

ACADEMIA geologia

CIENKIE PŁATKI, GRUBY LÓD

Gdy spada temperatura, zmienia się stan skupienia wody. Rzeki, jeziora i morza skuwa lód, para wodna w atmosferze zamienia się w kryształki śniegu, a woda pod powierzchnią gruntu przyjmuje postać drobnych soczewek lub żył lodowych. W wysokich górach i w obszarach polarnych tworzą się lodowce i czapy lodowe. Wszystkie te duże i małe, widoczne i niewidoczne formy występowania wody w stałym stanie skupienia na kuli ziemskiej tworzą kriosferę.

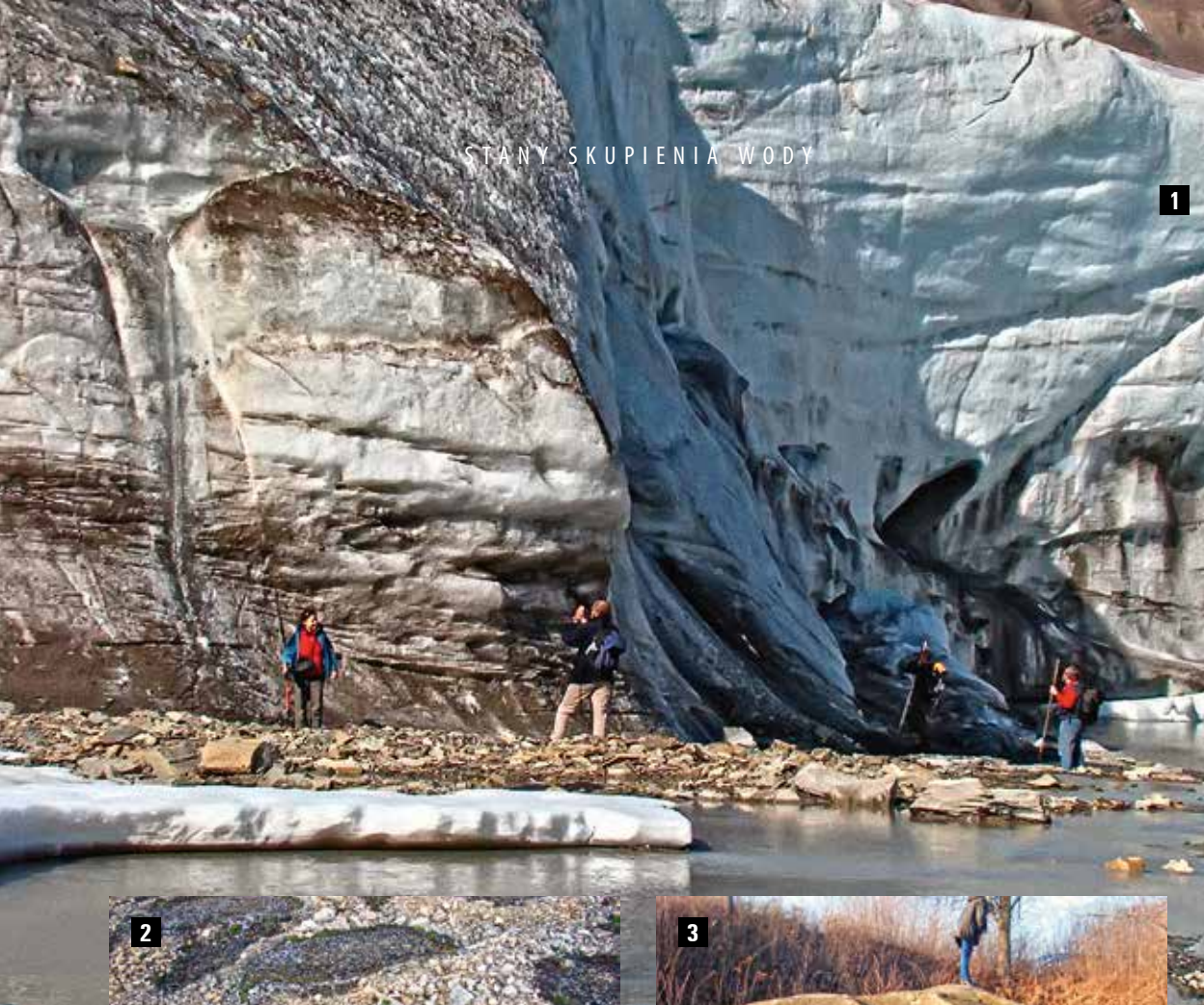
dr hab. Jan Dzierżek

Wydział Geologii UW

Najbardziej spektakularnymi elementami kriosfery wydają się lodowce i łądolody. Lodowce górskie powstają w sprzyjających warunkach orograficznych i klimatycznych, w miejscach, gdzie gromadzący się śnieg ma szansę się nie roztopić. Są to tak zwane pola firnowe, tam śnieg przeobraża się w firn. Firn to agregaty ziaren lodowych powstałe ze stopionych pod wpływem słońca i skonsolidowanych kryształków i płatków śniegu. Śnieg dostarczany do pól firnowych pochodzi nie tylko z opadu, ale też może być nawiany lub dostarczony przez lawiny. Pod wpływem wielokrotnego rozmarzania i zamarzania oraz przyrastającego ciężaru nadległych mas nowego śniegu masy firnu gęstnieją. Podczas gdy gęstość śniegu, w zależności od jego rodzaju mieści się w szerokich ramach 0,004–0,4 g/cm³, firn ma gęstość 0,4–0,8 g/cm³. W procesie dalszego przeobrażania firnu powstaje mleczny lód firnowy, z dużą zawartością pęcherzyków powietrza (gęstość 0,8–0,91 g/cm³) i wreszcie krystaliczny lód lodowcowy. Kryształy czystego lodu lodowcowego absorbują wszystkie kolory światła słonecznego, a przepuszczają światło niebieskie, stąd jego piękna barwa. Proces metamorfozy śniegu w nie-

