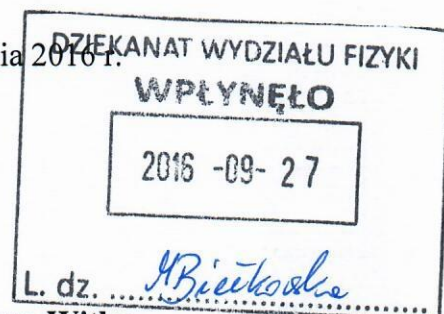


Dr hab. Barbara Kremer
Instytut Paleobiologii PAN
ul. Twarda 51/55
00-818 Warszawa

Warszawa, 26 września 2016 r.



Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Piotra Przemysława Witka

pt. Symulacje powstawania i rozwoju delt rzecznych w środowiskach Ziemi i Tytana

Recenzowana rozprawa napisana została pod kierunkiem dr hab. Leszka Czechowskiego w Zakładzie Fizyki Litosfery, Instytutu Geofizyki, Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Rozprawa poświęcona jest modelowaniu komputerowemu delt rzecznych na księżycu Saturna Tytanie i w środowisku ziemskim przy założeniu różnych parametrów wyjściowych.

Centralną tematyką rozprawy są procesy powierzchniowe zachodzące na Tytanie związane z formowaniem delt rzecznych. Dzięki zdjęciom z misji Huygens na Tytanie odkryto szereg form sedimentacyjnych i morfologicznych podobnych do ziemskich, w tym pola wydmore oraz sieć kanałów rzecznych, tworzącą charakterystyczny krajobraz, a także jeziora i morza wypełnione ciekłymi węglowodorami. Czyni to Tytan miejscem wyjątkowym, pozwalającym studiować procesy geomorfologiczne w warunkach odmiennych od ziemskich i marsjańskich. Część materiałów zawartych w rozprawie została opublikowana w 2015 roku w liczącym się czasopiśmie międzynarodowym *Planetary and Space Science* we współautorstwie z promotorem (tytuł artykułu: *Dynamical modelling of river deltas on Titan and Earth*).

Rozprawa napisana jest w języku polskim, liczy 82 strony i podzielona jest na pięć rozdziałów: 1. Wstęp, 2. Model numeryczny, 3. Rezultaty, 4. Dyskusja i interpretacje i 5. Wnioski. Bibliografia licząca 96 pozycji znajduje się na końcu rozprawy i zawiera w znakomitej większości prace anglojęzyczne.

Rozdział pierwszy rozprawy zawiera podstawowe informacje geologiczne o Tytanie. Scharakteryzowano powierzchnię badanego księżyca, jego rzeki, jeziora oraz cykl metanu. Rozdział zawiera też informacje o deltach rzek na Ziemi i Tytanie. Krótkie wprowadzenie w zagadnienie delt na Ziemi podparto klasyczną figurą z pracy Galloway'a (1975), przedstawiającą system klasyfikacji delt rzecznych w oparciu o trzy procesy: fluwialne, falowe i pływowe. Tematyka ta została przedstawiona w sposób skrótowy i niepełny. Moim zdaniem praca zyskałaby gdyby ten rozdział został nieco rozbudowany.

W rozdziale drugim zamieszczono rozważania na temat zastosowanego w pracy modelu numerycznego, przedstawiono równania oraz założenia modelu. Modelowany obszar o kształcie prostokąta obejmował prostopadły do linii brzegowej końcowy odcinek doliny rzecznej oraz fragment jeziora. Analizie poddano przepływ cieczy oraz transport osadów. Z powodu ograniczonej wiedzy o warunkach powierzchniowych Tytana, w zastosowanym modelu przyjęto wiele uproszczeń, które są omówione w tej części pracy.

Rozdział trzeci przedstawia rezultaty symulacji komputerowych. W dwóch podrozdziałach omówiono wyniki modelowania z zadaniem rozkładem uziarnienia, badania wpływu wielkości ziarna i natężenia przepływu. Symulację transportu i osadzania ziaren

przeprowadzono dla ziaren lodu o średnicy 0,05; 0,1; 1,0 i 10 mm. Natężenie przepływu na początku doliny rzecznej miało zadane wartości 10, 20, 50 i 100 ms⁻¹. Czas symulacji wynosił 100 dni ziemskich. Symulacje pokazały wyraźne różnice w ukształtowaniu powierzchni delty pomiędzy porównywalnymi formami dla Ziemi i Tytana. Również w symulacji płaskiej delty płatowej na Tytanie i Ziemi, w warunkach Tytana powstawały formy znacznie różniące się kształtem i przebiegiem rozwoju od form ziemskich. Przeprowadzone symulacje potwierdziły wcześniejsze wyniki uzyskane przez Burr et al. (2006) wskazujące, że transport osadów rzecznych na Tytanie jest efektywniejszy niż w warunkach ziemskich. W przypadku wyznaczania oporów dna zastosowano dwie metody, których wyniki różniły się, co zilustrowano na figurach porównawczych.

