



Abstract

During the second decade of the 21st century, central Chile was hit by an exceptionally long and intensive drought, which has continued to the present day. As a result, the meltwater of the Andean glaciers has become particularly important for the water input to the rivers of this densely populated region. This drought, sometimes referred to as a “mega-drought”, is interpreted to be a part of a regional trend of desertification and an example of the conditions that are expected to occur in the Andes and other mountain regions in the later decades of the 21st century. Such strong climatic changes have a strong impact on glaciers. The glacier’s surface plays a key role in the interactions between a glacier and its surrounding environment. The phenomena observed on a glacier’s surface are a direct reaction to external forces. This way, they enable the assessment of a trajectory of changes occurring during the drought and can potentially predict the future fate of the glacier.

This thesis is devoted to the description and analysis of the processes occurring on the surface of a mountain glacier under a long-lasting drought. Universidad Glacier has been chosen as the subject of the study. Located in central Chile, the glacier may be considered to be a representative example of the trends influencing the glaciers of the Chilean-Argentinian Andes. The work comprehensively describes the changes and explains the interactions between the components of the glacier’s surface environment.

To fulfil the goals of the work, remote sensing data and methods were used. Digital elevation models made it possible to measure the rate at which the glacier’s surface is lowering and to assess the nature of changes in the drainage network in the lower part of the glacier. With the help of an innovative spectral index it was possible to map the presence of dust and debris on the surface of the glacier. High-resolution satellite imagery served to precisely chart the extent of the glacier and the course of the snowline. To analyze these aspects, object-based image analysis was used in conjunction with a machine learning classification algorithm. The procedure was developed and validated in a secondary task of detection of icebergs in a proglacial lake of San Quintín glacier in Patagonia.

Long-term warming and decreases in amounts of precipitation intensified the processes taking place on the surface of the glacier. Surface darkening was noted in every section of the glacier. In the upper section, surface darkening was caused by the disappearance of the snow cover, revealing darker glacial ice. On the glacier’s tongue, the reason for the drop in albedo is the accumulation of rock material. Interactions between the accumulation of rock material and the melting of glacial ice led to the formation of local feedback loops.

In the large glacial cirques, the rise in the snowline was the reason why glacial ice was revealed and also led to a decrease of albedo, which in turn contributed to a further increase in melting. The snowline moved from 3500 m a.s.l. in 2013 to 4100 m a.s.l. in 2022, thus changing the character of half of the glacier surface from an accumulation zone to an ablation zone. In this area, the melting of an entire firn was noted outside the limited area constantly covered by snow. Small, secondary glacial cirques became detached from the main trunk of the glacier. The accumulation of debris is a sign of their future transformation into rock glaciers.

In the lower section of the glacier, the effect of a positive feedback loop between the accumulation of debris and ice melting resulted in an acceleration in the lowering of the surface of the revealed ice as compared with the neighboring rocky moraines. The same processes prevented the conversion of the glacier’s tongue into an area fully covered by debris. With the intensification of melting, the meltwater was channelled to the lower part of the revealed ice while washing away sediments. The increased rate of retreat and accumulation of debris led to a decrease in albedo around the glacier’s front and the potential advection of warmed air, which in turn increases melting and retreat.

Podgwaśki

SEKRETARIAT NAUKOWY INSTYTUT GEOFIZYKI PAN	
WPLYNEŁO	
20 12 2023	
nr dz.	Zal.
Ref.	

Streszczenie

W drugiej dekadzie XXI wieku środkowe Chile zostało dotknięte wyjątkowo intensywną, długotrwałą suszą. W jej trakcie woda roztopowa z andyjskich lodowców nabrała szczególnego znaczenia dla zasilania w wodę rzek tego gęsto zaludnionego regionu. Susza ta, zwana „megasuszą”, interpretowana jest jako część regionalnego trendu pustynnienia i przykład warunków oczekiwanych w Andach i innych obszarach górskich w późniejszych dekadach XXI wieku. Tak intensywne zmiany klimatyczne mają znaczący wpływ na lodowce. Kluczową rolę w interakcji pomiędzy lodowcem, a otaczającym go środowiskiem pełni powierzchnia lodowca. Zjawiska obserwowane na powierzchni lodowca pokazują jego bezpośrednią reakcję na czynniki zewnętrzne. Pozwalają one ocenić trajektorię zmian zachodzących jako odpowiedź na zewnętrzne bodźce i potencjalnie prognozować przyszły los lodowca.