bieski lód lodowcowy trwa paręset lat. Do powstania kryształu lodu o grubości 1 cm potrzeba około 15 m świeżego śniegu. Z pól firnowych, znajdujących się powyżej tzw. linii równowagi (ang. *ELA – equilibrium line altitude*), masy upakowanego lodu „wylewają się” jeziorami na zewnątrz pól firnowych. Jezor lodowca Fedczenki w Pamirze ma 70 km długości. Lodowce występują w większości gór świata, a *ELA* zależy od szerokości geograficznej i lokalnych warunków topoklimatycznych – w Arktyce jest to 100–300 m n.p.m., w Alpach 2500–3000 m n.p.m., a najwyżej w Tybecie – 5800–6000 m n.p.m. W Tatrach *ELA* obliczana jest od 2200 m n.p.m. do 2450–2550 m n.p.m., teoretycznie zatem lodowce miały by szansę powstać, gdyby na tej wysokości były odpowiednie miejsca na pola firnowe. Lodowców w Tatrach nie ma, ale z nagromadzenia śniegów opadowych i lawinowych w osłoniętych od słońca niszach i żlebach powstają małe płyty lodowo-firnowe, mogące przetrwać do następnej zimy (m.in. w Wielkim Mięguszowieckim Kotle czy pod Bułą pod Rysami).

Jednak największe formy nagromadzenia lodu powierzchniowego to łądolody. Na kuli ziemskiej mamy obecnie dwie potężne pokrywy lodowe: na Grenlandii i na Antarktydzie. Łądolód grenlandzki to prawie 3 mln km³ lodu i gdyby się wytopił, poziom oceanu światowego podniósłby się o 7 m. Łądolód Antarktydy zajmuje ponad 12 mln km² i stanowi 90% światowych zasobów słodkiej wody. Średnia grubość łądolodu wynosi 2,4 km, ale w niektórych rejonach może dochodzić do 4,7 km. Wykonane w ostatnich latach



Fot. 1.
Czoło lodowca Krammera,
Spitsbergen.
Fot. 2.
Wiece kamieniste,
Calypsostrandra,
Spitsbergen.
Fot. 3.
Największy głaz narzutowy
Mazowska, okolice
Mszczonowa.



**Dr hab.
Jan Dzierżek**

geolog czwartorzędu,
geomorfolog, adiunkt
na Wydziale Geologii
Uniwersytetu
Warszawskiego
w Zakładzie Geologii
Klimatycznej, prowadzi
badania w zakresie
stratygrafii i genezy
osadów
czwartorzędowych Tatr,
Spitsbergenu i Niżu
Polskiego;
geomorfologii
i paleogeografii
obszarów
złodowaconych,
geozagrożeń
i kartografii
geologicznej; autor
ponad 100 prac
naukowych,
popularnonaukowych,
podręczników
akademickich i map
geologicznych.

j.dzierzek@uw.edu.pl



wiercenia wykazały, że pod łądolodem występują rzeki i jeziora, a w nich znaleziono bakterie!

