

STEFAN ZBIGNIEW ROŻYCKI

## Próba odtworzenia procesu formowania się rzeźby polodowcowej

### Eksperyment geomorfologiczny

**STRESZCZENIE:** Wykonano próby sztucznego odtworzenia morfologii glacialnej, używając do doświadczeń specjalnie spreparowanych brył lodu poddanych topieniu się w piwnicy. W efekcie otrzymano zespół form porównywalnych ze świeżymi formami morfologii glacialnej na Spitsbergenie i w Polsce Północnej. Eksperyment pozwala zrozumieć powstawanie wielu form, których tworzenia się nie obserwowano dotychczas *in statu nascendi*.

#### WSTĘP

Myśl podjęcia eksperymentów z zakresu rozwoju rzeźby glacialnej powziąłem w okresie badań geologicznych i glaciologicznych, przeprowadzanych w czasie Pierwszej Polskiej Wyprawy Polarnej na Spitsbergen w 1934 r. przy pracy wśród utworów morenowych lodowców Penccka, Finsterwaldera i Nathorsta.

Wyjaśnianie mechanizmu tworzenia się reliefu lodowcowego przy badaniach na terenie zlodowaceń czwartorzędowych napotyka na duże trudności wynikające z tego, że daną formę widzi się najczęściej w przypadkowym stanie, w którym znajduje się ona w chwili prowadzenia obserwacji, bez dostatecznej perspektywy na jej rozwój w czasie i bez spojrzenia na jej historię wstecz i w przód. Stan, w jakim się dana forma znajdowała poprzednio i kierunek dalszego jej rozwoju zostawia się, w gruncie rzeczy, interpretacji i domysłom badacza. Tymczasem nie jest to proste, szczególnie w odniesieniu do form polodowcowych zwłaszcza dlatego, że domniemania nasze są obarczone przyzwyczajeniami z „normalnego” — wodnego cyklu erozyjnego, a procesy odbywające się w obecności lodu, obserwowane nawet najstaranniej ale dorywczo, są nam dosyć obce i skłonni jesteśmy je upraszczać.

Aby te przyzwyczajenia przewyciężyć, trzeba lepiej podpatrzeć procesy rozwijające się na lodzie w dłuższej perspektywie czasu i w sposób ciągły. Bardzo wiele zrobiono w tym kierunku dla lodowców dzięki pracom

Hessa, Ahlmana i jego szkoły. Są to jednak prace poświęcone głównie zagadnieniom stanu fizycznego i przemieszczania się mas lodu. Procesami morfogenetycznymi, które zachodzą przy czole lodowca, uczeni ci interesują się w mniejszym stopniu. Morfologowie, jak na przykład Gripp, swoje bardzo interesujące wnioski opierają tylko na dorywczej, często zaledwie kilkudniowej obserwacji poszczególnych lodowców.

Tradycja istniejąca od czasów Daubrée'go w zakresie geologii eksperymentalnej nasunęła myśl, czy i w tym przypadku nie można by było szukać pomocy na drodze eksperymentalnej. Bardzo zachęcały do tego obserwacje poczynione przez autora, również w krajach polarnych, nad topnieniem mniejszych brył lodu na wybrzeżu fiordu Van Keulen i Storbukta w rejonie Bellsundu na Spitsbergenie Zachodnim, które wykazały, że proces ten ma wiele analogii z tym, co się obserwuje na lodowcach znajdujących się tuż obok. Przypomniały się również obserwacje przytaczane przez Jenssena i Milthersa nad zmianami zboczy starego wykopu oraz dołączona do ich pracy seria mapek ilustrujących przebieg procesu zapełniania samorzutnego obniżeń, odbywającego się nawet w naszym klimacie.

Eksperyment geomorfologiczny, jak to już wynikało z samego jego charakteru, powinien by trwać przez czas dłuższy, kilka tygodni lub miesięcy czy lat, tak aby się dały prześledzić kolejne zmiany zachodzące przy przekształcaniu się rzeźby w zależności od upływającego czasu, zmian temperatury, przebiegu topnienia lodu i wielu innych okoliczności. Różnice materiału i warunków, w których ten rozwój przebiega, wskazują również że powinno to być nie pojedyncze doświadczenie, ale cała seria eksperymentów powtarzanych przy zmiennych założeniach.

Obserwacje przy obecnie istniejących lodowcach z reguły mają charakter dorywczy, a jeśli nawet i przebiegają dłużej w stosunku do czasu trwania całości procesu, są na ogół zbyt krótkie, aby uchwycić pełnię przemian trochę większych jednostek. Eksperyment miałby więc swoją wartość, gdyby prześledzić w sposób możliwie ciągły całość tych zmian, notując je pod kątem widzenia przebiegu poszczególnych procesów i rozwoju większych zespołów morfologicznych. Metodą notowania obserwacji, co narzucało się samo przez się, powinna być mapa, profile i fotografie, a jeśli by się to dało rozwiązać technicznie — to również i film.

W projektowanym sposobie postępowania nasuwała się więc pewna analogia do stosowanej przez Davisa metody serii blokdiagramów ilustrujących cykle morfologiczne, z tą jednak dużą różnicą, że rzeźby analizowane przez Davisa powstawały jedynie na rysunku, w koncepcji zaś autora niniejszego artykułu rysunek miał stanowić tylko ilustrację tego, co samorzutnie rozwija się na powierzchni eksperymentalnej w znanych, narzuconych założeniach doświadczenia, warunkach. Taki sposób postępowania wydał się autorowi bardziej „przyrodniczy“ i przez samorzutny roz-

wój wypadków dający obraz bardziej zbliżający się do rzeczywistości, a jednocześnie pozwalający na prześledzenie wszystkich etapów rozwoju zjawisk w stosunkowo krótkim czasie.