Rozdział czwarty zawiera dyskusję i interpretację uzyskanych danych. Porównano w nim wyniki dla Ziemi i Tytana, przedyskutowano oraz zasygnalizowano problemy wynikające z różnych warunków geologicznych i fizycznych panujących na obu ciałach niebieskich. W ostatnim podrozdziale, zatytułowanym „Zastosowanie dla Tytana”, znajdziemy krótką dyskusję nad danymi pochodzącymi z orbitera Cassini, sugerującymi obecność delt rzecznych i jezior na powierzchni Tytana.

Rozdział piąty zawiera wnioski, które zostały uporządkowane tematycznie, tj. rozdzielono wnioski dotyczące ewolucji delty od wniosków dotyczących transportu osadów. Modelowanie wykazało, że w przypadku Tytana luźne osady dna mogą być erodowane znacznie silniej niż na Ziemi. Zarówno ziarna małe, jak i większe, mogą być na Tytanie transportowane dalej od ujścia rzeki. Skutkuje to powstawaniem wydłużonych płycizn poza obszarem typowego stożka. Takie różnice są związane z mniejszą gęstością względną osadów na Tytanie. Innym ważnym wnioskiem jest to, że transport osadów w rzekach na Tytanie jest bardziej efektywny niż w rzekach na Ziemi – przy założeniu takiego samego natężenia przepływu i objętości przepływających osadów.

Oceniając pracę, stwierdzam, że Doktorant podjął się trudnego zadania, modelując transport osadów i powstawanie delt rzecznych na odległym ciele planetarnym, o którego geologii i warunkach powierzchniowych wiemy bardzo niewiele. Modelowanie powstawania delt rzecznych w warunkach cyklu węglowodorów opartego na metanie-etanie ma istotne znaczenie dla zrozumienia procesów erozyjno-depozycyjnych zachodzących w materiale i warunkach odmiennych od ziemskich. Obserwacje satelitarne skonfrontowane z modelami komputerowymi przeprowadzonymi dla wybranych parametrów mogą znacznie pomóc w interpretacji parametrów środowiska Tytana i genezy jego delt rzecznych.

Pomimo oczywistych zalet praca zawiera kilka uchybień i nieścisłości, które wymagają uzupełnienia bądź dodatkowego wyjaśnienia. Przedstawiam je poniżej.

We wstępie rozprawie nie zostały jasno sformułowane ani cele pracy ani zadania badawcze. Wydaje się, że podstawowym celem pracy jest m.in. odtworzenie na drodze modelowania komputerowego procesów wpływających na tworzenie się delt na Tytanie, co niewątpliwie pogłębi niezwykle ubogą wiedzę o warunkach ich powstawania. We wnioskach pracy brak jasno postawionych hipotez badawczych. Ponieważ obrona rozprawy doktorskiej ma polegać właśnie na przekonaniu do słuszności postawionych w pracy tez, ich nieczytelne sformułowanie stanowi pewien mankament.

Wyraźnym mankamentem jest również ubogość cytowanej literatury. Literaturę bezpośrednio związaną z tematem rozprawy doktorant wykorzystał skromnie. Skromnie zacytowano też prace sedimentologiczne dotyczące bezpośrednio powstawania, przebiegu formowania i modelowania delt ziemskich. Literatura dotyczące tego tematu jest niezwykle bogata a sam

problem złożony. Temat ten został omówiony jednak dość lakonicznie i nie daje dobrego wprowadzenia w zagadnienia powstawania delt i przepływu rzek na innych ciałach planetarnych. Skromna lista referencji należałoby uzupełnić o co najmniej kilka pozycji dotyczących bezpośrednio tematu doktoratu, np. Jonathan I. Lunine and Ralph D. Lorenz (2009) *Rivers, Lakes, Dunes, and Rain: Crustal Processes in Titan's Methane Cycle*, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*; Hayes, A.G. (2016) *The Lakes and Seas of Titan*, opublikowanych w tym roku w *Annu. Rev. of Earth and Planet. Sci.*; Komar, P. D. (1973), *Computer Models of Delta Growth due to Sediment Input from Rivers and Longshore Transport*, *Geol. Soc. Am. Bul.* 84: 2217–2226; czy Aharonson, O., Hayes, A. G. Lopes, R. M. C. Lucas, A. Hayne, P. Perron, T. Soderblom L. A. (2013) *Titan's Surface Geology*, In: I. Mueller-Wodarg (Ed) *Titan: Surface, Atmosphere, and Magnetosphere*. 646pp., Cambridge Planetary Science Series, Cambridge University Press, Cambridge