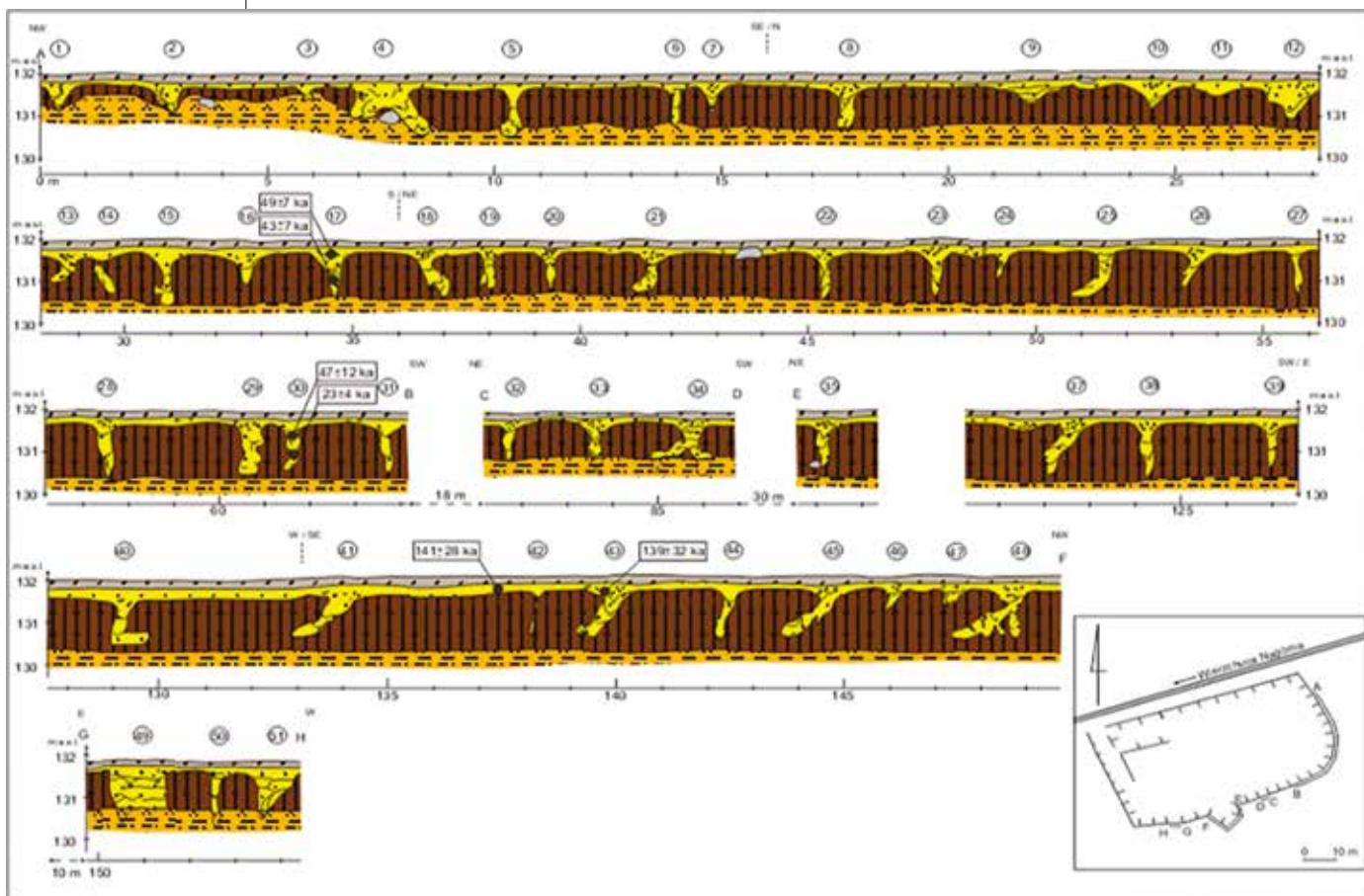
Podziemna potęga

Mniej spektakularny, ale nie mniej potężny jest lód podziemny. Choć na ogół go nie widać, to skuwa grunty północnej półkuli od obszarów polarnych po Syberię, centralną Azję, Tybet i wysokie góry na dowolnej szerokości geograficznej. W rejonach, gdzie średnia roczna temperatura powietrza jest niższa niż -8°C , grunty przemarzną na trwałe (tzw. wieczna albo wieloletnia zmarzlina, *permafrost*). W rejonach, gdzie średnia roczna temperatura powietrza nie jest wyższa niż -1°C , zmarzlina występuje miejscowo (*sporadic* albo *discontinuous permafrost*). Przemarznięty grunt to nic innego jak zamrożona woda w tym gruncie. W zależności od ilości wody i właściwości gruntu (grubość ziaren, porowatość, uszczelnienie) lód podziemny przybiera różną formę. Mogą to być mikrokryształki, soczewki, ale też potężne makrostruktury w postaci żył i klinów czystego lodu, ciągnące się do głębokości kilkudziesięciu metrów. W centralnej części Syberii

