozoiku zachodnią, ryftową krawędź Baltiki.
2. Czas rozpadu Rodinii sugerowany na podstawie badań paleomagnetycznych tj. 600 mln lat temu (np. Powell i in., 1993; Torsvik i in., 1996) jest starszy niż ten wynikający z analiz subsydencji.
3. W przypadku większości analizowanych profilów można stwierdzić, że początek ryftingu poprzedzał o około 1-20 mln lat początek rozwoju basenu sedimentacyjnego.
4. Terran Brunovistulikum oraz południowo-zachodni skłon kratonu wschodnioeuropejskiego reprezentowały w ediakarze i kambrze osobne domeny, zlokalizowane w odmiennych środowiskach tektonicznych.

W pracy znajduje się także kilka dyskusyjnych stwierdzeń i interpretacji. Mają one drugorzędne znaczenie i nie wpływają na główne przesłanie artykułu, ale dla porządku omówię je krótko poniżej.

1. Współczynniki ekstensji obliczone przy użyciu metody, w której stała czasowa była parametrem dopasowywanym do krzywej subsydencji tektonicznej są nierealistycznie niskie (Figura 9). Ich wielkość jest nieadekwatna do rozmiarów basenu i postulowanej bliskości ryftu Tornquista. Metoda dopasowywania stałej czasowej nie jest szeroko stosowana na świecie i zawodzi również w przypadku basenu lubelsko-podlaskiego. Duże lepsze wyniki daje zastosowanie stałych czasowych wg Parsonsa i Sclatera (1977) lub Stein i Steina (1992) i to niezależnie od tego, którą z nich się wybierze (Figura 10). Różnice otrzymanych współczynników ekstensji przy zastosowaniu obu stałych nie są znacząco odmienne. Wskazują one na umiarkowaną ekstensję i prawdopodobnie znaczą odległość analizowanych otworów od strefy osiowej ryftu Tornquista. Jednocześnie sugerują rozpoczęcie ryftingu 570 mln lat temu, niemal równocześnie z umiejscowieniem trapów bazaltowych. Jest to mocnym argumentem na rzecz wiodącej roli pióropusza płaszcza w zainicjowaniu ryftu Tornquista.
2. Autor pisze, że osady kambru basenu bałtyckiego w większości reprezentują depozycję już w post-ryftowej fazie rozwoju basenu. Tymczasem kształt większości krzywych subsydencji (Figury 2 i 5) wskazuje na koniec fazy ryftowej na przełomie wczesnego i środkowego lub nawet środkowego i późnego kambru.
3. Autor postuluje fleksuralne ugięcie płyty jako mechanizm powstania przestrzeni akomodacyjnej basenu, w którym doszło do depozycji górnego kambru strefy łysogórskiej. Tymczasem osady górnego kambru w tej strefie to w ogromnej większości arenity kwarcowe,

dojrzały osad będący produktem wietrzenia chemicznego. Tego typu osady nie są typowe dla zapadlisk przedgórskich. Co więcej, autor wskazuje na przemieszczenia przesuwcze jako główny mechanizm zadokowania terranu małopolskiego u brzegu Baltiki w późnym kambrze. Jednak przemieszczenia przesuwcze nie są w stanie wygenerować obciążenia tektonicznego niezbędnego do fleksuralnego uginania płyty. Takie obciążenie może w pierwszym rzędzie powstać jako efekt tektoniki nasuwczej.

4. Zdaniem autora analiza subsydencji pozwoliła odtworzyć pojedynczą fazę intensywnej subsydencji tektonicznej na obszarze terranu Brunovistulikum. Wniosek ten nie jest do końca uprawniony w sytuacji, gdy analizowane otwory (Figura 5) nie przewierciły górnego kambru, ordowiku i syluru. Również postulowana geneza basenu kambryjskiego na Brunovistulikum jako zapadliska przedgórskiego budzi wątpliwości. Baseny przedgórskie rozwijają się na płycie przedpola, podczas gdy dolny i środkowy kambr terranu Brunovistulikum został zdeponowany na kadomskich internidach.

Artykuł 3

Trzeci z artykułów przedstawia wyniki analizy subsydencji dla 30 otworów z obszaru basenu bałtyckiego i trzech syntetycznych profilów położonych dalej na północny zachód na terenie Danii, Szwecji i Norwegii. W odróżnieniu od *artykułu 2* omawiane są tu ordowicko-sylurskie odcinki krzywych subsydencji. Dyskusję wyników rozszerzono również na basen lubelsko-podlaski posługując się krzywymi subsydencji opublikowanymi wcześniej przez Poprawę i Pacześną (2002).

