

Funkcjonowanie systemów drenażu lodowców Svalbardu na podstawie danych *in-situ*, danych teledetekcyjnych i modelowania

Léo Decaux

Streszczenie

Drenaż wód roztopowych i opadowych odgrywa istotną rolę w zrozumieniu dynamiki lodowców i ich bilansu masy (MB). Brakuje jednak kompleksowej wiedzy dotyczącej krążenia wody w obrębie wewnętrznego systemu drenażu (IDS) lodowca. Ponieważ zachowanie wód subglacjalnych odgrywa decydującą rolę w dynamice lodowców, wymaga ono szczególnej uwagi, zwłaszcza w kontekście ocieplenia klimatu, które intensyfikuje ablację i prowadzi do zwiększonej produkcji wód roztopowych. Ponadto, istotne jest rozpoznanie wpływu występowania przyspieszeń ruchu lodowców w trakcie zimy, która trwa dwa razy dłużej niż sezon letni. Zdarzenia te nie tylko istotnie warunkują roczną prędkość lodowców, ale także stanowią potencjalną, znaczącą przyczynę podnoszenia się poziomu mórz. Dlatego badanie i zrozumienie dynamiki wód subglacjalnych i ich interakcji z systemami drenażu sub- i inglacjalnego mają kluczowe znaczenie dla kompleksowego zrozumienia zachowania lodowców i ich wpływu na podnoszenie się poziomu wszechoceanu.

Woda pochodząca z powierzchni lodowca najczęściej stanowi główne źródło zasilania systemu drenażu subglacjalnego. Duży wpływ na ten system mają supra- i inglacjalne kompleksy odwadniające, które zbierają wodę z topnienia lodowców i opadów atmosferycznych oraz szybko dostarczają ją poprzez studnie lodowcowe i strefy uszczelinione, nazywane obszarami zasilania wodą (WIA), a następnie kanałami inglacjalnymi, do określonych punktów w podłożu lodowca. O ile hydrologii subglacjalnej poświęcano dotychczas sporo uwagi, ze względu na jej bezpośredni związek z dynamiką lodowca, to na zrozumieniu aspektów supra- i inglacjalnych drenażu koncentrowano się w ograniczonym zakresie. Najczęściej modele kanałów subglacjalnych bazują na gradientach potencjału hydrologicznego, pomijając system drenażu powierzchniowego. Ponadto, pomimo, że poczyniono postępy w identyfikowaniu kluczowych cech kanałów inglacjalnych, kilka elementów tego systemu pozostaje niezbadanych. Większość badań koncentrowała się dotychczas na lodowcach pod względem termicznym należących do umiarkowanych, w okresie ablacyjnym, a techniki pomiarowe opierały się głównie na metodach pośrednich. Bezpośrednie obserwacje dotyczyły jedynie pomiarów punktowych i charakteryzowały się brakiem możliwości prowadzenia długoterminowych badań z dużą rozdzielczością czasową. Ponadto, o ile mi wiadomo, nie przeprowadzono badań, które wskazywałyby na bezpośredni związek między obserwacjami fluktuacji wód inglacjalnych w systemie skanalizowanym a prędkością lodowca.

Celem pracy jest lepsze zrozumienie funkcjonowania poszczególnych elementów składowych systemu hydrologicznego lodowca oraz zbadanie ich wzajemnych powiązań. Dodatkowo przedmiotem analiz jest wpływ warunków meteorologicznych na IDS i ocena wynikającej z tego dynamicznej odpowiedzi lodowców.

W celu osiągnięcia powyższych celów, wykorzystałem zróżnicowane dane i metody. W pierwszej kolejności przeanalizowano ewolucję systemu drenażu supraglacialnego dwóch lodowców Svalbardu: kończącego się na lądzie lodowca Werenskioldbreen oraz uchodzącego do morza Lodowca Hansa. Analiza ta została przeprowadzona w skali rocznej oraz kilku dekad, wykorzystując wysokorozdzielcze zobrazowania satelitarne. Następnie, opracowano modele sieci kanałów subglacialnych lodowców w odniesieniu do sezonu ablacyjnego 2015 roku. W procesie modelowania układu kanałów podlodowcowych zastosowano dwa różne podejścia: pierwsze - uwzględniające zasilanie powierzchniowe wodą, drugie zakładające dyskretne (punktowe) zasilanie wodą, a następnie przeprowadzono analizę porównawczą wyników. Ponadto, opracowałem nowatorską metodę instalacji czujników ciśnienia, celem pomiaru zmian poziomu wody w kanałach inglacialnych, w tym w jaskiniach i studniach lodowcowych Lodowca Hansa. Podejście to pozwoliło na przeprowadzenie ciągłego pomiaru fluktuacji poziomu wody w kanałach wewnątrzlodowcowych z rozdzielczością czasową 30 minut przez okres dwóch lat hydrologicznych. W rezultacie, łącząc dane zmian poziomu wody inglacialnej z danymi meteorologicznymi, wyodrębniłem cztery okresy, składające się na rok hydrologiczny. Wreszcie, poprzez połączenie fluktuacji wód w kanałach lodowcowych z pomiarami prędkości na Lodowcu Hansa, stwierdziłem bezpośrednie zależności między nimi.