grunty znajdują się w stanie permanentnego zamrożenia do głębokości ponad 1 km. W delcie Mackenzie zmarzlina sięga głębokości 700 m, w Tybecie 100 m, a w wysokich górach często nie przekracza 10 m.

Kriosfera silnie reaguje na wszelkie zmiany klimatu – w cyklu dobowym, sezonowym, wieloletnim, ale też w czasie geologicznym. Stan dynamicznej równowagi pomiędzy topnieniem a zamarzaniem przekłada się na istotne zmiany w środowisku nie tylko w najbliższym otoczeniu poszczególnych elementów kriosfery. Zmiany w kriosferze są ważnym elementem globalnych zmian środowiska. Zmarzlina może utrzymywać się głęboko pod powierzchnią setki tysięcy lat, ale górna warstwa gruntów rozmarza każdego lata do głębokości nawet kilku metrów. Jest to tzw. warstwa czynna wiecznej zmarzliny (*active layer*).

Zamarzanie uwięzionej w porach osadów i szczelinach skał wody powoduje ich dezintegrację, gdyż woda w trakcie zamarzania powiększa swoją objętość o około 9%. Potęgę lodu, na skalę domowego laboratorium, najłatwiej uświadomić sobie, zostawiając na mrozie wodę w szklanej butelce. Pewnie każdy kierowca zna też z autopsji pojawianie się licznych dziur



Pseudomorfozy po lejtocęskich klinach lodowych w Wierzychucy Nagórnej, wschodnia Polska, wg Dzierżek, Stańczuk 2006.

w asfalcie pod koniec zimy. To w głównej mierze zasługa zamarzającej wody. W naturalnych warunkach proces ten powoduje niszczenie górotworów, rozpad masywnych skał na drobny gruz skalny. Część tego materiału skalnego trafia na powierzchnię lodowców i wędruje z nimi dalej.

Uważny obserwator wie, że zamarzająca w kałużach woda pozostawia pustą przestrzeń na dnie kałuży. Dzieje się tak dlatego, że najpierw zamarza powierzchnia kałuży (temperatura powietrza jest niższa niż temperatura gruntu), a lód powiększa objętość w sposób nieskrępowany ku górze, w kierunku najmniejszego ciśnienia. Podobnie dzieje się z wodą uwieczoną w porach gruntu – zamarzając, wypycha powierzchnię do góry. W gruntach niejednorodnych poszczególne składniki gruntu niejednorodnego reagują w różnym stopniu. W kolejnym sezonie ablacyjnym grunt nie wraca do swej pierwotnej postaci, gdyż do pustej przestrzeni powstającej w czasie podnoszenia się gruntu zasysana jest woda z niższych części gruntu, niosąc drobny materiał, który wypełnia wolną przestrzeń. Proces powtarza się rokrocznie. W wyniku znacznych spadków temperatury (-20°C) lód gruntowy kurczy się, powodując pęknięcie gruntu. Tworzą się szczeliny mrozowe (*contraction cracks*), układające się często w charakterystyczne poligony i sieci. W te szczeliny wpada śnieg lub woda z jego topnienia i tam zamarza,

tworząc początek megastruktury lodu gruntowego, przyrastającego w kolejnych sezonach.

Wielokrotne powtarzanie się procesu zamarzania i rozmarzania warstwy czynnej wiecznej zmarzliny powoduje efektowne formy segregacji gruntów niejednorodnych w postaci pierścieni i poligonów gruzowych (*patterned ground*), często nawiązujących do sieci szczelin mrozowych. Często napływająca z głębszych warstw woda powoduje tak znaczny przyrost lodu pod powierzchnią, że tworzy on wielkie (nawet 100 m wysokości) pagóry z jądrem lodowym, o wdzięcznej nazwie pingo (s). Powolne przemieszczenie się przypowierzchniowej warstwy osadów w wyniku rozmarzania gruntu (soliflukcja) jest podstawowym procesem modelującym stoki w obszarach objętych zmarzliną. Powstają gleby pasiaste, tarasy i jęzory, formy spływów gruzowych i inne. W wyniku oddziaływania termicznego wody powierzchniowej na zamarznięty grunt (termokras) na tundrze powstają malownicze jeziora (ałasy). Opisane wyżej zjawiska są charakterystyczne dla strefy peryglacjalnej – bliższego i dalszego sąsiedztwa z obszarami zlodowaconymi.