Mało informacji zamieszczono o rzekach i deltach na Marsie. Mars nie jest, co prawda, tematem rozprawy, ale jest to jedyny, poza Ziemią, obiekt planetarny, na którym tak wyraźnie można obserwować systemy rzeczne, i który ma dość dobrze rozpoznany system hydrologiczny, jaki w przeszłości geologicznej na tej planecie istniał. Praca byłaby pełniejsza gdyby przedstawione tutaj modelowanie można było skonfrontować z sytuacją na Marsie i poszerzyć rozprawę o modele ewolucji jego delt.

Do wyjaśnienia, moim zdaniem, pozostaje szereg terminów geologicznych i fizycznych użytych w pracy nie zawsze zgodnie z ich definicją, bądź pozostawionych bez zdefiniowania. Przykładem jest użycie terminu pustynia w odniesieniu do środowiska na Tytanie (str. 10). Czy rzeczywiście na Tytanie występują tereny pustynne? Pustynia jest terminem ściśle zdefiniowanych. Jest to obszar, na którym ewaporacja przewyższa precypitację. Przyjmuje się, że precypitacja poniżej 25 cm/rok spowoduje pustyńnienie obszaru w zasadzie bez względu na temperaturę (*Dictionary of the Environment*, second edition, New York University Press, 1983). Jest to więc obszar suchy lub półsuchy (nie licząc pustyń lodowych). Dane dotyczące opadów na Tytanie są bardzo skąpe i niepewne i nie dają podstaw do wydzielania stref pustynnych. Z obszaru równikowego Tytana opisano, co prawda, wydmy, ale ich morfologia, skład chemiczny, wiek i geneza są słabo rozpoznane. Ponadto wydmy nie są równoznaczne z pustynią.

Dość kontrowersyjnym wydaje się stwierdzenie o występowaniu osadów ewaporatowych na Tytanie (str. 7). Nie jest to zagadnienie związane bezpośrednio z tematem pracy, a Doktorant cytuje jedynie prace opublikowane na ten temat. Ponieważ jednak termin ewaporaty zastał użyty w doktoracie w kontekście Tytana, wymaga to komentarza bądź sprostowania. Termin ewaporaty odnosi się do skał osadowych, tj. soli wytrąconych z roztworu wodnego na skutek ewaporacji. W przypadku Tytana należy pamiętać, że chodzi tu o zupełnie inne związki chemiczne niż te powstałe na drodze ewaporacji z wody na Ziemi i na Marsie, takie jak węglany, siarczany czy chlorki. Skład chemiczny przypuszczalnych „ewaporatów” z Tytana nie jest znany. Eksperymenty wykazały, że z mieszaniny węglowodorów metanu i etanu oraz azotu w wyniku ewaporacji mogą powstać HC₃N (cyjanoacetylen) i C₂H₂ (acetylen) (Cordier et al. 2013). I takie związki należy rozumieć pod pojęciem ewaporatów na Tytanie.

W pracy został użyty termin – „uśrednienie po głębokości rzeki” (str. 19). Jest to zwrot niezrozumiały i powinien zostać objaśniony, tym bardziej, że dotyczy bezpośrednio parametrów modelu.

Kolejnym terminem jest „prędkość sedymentacyjna” (m.in. str. 17, 20 itd.). Poza formułą matematyczną Doktorant nie podaje jego definicji. Czy jest to prędkość opadania ziaren w wodzie? Cytowana przez Doktoranta literatura wskazuje, że chodzi tu o tzw. *settling velocity*, czyli o prędkość opadania, a nie prędkość sedymentacyjną, jak przetłumaczył ten termin Doktorant. Nasuwa się zatem pytanie, jaki jest jej związek z prawem Stokesa opisującym prędkość swobodnego opadania cząstek kulistych w zawiesinie? Prawo to opisuje opadanie ziarna w nieruchomym słupie cieczy (kolumnie wody). W przypadku modelowanym sedymentacja odbywa się w wodzie płynącej (a być może i w turbulentnej). Moim zdaniem ta część pracy wymaga bardziej precyzyjnego objaśnienia.

Zwrot „homopiknalny” (ang. homopycnal inflow) został, moim zdaniem, niepoprawnie spolszczony. Termin ten pochodzi od słowa pyknoklina (patrz Gradziński et al 1986), więc przepływ będzie homopyknalny.