Krzywe subsydencji zaprezentowane w pracy zostały skonstruowane i zinterpretowane zgodnie z zasadami sztuki, a wyciągnięte wnioski znajdują pełne uzasadnienie w przedstawionych rezultatach. Wyniki analizy subsydencji pozwalają stwierdzić, że począwszy od późnego ordowiku obserwuje się systematyczny wzrost tempa subsydencji tektonicznej w czasie, która osiąga maksimum w późnym sylurze. W wyniku tego krzywe subsydencji tektonicznej dla późnego ordowiku oraz syluru mają charakterystyczny kolankowy kształt. Taki charakter subsydencji jest uważany za wskaźnikowy dla basenów powstałych na przedpolu stref kolizji (Allen i Allen, 1990; Angevine i in., 1990; King, 1994). Ponadto na poszczególnych etapach późnoordowicko-sylurskiej ewolucji basenu jest obserwowany systematyczny, oboczny przyrost subsydencji tektonicznej z północnego wschodu ku południowemu zachodowi tj. w kierunku krawędzi kratonu. Przejście od ordowiku do syluru zapisuje się w osadach basenu bałtyckiego zjawiskiem regionalnej regresji, wyrażającej się przerwami w sedymentacji i umiarkowaną erozją, które uważano wcześniej za przejaw aktywności tektonicznej (Jaworowski i Modliński, 1968; Modliński, 1982; Tomczyk, 1982, 1989). Zjawisko to nie znajduje jednak odzwierciedlenia na zaprezentowanych krzywych subsydencji tektonicznej. Obserwowane spłylenie, a lokalnie wynikająca z niego erozja, są skorelowane z globalnym spadkiem poziomu morza (Ross i Ross, 1990). Dlatego dla wspomnianego wydarzenia autor sugeruje genezę głównie eustatyczną, zaś możliwy czynnik tektoniczny nie był dominujący.

Systematyczne narastanie tempa depozycji materiału detrytycznego w czasie oraz bardzo duże jego bezwzględne wartości sugerują kolizyjny charakter obszaru źródłowego. Odzwierciedlać mogą one propagację strefy kolizji i stopniowe angażowanie w strefę deformacji, wypiętrzania i erozji kolejnych jednostek tektonicznych. Wzrost tempa depozycji w czasie może wiązać się również z kolizyjnym zamykaniem basenów sedymentacyjnych położonych na zachód od basenu bałtyckiego, które uprzednio przechwytywały część materiału detrytycznego, dostarczanego z wynoszonego i

erodowanego klina akrecyjnego. Charakterystyczne jest stopniowe rozszerzanie się w sylurze ku wschodowi i południowemu wschodowi strefy intensywnej subsydencji i depozycji. Wspomniany diachronizm może odzwierciedlać skośny charakter kolizji Awalonii z Baltiką oraz propagację deformacji w obrębie strefy kolizji ku południowemu wschodowi. Porównanie krzywych późnoordowicko-sylurskiej subsydencji dla basenów bałtyckiego i lubelsko-podlaskiego pozwala stwierdzić, że największa ówczesna subsydencja miała miejsce na zachodnim obrzeżeniu Baltiki w obszarze basenu bałtyckiego.

Poza rozdziałem „Kaledońskie Fleksuralne Uginanie Zachodniego Skłonu Kratonu Wschodnioeuropejskiego” omawiana praca ma charakter przeglądowy. Opiera się na wielorakich zestawach danych, wśród których wyniki ilościowej analizy subsydencji są tylko jednym z elementów. Przedstawiona dyskusja jest zasadniczo logiczna, a jej główne przesłanie dotyczące charakteru kaledońskiej strefy kolizji Awalonii i Baltiki pozostaje aktualne do dziś. Przedstawione interpretacje są w większości spójne, choć moim zdaniem zbyt wielowątkowe i nie zawsze wystarczająco poparte danymi. Powstrzymuję się od szczegółowego komentowania części przeglądowej artykułu, ponieważ nie rzutuje ona bezpośrednio na ocenę kwalifikacji fachowych autora. Poza tym znaczny odstęp czasu jaki minął od opublikowania tej pracy sprawił, że pojawiły się nowe dane, niedostępne w czasie pisania artykułu.