Przeszłość lodu

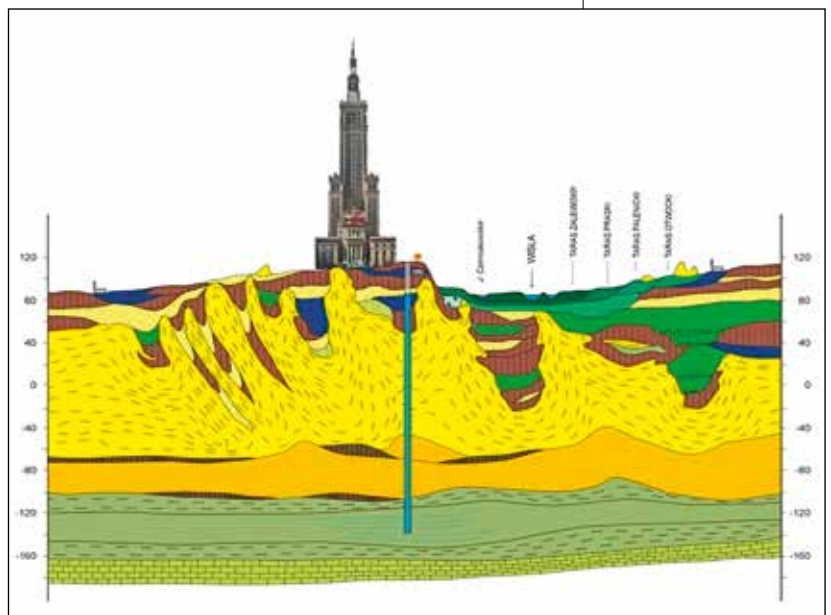
W dziejach Ziemi wielokrotnie dochodziło do ekspansji lodowców górskich i lądolodów. Po raz pierw-

STANY SKUPIENIA WODY

szy lód objawił Ziemi swoją potęgę w proterozoiku ~2,7–2,2 mld lat temu. W kriogenie (635–720 mln lat temu) prawdopodobnie cały glob pokryty był przez lądolód, a Ziemia przybrała postać śnieżnej kuli (*Snowball Earth*). Ślady działalności lodowcowej w postaci zmetamorfizowanych glin lodowcowych (tyllitów), rys lodowcowych na powierzchniach skał oraz tzw. *dropstones* (otoczków wytopionych z gór lodowych do ilastych osadów morskich). Z naszego, europejskiego punktu widzenia znacznie ważniejsza jest ostatnia epoka lodowcowa, zwana plejstoceniem (2,6 mln–11,7 tys. lat temu). W wyniku pogarszających się warunków klimatycznych doszło w tym czasie do kilku wielkich transgresji lądolodu ze Skandynawii na znaczne obszary półkuli północnej. Okresy siedmiu znanych obecnie zlodowaceń plejstocenijskich oddzielone były krótszymi okresami interglacjalnymi z klimatem podobnym do dzisiejszego. Najstarsza transgresja miała miejsce około 900–930 tys. lat temu w czasie zlodowacenia Nidy, skorelowanego z dwudziestym drugim morskim stadium izotopowym. Lądolód objął całą północną i środkową Polskę, sięgając Bramy Morawskiej i zachodniego przedpoła Karpat. W czasie kolejnej transgresji (zlodowacenie Sanu 1) lądolód skandynawski miał na obszarze Polski największy zasięg. Dotarł do Sudetów i Karpat, wkraczając potężnymi jezorami w otwarte ku północy doliny rzeczne. W swej brzojowej części opływał główne pasma Gór Świętokrzyskich i Jurę Polską, które to tworzyły rozległe nunataki. W czasie ostatniego zlodowacenia (Vistulian) lądolód objął znaczny obszar północnej Polski, a w dolinie środkowej Wisły utworzył jezioro zaporowe, zwane zastoiskiem warszawskim.