Niniejsza dysertacja poświęcona jest opisowi i analizie procesów zachodzących na powierzchni lodowca górskiego w warunkach długotrwałej suszy. Za przedmiot badań wybrano lodowiec Universidad, położony w środkowym Chile. Traktowany on jest jako reprezentatywny obiekt dla śledzenia zmian zachodzących na lodowcach Andów Chilijsko-Argentyńskich. Praca przedstawia kompleksowy obraz przemian i objaśnienie interakcji pomiędzy poszczególnymi komponentami środowiska a tym, co dzieje się na powierzchni lodowca.

Do realizacji celów pracy wykorzystano dane i metody teledetekcyjne. Numeryczne modele terenu pozwoliły wyznaczyć tempo obniżania się powierzchni lodowca oraz charakter zmian sieci drenażu w dolnej części lodowca. Zdjęcia satelitarne wykorzystano do śledzenia zmian albedo i pokrycia powierzchni lodowca. Przy pomocy innowacyjnego wskaźnika spektralnego skartowano obecność osadów, w tym pyłu i gruzu, na powierzchni lodowca. Wysokorozdzielcze zdjęcia satelitarne posłużyły do precyzyjnego wyznaczenia zasięgu lodowca oraz linii śnieżnej, często utożsamianej z linią równowagi. Do ich analizy wykorzystano obiektową analizę obrazów w połączeniu z klasyfikacją algorytmem uczenia maszynowego. Procedura ta została opracowana i zweryfikowana w pobocznym zadaniu wykrywania gór lodowych w proglałacjalnym jeziorze lodowca San Quintín w Patagonii.

Długotrwałe ocieplenie i spadek sum opadów nasiliły procesy zachodzące już wcześniej na powierzchni lodowca, powodując spadek albedo (ciemnienie) na całym jego obszarze. W górnych partiach przyczyną jest zanik pokrywy śnieżnej i odsłanianie ciemniejszego lodu lodowcowego. Na jęzorze lodowca przyczyną spadku albedo jest akumulacja materiału skalnego. Interakcje pomiędzy akumulacją materiału skalnego a topnieniem lodu lodowcowego doprowadziły do tworzenia się lokalnych sprzężeń zwrotnych. W dwóch dużych cyrkach lodowych podniesienie linii równowagi spowodowało odsłonięcie lodu lodowcowego i obniżenie albedo, które przyczyniło się do dalszej intensyfikacji topnienia. Wysokość linii równowagi wzrosła z 3500 m n.p.m. w 2013 r. do 4100 m n.p.m. w 2022 r., zmieniając charakter połowy powierzchni lodowca ze strefy akumulacji na strefę ablacji. W tym obszarze stopniał prawie cały firn poza obszarem stale pokrytym śniegiem w najwyższych partiach lodowca. Małe, poboczne cyrki lodowe odłączyły się od głównej części lodowca. Akumulacja materiału skalnego zapowiada ich zmianę w lodowce gruzowe w okresie najbliższych lat. W niższych partiach lodowca, skutkiem dodatniego sprzężenia zwrotnego pomiędzy akumulacją materiału skalnego a topnieniem lodu było przyspieszone obniżanie się powierzchni odsłoniętego lodu w porównaniu z sąsiadującymi morenami. Te same procesy zapobiegły zamianie jęzora w strefę całkowicie pokrytą gruzem. W miarę intensyfikacji topnienia, woda roztopowa kanalizowana była do niższej części odsłoniętego lodu wypłukując stamtąd osady. Przyspieszająca regresja czoła i akumulacja gruzu prowadzą do obniżenia albedo wokół czoła lodowca i potencjalnej adwekcji nagrzanego powietrza, wzmagającego topnienie i regresję.

Włodarczyk