Artykuł 4

Jest to praca, która zdążyła już wejść do klasyki polskiej literatury geologicznej. W artykule przeprowadzono analizę mechanizmów subsydencji oraz ewolucji reżimu tektonicznego ediakarsko-dolnopaleozoicznego basenu sedymentacyjnego, rozwiniętego na lubelsko-podlaskim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego. Szczególny nacisk położono na opisanie ewolucji obszaru w kategoriach tektonicznych modeli basenów sedymentacyjnych. Jako metodę badawczą zastosowano jednowymiarową analizę subsydencji (ang. *backstripping*) dla 14 profilów otworów wiertniczych. Ponadto analizowano także relacje poszczególnych etapów tektonicznego rozwoju basenu do wykształcenia facjalnego jego osadowego wypełnienia. Stwierdzono, że na przełomie ediakaru i kambru wzdłuż południowo-zachodniego obrzeżenia Baltiki rozwinął się ryft, który doprowadził w kambrze i ordowiku do powstania pasywnego obrzeżenia kontynentalnego. Ponadto postawiono tezę, że w późnym ordowiku i sylurze południowo-zachodni skłon Baltiki uległ synorogenicznemu uginaniu fleksuralnemu, prowadzącemu do powstania kaledońskiego basenu przedgórskiego.

Wyniki analizy backstrippingu wskazują na spójny charakter subsydencji na całym obszarze basenu lubelsko-podlaskiego, który jednocześnie wykazuje podobieństwo do rozwoju subsydencji w basenie bałtyckim. Indywidualizują się tu dwa zasadnicze, basenotwórcze wydarzenia tektoniczne, tj. ediakarsko-wczesnokambryjskie i późnosylurskie. Przeprowadzona analiza subsydencji oraz analiza rozwoju facjalnego osadowego wypełnienia basenu lubelsko-podlaskiego pozwoliły na sformułowanie hipotezy ujmującej ediakarsko-kambryjsko-ordowicką ewolucję obszaru w spójny model basenu ryftowego. Faza synryftowa w późnym ediakarze cechuje się szybką subsydencją, aktywnością wulkaniczną i występowaniem przegrzania o przypuszczalnej genezie ryftowej. Zdaniem autorów artykułu faza ta obejmuje okres depozycji utworów formacji sławatyckiej, białopolskiej i siemiatyckiej. Począwszy od okresu depozycji formacji lubelskiej i włodawskiej tj. późnego ediakaru i wczesnego kambru rozpoczyna się faza post-ryftowej subsydencji termicznej, która trwała aż do środkowego ordowiku. Cechami charakterystycznymi dla fazy post-ryftowej są systematycznie

słabnąca subsydencja oraz rozszerzanie się zasięgu basenu, zwłaszcza w ordowiku. Począwszy od późnego ordowiku rozpoczyna się drugi etap tektonicznego rozwoju basenu lubelsko-podlaskiego. Charakteryzuje się on systematycznym wzrostem tempa subsydencji tektonicznej w czasie, której maksimum przypada na późny sylur. W następstwie tego krzywe subsydencji tektonicznej dla późnego ordowiku oraz syluru mają kolankowy kształt, który jest uważany za wskaźnikowy dla kompresyjnego reżimu tektonicznego i fleksuralnego uginania płyty.

W interpretacji autorów basen lubelsko-podlaski rozwinął się na skrzyżowaniu ponadregionalnych struktur tektonicznych, ryftów Orsza-Wołyń i Tornquista. Zwiększona subsydencja wzdłuż obu tych struktur uwidacznia się w rozkładzie depocentrów w zachodniej części kratonu wschodnioeuropejskiego. Prowadzi to do wniosku, że ryfting przebiegał jednocześnie wzdłuż obu wspomnianych struktur, a basen lubelsko-podlaski stanowił strefę węzła potrójnego. Jego dwa ramiona, pokrywające się z późniejszym obrzeżeniem Baltiki, utworzyły ryft prowadzący do rozpadu paleokontynentu Rodinii, natomiast ramię stanowiące ryft Orsza-Wołyń stopniowo zamarło. Wyraża się to stopniowym zanikiem centrów depozycji związanych z ryftem Orsza-Wołyń od najpóźniejszego ediakaru, w kambrze i szczególnie w ordowiku, przy równoczesnym rozwijaniu się basenów tego wieku wzdłuż strefy Teisseyre'a-Tornquista.

Ciekawą obserwacją poczynioną przez autorów jest stwierdzenie, że na granicy środkowego i późnego kambru w profilach niektórych otworów następuje załamanie krzywych subsydencji poprzedzające epizod erozji. Zdaniem autorów zjawisko to nie jest bezpośrednio przewidywane przez model basenu ryftowego, a jego geneza wymaga dodatkowego wyjaśnienia. Ze swej strony mogę dodać, że podobne załamania krzywych subsydencji w profilach zlokalizowanych na współczesnych obrzeżeniach Atlantyku rejestrują moment otwarcia się oceanu i związane z tym podniesienie obrzeżenia kontynentu prowadzące do powstania niezgodności (ang. *break-up unconformity*).