Zimna przyszłość

Lądolody plejstocenijskie zostawiły trwałe piętno w rzeźbie i budowie geologicznej Polski i znacznej części półkuli północnej. Potęga lądolodów i lodowców górskich wyrażona jest zarówno w działalności erozyjnej, jak i akumulacyjnej. W wysokich górach za sprawą lodowców mamy dziś mocno wcięte, U-kształtne doliny, często zawieszane, głębokie cyrki lodowcowe, częściowo zajęte przez malownicze jeziora, wały moren końcowych, ostre turnie, pola piargów. Dowody obecności lądolodu kontynentalnego są niezwykle spektakularne i powszechne. Zaburzenia glacictektoniczne, czyli naruszenie pierwotnej pozycji warstw w wyniku dynamicznego obciążenia lądolodem, są często obserwowane w profilach osadów na obszarach zlodowaceń plejstocenijskich. Sięgają nieraz kilkaset metrów w głąb. Rzadko uzmysławiamy sobie, że osady polodowcowe budują prawie 75% powierzchni Polski, a ich miąższość w skrajnych przypadkach (np. w rejonie Góry Dylewskiej) przekracza 450 m. Mieszanina mułu, łu, piasku, żwiru, z domieszką olbrzymich głazów (eratyków) powstała w wyniku po-



brania z podłoża, przeniesienia, przerobienia i zdeponowana przez lądolód nazywa się gliną lodowcową. Pakiety gliny mogły być oderwane od dolnej części lądolodu i złożone jeszcze w czasie jego transgresji albo pozostać po wytopieniu lodu. W glinach zapisane są dane o kierunku ruchu, miejscu pochodzenia i wieku transgresji lodowcowej. Gliny budują powierzchnię wysoczyzn polodowcowych i dominują na mapie osadów powierzchniowych Polski. Powierzchnie zbudowane z osadów starszych zlodowaceń są na ogół wyrównane (zdenudowane). Obszar pokryty przez najmłodszy lądolód cechuje bardzo urozmaicona rzeźba powierzchni z dużymi deniwelacjami, z tysiącem jezior, z mnogością form rzeźby lodowcowej (ozu, kemy, drumliny). Wody z topniejących lądolodów wynosiły na przedpolu olbrzymie ilości piasków i żwirów, tworząc rozległe powierzchnie równin sandrowych.

Potęę lodu najłatwiej uświadomić sobie, stojąc w pobliżu wielkiego głazu narzutowego, czyli fragmentu podłoża skalnego odspojonego i pobranego przez lądolód w rejonie Skandynawii lub dna Bałtyku i przytransportowanego na dużą odległość. Głaz Trygław na Pomorzu Zachodnim, uważany za największy eratyk w Polsce, ma ponad 3 m wysokości i 50 m obwodu, a waży około 2000 ton.

Ostatnie zlodowacenie skończyło się 11,7 tys. lat temu i w dobie tzw. globalnego ocieplenia mówi się głównie o kurczeniu się kriosfery i wynikających z tego faktu zagrożeniach. Jednak mimo że trudno w to uwierzyć, to analizując rytm zmian klimatycznych w plejstocenie, można zauważyć, że obecny interglacjał powoli się kończy. Czy zatem już niedługo, bo za kilka tysięcy lat, można spodziewać się kolejnego zlodowacenia?

TEKST I ZDJĘCIA JAN DZIERZEK

Zaburzenia glacictektoniczne pod ulicami Warszawy (schemat), wg Dzierzek 2006.

Chcesz wiedzieć więcej?

Barry R., Gan Y. T. (2011). *The global cryosphere. Past, present and future*. Cambridge University Press: 472 pp.

Dzierzek J. (2009). Paleogeografia wybranych obszarów Polski w czasie ostatniego zlodowacenia. *Acta Geographica Lodziensis*, 95: 1–112.

Dzierzek J. (red.), Janiszewski R., Kalińska E., Lindner L., Majecka A., Makos M., Marks L., Nitychoruk J., Szymanek M. (2015). *Nizina Mazowiecka i obszary przyległe – 43 stanowiska geologiczne*. Wydział Geologii Uniwersytetu Warszawskiego, ISBN-978-83-932617-6-5: 1–128.

Marks L., Dzierzek J., Janiszewski R., Kaczorowski J., Lindner L., Majecka A., Makos M., Szymanek M., Tołoczko-Pasek A., Woronko B. (2016). Quaternary stratigraphy and palaeogeography of Poland. *Acta Geologica Polonica*, 66 (3): 403–427.