Stwierdziłem, że ablacja powierzchniowa ma większy wpływ na wielkość odpływu wody z lodowca niż opady, co uwidacznia dominujący wpływ topnienia powierzchniowego na ogólną dynamikę odpływu. Z kolei, zmiany w systemie drenażu supraglacialnego na przestrzeni kilku dekad przekładają się na dostosowanie systemu drenażu subglacialnego, głównie na skutek aktywacji lub dezaktywacji WIAs. Jednak konsekwentne ułożenie WIAs wzdłuż tych samych osi podlodowcowych sugeruje brak fundamentalnej reorganizacji systemu drenażu subglacialnego. Ponadto, obecność dobrze rozwiniętej pokrywy śnieżnej na powierzchni opóźnia wzrost poziomu wody wewnątrz lodowca i zmniejsza tempo wypełniania kanałów inglacialnych. Dodatkowo, zaobserwowany transfer wody z systemu podlodowcowego do systemu inglacialnego potwierdza dotychczasową wiedzę teoretyczną. Pojemność hydrauliczna systemu drenażu subglacialnego jest warunkowana wcześniejszym przebiegiem zasilania systemu wodą, a okresy zwiększonej pojemności hydraulicznej są związane z gromadzeniem wody wewnątrz lodowca. Obserwowane w okresie zimowym fluktuacje poziomu wody dowodzą, że system podlodowcowy nie musi być w tym sezonie całkowicie niewydajny. Oznacza to, że system drenażu subglacialnego pozostaje względnie aktywny nawet zimą, co podważa ogólnie przyjęty pogląd o jego niewydajności w tym sezonie. Nie oznacza to jednak, że system drenażu nigdy nie jest niewydajny lub słabo wydajny. Jednak przez większość okresu zimowego woda lodowcowa utrzymuje się w systemie inglacialnym. Okres przejściowy między zimą a latem, a także głębokie odwilże zimą, prowadzą do zmian w wydajności systemu drenażu podlodowcowego. W tych okresach system przechodzi ze stanu niewydajnego lub słabo wydajnego w stan wydajny, ułatwiając zwiększony przepływ i drenaż wody. W sezonie letnim system drenażu subglacialnego działa zawsze wydajnie. Jednak system stale dostosowuje swoją pojemność hydrauliczną do zmieniającej się ilości dostarczonej wody, wykazującej znaczną zmienność. System drenażu podlodowcowego wykazuje imponującą zdolność do radzenia sobie z dynamicznym charakterem dostawy wody w trakcie miesięcy letnich, dostosowując swoją pojemność w okresie krótszym niż jeden dzień, aby utrzymać wydajność przez cały

sezon. Opady deszczu powodują skuteczne wypełnienie systemu inglacjalnego, w szczególności w obecności lekko dodatniej temperatury powietrza, gdy system jest mało wydajny. Ponadto, stwierdziłem wyraźną zależność między wahaniami poziomu wody inglacjalnej, a prędkością lodowca. Skala dynamicznej odpowiedzi lodowca jest warunkowana wielkością zasilania wodą i wydajnością systemu drenażu subglacjalnego. W zależności od początkowego stanu IDS, zimowe odwilże mogą znacząco wpłynąć na dynamikę lodowca. Wysoka wydajność IDS odgrywa kluczową rolę w osłabianiu skutków zimowych odwilży. Im większa wydajność systemu, tym mniej wody jest magazynowanej i tym słabsza jest dynamiczna reakcja lodowca (odwrotnie, gdy IDS jest wydajny). Z tego powodu zrozumienie dynamicznej odpowiedzi lodowca na warunki zewnętrzne wymaga uwzględnienia wcześniejszego stanu i ewolucji systemu hydrologicznego lodowca. Wreszcie, gromadzenie danych o wysokiej rozdzielczości czasowej ma kluczowe znaczenie dla uchwycenia pełnego obrazu dynamiki wód polodowcowych, ponieważ epizody napełniania i opróżniania często mają miejsce w interwałach czasowych krótszych niż jeden dzień.

Podsumowując, należy zachować ostrożność odnośnie reprezentatywności pomiarów punktowych ze względu na znaczną zmienność czasową wydajności IDS w sezonie ablacyjnym. Przyszłe modele hydrologii i dynamiki lodowców powinny uwzględniać znacznie wyższą dynamikę IDS niż wcześniej zakładano. Ignorowanie w modelowaniu dynamicznego zachowania lodowca potencjalnego wpływu zimowych ociepleń i odpowiedniej reakcji lodowca na wahania wody w IDS może prowadzić do błędnych prognoz skali zmian dynamiki lodowców. To z kolei prowadzi do zmniejszenia wiarygodności szacunków wzrostu poziomu mórz.