Sporo miejsca w końcowej części artykułu autorzy poświęcają na przedyskutowanie sprzeczności pomiędzy modelem edikarskiego ryftu a obecnością kadomskiego orogenu w obrębie terranu Brunovistulikum i masywu małopolskiego postulowane przez niektórych badaczy (Żelaźniewicz 1998, Żelaźniewicz i in., 1997, 2001). Problem ten pozostaje nierozwiązany do dzisiaj, a nowe dane zgromadzone w ostatnich kilkunastu latach jeszcze go uwypuklają. Rozwiązanie tej sprzeczności jest jednym z wyzwań przed jakimi stoi polska geologia regionalna i będzie wymagało ponownego przemyślenia natury i zasięgu orogenu kadomskiego, szczególnie na obszarze masywu małopolskiego.

Artykuł 5

Jest to najstarsza z prac składających się na rozprawę doktorską, która została opublikowana przed 19 laty. W tamtym czasie był to jeden z pierwszych artykułów w polskiej literaturze geologicznej wykorzystujących analizę subsydencji jako narzędzie badawcze. W tej pracy autor po raz pierwszy sformułował hipotezę dotyczącą ediakarskiego ryftingu i kaledońskiego zapadliska przedgórskiego w odniesieniu do basenu bałtyckiego. Dopiero późniejsze badania pozwoliły na rozszerzenie tych interpretacji na pozostałe baseny położone na południowo-zachodnim obrzeżeniu kratonu wschodnioeuropejskiego. Jednowymiarową analizę subsydencji przeprowadzono dla 43 otworów wiertniczych penetrujących górniediakarsko-dolnopaleozoiczną sukcesję osadową basenu bałtyckiego. Otrzymane wyniki zinterpretowano w odniesieniu do danych litofacjalnych i strukturalnych, aby zrekonstruować mechanizmy subsydencji i regionalny kontekst tektoniczny

rozwoju basenu bałtyckiego. Już wyniki tych pionierskich badań pozwoliły stwierdzić, że rozkład subsydencji tektonicznej ma spójny charakter dla całego basenu w przedziale czasu od późnego ediakaru po sylur. Etap ryftowy trwał od późnego ediakaru po początek środkowego kambru obejmując dwie fazy nasilonej subsydencji w późnym ediakarze-najwcześniejszym kambrze i na początku środkowego kambru. Ideę dwóch maksimów tempa synryftowej subsydencji autor porzucił w późniejszych pracach, ale jego oryginalna interpretacja pozostaje moim zdaniem wciąż aktualna, ponieważ znajduje dobre oparcie w wynikach przeprowadzonych badań. Już pod koniec lat dziewięćdziesiątych autor wiązał etap ryftowy z rozpadem paleokontynentu Rodinii i otwarciem się Oceanu Tornquista. Okres stopniowo wygasającej subsydencji termicznej od późnego środkowego kambru po środkowy ordowik został przez autora zinterpretowany jako etap post-ryftowy korelujący się w czasie z istnieniem pasywnego obrzeżenia kontynentalnego Baltiki. Ponowne przyspieszenie subsydencji od późnego ordowiku po późny sylur nastąpiło w konwergentnym środowisku tektonicznym związanym z kolizją Awalonii i Baltiki. Na obrzeżeniu Baltiki utworzyło się wtedy zapadisko przedgórskie kaledonidów, w którym mechanizmem subsydencji było fleksuralne uginanie płyty przedpola. Otrzymane krzywe subsydencji dla ordowiku i syluru mają kolankowy kształt, który uznaje się za wskaźnikowy dla depozycji w basenach przedgórskich. Tempo sylurskiej subsydencji stopniowo zwiększało się ku południowemu zachodowi, czyli w kierunku położenia hipotetycznego, kaledońskiego klina akrecyjnego. Interpretację tę wspierają obserwacje sedimentologiczne dotyczące późnosylurskiej dostawy do basenu dystalnych turbidytów ze źródła zlokalizowanego na południowym zachodzie. Historię basenu przedgórskiego kończą deformacje w kompresyjnym reżimie tektonicznym w lochkowie, których efekty są widoczne na sekcjach sejsmicznych z centralnej części basenu bałtyckiego na Litwie.