Kolejna uwaga dotyczy pojęcia stożek napływowy? Czy na Tytanie tworzą się stożki napływowe? Przedyskutowanie ich wydaje się potrzebne, ponieważ symulacje rozwoju delt wykazały powstanie form, które w przekroju podłużnym przypominają właśnie stożki napływowe. Stożki napływowe to struktury, których powstanie nie jest bezpośrednio związane ze środowiskiem jeziorno-morskim, a raczej z korytami roztokowymi lub ciekami wodnymi (np. rzeki okresowe). W profilu otrzymanym w modelowaniu brak jest wyraźnej równi deltowej i skłonu delty, za to forma spłaszcza się stopniowo, co jest charakterystyczne dla stożków napływowych. Być może wynika to ze jakości zdjęcia, na którym kolory szarości są słabo rozróżnialne. Bardzo pomocne byłoby tutaj przekroje podłużne wzdłuż modelowanych delt, których brakuje w pracy.

Komentarza wymaga Figura 2.1, która jest jedną z trzech kolorowych figur i akurat w jej przypadku użycie koloru wydaje się niezbyt fortunate. Figura ta przedstawia początkowe ukształtowanie dna w modelach. Z górnego panelu figury wynika, że niwelacja dna kanału i jeziora jest na jednym poziomie (kolor równo niebieski). Na panelu dolnym widać, że dno jest nachylone w kierunku jeziora. Wymaga to wyjaśnienia.

Doktorant używa w pracy terminów „zbocze delty” (str. 52) i „stok delty” (str. 58, 69). W przyjętej polskiej terminologii sedymentologicznej używany jest termin „skłon delty”. Zbocze i stok w geomorfologii stosuje się do określenia innych form.

W pracy zaskakuje skromna strona ilustracyjna. Figury są czarno-białe i niewielkich rozmiarów, a legenda w większości nieczytelna. Figury przedstawiające powstałe w wyniku modelowania delty są bardzo słabo czytelne, a legenda zawiera kilkanaście odcieni szarości, które na samej figurze są trudne do wychwycenia. Poziome smugi na figurach, pochodzące zapewne z niskiej jakości wydruku, sprawiają wrażenie elewacji. Praca zyskałaby gdyby panele z graficznymi wynikami symulacji były większych rozmiarów a figury wielopanelowe przedstawione dodatkowo na rozkładanych planszach i w kolorze.

Przydatne byłoby zamieszczenie słownika terminologii użytej w pracy, zwłaszcza tej dotyczącej zagadnień modelowania, np. liczba Rouse’a, itd. Praca byłaby łatwiejsza w odbiorze.

W pracy znajdują się drobne błędy literowe i niedopatrzenia, np. odnośnik u dołu strony 8 nie ma zacytowanego źródła, a cytowanie Bagnold (1966) nie znalazło się w spisie literatury. Drobne potknięcia językowe takie, jak brak "o" w zdaniu "bardzo ograniczoną wiedzę

środowisku Tytana", czy brak wielkich liter na początku zdań: str. 24, 32, 42, 58 (x2) nie umniejszają tego, że przedłożona rozprawa jest napisana poprawnym i zrozumiałym językiem. Na uwagę zasługuje część pracy zatytułowana „Zastosowanie dla Tytana”, w której Doktorant analizuje konkretne obiekty na powierzchni Tytana przypominające delty rzeczne i podejmuje próbę interpretacji ich genezy.

Pomimo, iż zastosowane w rozprawie modelowanie komputerowe związane jest z wieloma uproszczeniami daje ono przybliżony wgląd w możliwość powstawania delt na Tytanie, co czyni tę pracę oryginalną i wnoszącą istotny wkład w rozwój dyscypliny. Przedstawione symulacje, bez wątpienia, pozwolą na lepsze rozpoznanie procesów kształtujących powierzchnię Tytana. Jest to z pewnością opracowanie nowatorskie i jak dotąd pierwsze i udane modelowanie wielkoskalowych struktur sedymentacyjnych na tym księżycu. Wykonane przez Doktoranta modelowanie oraz jego interpretacja świadczą niewątpliwie o umiejętności właściwego doboru i wykorzystania metod numerycznych do uzyskania zamierzonych wyników.

W świetle przedstawionych argumentów stwierdzam, że przedstawiona rozprawa spełnia bez zastrzeżeń wymagania stawiane pracom doktorskim (zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 r., Dz. Ustaw Nr 65, poz. 595) i wnioskuję o dopuszczenie magistra Piotra Przemysława Witka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