Podejście metodologiczne zastosowane w omawianej pracy jak również jakość danych i ich interpretacji nie budzi żadnych zastrzeżeń. Poza aspektem metodycznym, nowatorskim jak na tamte czasy, na podkreślenie zasługuje także przełomowy charakter regionalnych koncepcji geologicznych zawartych w artykule mgr. Pawła Poprawy. Wywarły one duży wpływ na dalsze badania ediakarsko-wczesnopaleozoicznych basenów osadowych naszego kraju i weszły już do kanonu geologii regionalnej Polski.

Ogólna ocena rozprawy

Rozprawa dokumentuje wysoki poziom fachowy doktoranta i dobre zrozumienie przez niego stosowanej metodologii oraz problemów geologicznych podejmowanych w jego badaniach. Mgr Paweł Poprawa był pionierem wykorzystania analizy subsydencji w polskiej geologii i wniósł największy wkład w upowszechnienie tej metody badawczej w naszym kraju. Jego koncepcje dotyczące ewolucji basenów sedimentacyjnych położonych na południowo-zachodnim obrzeżeniu kratonu wschodnioeuropejskiego miały przełomowy charakter i stanowiły punkt zwrotny w myśleniu geologów o strukturze i rozwoju tych sekwencji osadowych. Wywarły duże piętno na kierunkach badań prowadzonych na tym obszarze w ostatnich kilkunastu latach oraz sformułowanych hipotezach badawczych. Co więcej, badania mgr. Pawła Poprawy stworzyły ramy tektoniczne dla poszukiwań gazu łupkowego w Polsce. W tym przypadku, jak rzadko kiedy, badania o charakterze podstawowym znalazły bezpośrednie zastosowanie w geologii aplikowanej i przemyśle naftowym.

Za główne osiągnięcia recenzowanej rozprawy uznaję:

1. Wykazanie, że jednowymiarowa analiza subsydencji może być efektywnym narzędziem w badaniu ewolucji starych basenów osadowych oraz ustalaniu reżimów tektonicznych w jakich się rozwijały.
2. Udokumentowanie ryftowej genezy ediakarsko-wczesnokambryjskich basenów osadowych położonych na południowo-zachodnim obrzeżeniu kratonu wschodnioeuropejskiego oraz powiązaniu ich powstania z rozpadem paleokontynentu Rodinii.
3. Skorelowanie późnokambryjsko-środkowoordowickiego etapu ewolucji wspomnianych basenów ze środowiskiem pasywnego obrzeżenia paleokontynentu Baltiki.
4. Powiązanie późnoorowicko-późnosylurskiej sedymentacji w basenach na południowo-zachodnim obrzeżeniu kratonu wschodnioeuropejskiego z fleksuralnym uginaniem płyty w konwergentnym reżimie tektonicznym i uznanie tych basenów za zapadlisko przedgórskie kaledonidów.

Artykuły wchodzące w skład rozprawy doktorskiej mgr. Pawła Poprawy są tematycznie i logicznie spójne. Tworzą koherentny ciąg prac opartych na zbliżonej metodologii i skoncentrowanych na problemach geologicznych tego samego typu. Zaprezentowane interpretacje są dobrze uzasadnione wynikami przeprowadzonych analiz. Osiągnięcia rozprawy mają też ogólne, ponadregionalne znaczenie dla globalnych rekonstrukcji tektonicznych dotyczących ediakaru i wczesnego paleozoiku. Dokonane odkrycia mają potencjał do stania się punktem wyjścia dla dalszych badań i kolejnych międzynarodowych publikacji. Cała rozprawa jest napisana przejrzysto przy użyciu prawidłowej terminologii fachowej, co świadczy o dobrym opanowaniu przez mgr. Pawła Poprawę warsztatu badawczego w zakresie tektoniki i sedymentologii.

Podsumowanie recenzji

Recenzowana rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcia badawcze autora, świadczące o jego dużej wiedzy i opanowaniu warsztatu badawczego w zakresie tektoniki, sedymentologii i geologii regionalnej, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań.

Rozprawa zawiera oryginalne i metodycznie poprawne rozwiązanie zagadnienia naukowego, polegającego na ustaleniu mechanizmów subsydencji neoproterozoiczno-dolnopaleozoicznych basenów sedymentacyjnych na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego. Tym samym recenzowana praca jednoznacznie spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. Nr 65. poz. 595; tekst jednolity Dz.U. z 2017 r. poz. 1789). Na tej podstawie recenzent wnioskuje o dopuszczenie mgr. Pawła Poprawy do publicznej obrony przedstawionych w jego rozprawie tez. Ze względu na duże walory merytoryczne rozprawy, wnioskuje również, aby wystąpić o jej wyróżnienie stosowną nagrodą.

Kraków, 08 sierpnia 2018 r.