Okazja do rozpoczęcia prób w zamierzonym kierunku nie nastęrczała się długo. Trzeba było do tego dysponować odpowiednim lokalem, najlepiej piwnicą, która mogłaby być użyta do celów doświadczalnych przez dostatecznie długą ilość czasu i znajdowała się w warunkach możliwie dobrze izolujących „teren“ badań od warunków zewnętrznych. Pierwsza taka możliwość powstała po odbudowie Instytutu Geograficznego Uniwersytetu Warszawskiego w latach 1950 i 1951. Dalsze doświadczenia można już było prowadzić w specjalnie do tego celu dostosowanym basenie przy Zakładzie Geologii Czwartorzędu tegoż Uniwersytetu w latach 1956 i 1957. Pierwsza seria doświadczeń była zbyt skromna i dawała zbyt fragmentaryczne wyniki, aby zasługiwała na zapoznanie z nimi szerszego grona specjalistów. Dalsze eksperymenty z lat 1956 i 1957 znacznie rozszerzały materiał doświadczalny i były już przeprowadzone na tyle systematycznie, że chociaż częściowo odpowiadały już postawionym założeniom. Dlatego też autor zdecydował się na demonstrację eksperymentalnie otrzymanej rzeźby lodowcowej przy okazji pobytu grupy geologów zagranicznych w 1956 r., oraz ostatecznie na ogłoszenie części wyników, mimo iż doskonale zdaje sobie sprawę z licznych niedociągnięć technicznych, w jakich eksperymenty były wykonane.

Przy przeprowadzaniu niżej opisanych doświadczeń żywy udział brała liczna grupa pracowników naukowych Pracowni Kenozoiku Zakładu Nauk Geologicznych PAN i asystentów Zakładu Geologii Czwartorzędu Uniwersytetu Warszawskiego, a przede wszystkim mgr Zofia Michalska, która współpracowała przy wszystkich doświadczeniach. Przy sporządzaniu szkiców i robieniu obserwacji codziennych zatrudnieni byli: mgr H. Ruszczyńska, mgr K. Kopczyńska i mgr Z. Lamparski oraz grupa magistrantów 1957 r. Zdjęcia fotograficzne wykonywali: mgr M. D. Domosławska-Baraniecka (1950 i 1951), mgr R. Więckowski (1956) oraz mgr J. Falkowska (1957).

Prace techniczne przy przygotowaniach do eksperymentu wykonał laborant St. Danielczuk.

Wszystkim wymienionym współpracownikom dziękuję w tym miejscu za wykazane zainteresowanie i poniesiony trud.

## EKSPERYMENT I (1951 r.)

### ZAŁOŻENIA I WARUNKI PRZEPROWADZENIA EKSPERYMENTU

Pierwsza okazja do przeprowadzenia eksperymentów z topniejącym lodem powstała, jak o tym była mowa we wstępie, po odbudowaniu nowe-

go gmachu Instytutu Geograficznego U. W.; tu w piwnicy znajdowało się dosyć obszerne pomieszczenie z cementową podłogą i odprowadzeniem wody.

Założenia pierwszego doświadczenia były zupełnie skromne. Chodziło jedynie o sprawdzenie, czy eksperymenty geomorfologiczne z lodem są w ogóle możliwe i czy dają rezultaty zachęcające do podjęcia dalszych prób. Dzięki uprzejmości kierownika Instytutu prof. St. Leszczyckiego wspomniana piwnica na kilka miesięcy przeznaczona została na cele doświadczenia i umożliwiony został zakup odpowiedniej ilości lodu. W piw-

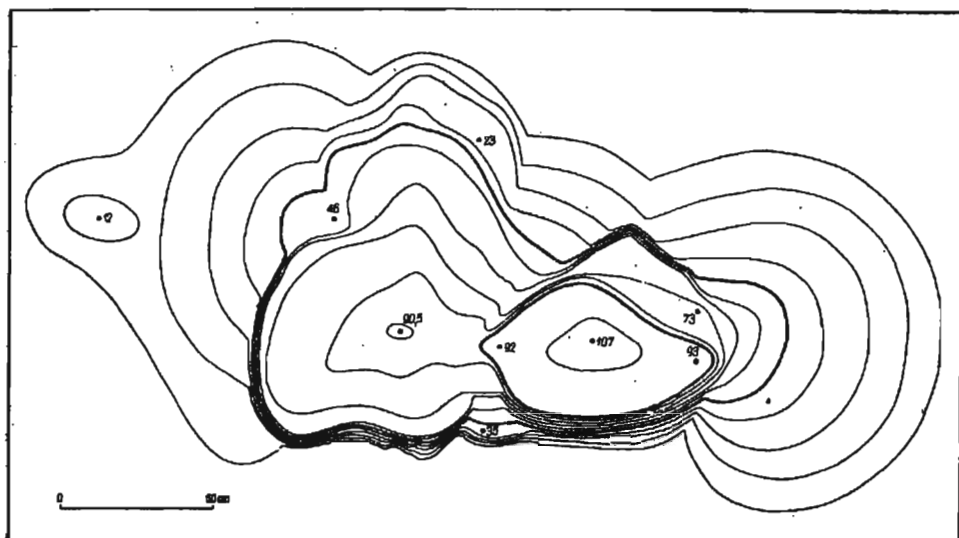


Fig. 1

Eksperyment I (1951). Mapa lodu i jego pokrycia na początku doświadczenia. Poziomice co 10 cm

Experiment I (1951). Sketch map of the ice and its cover at the beginning of the experiment. Contour interval 10 cm.

nicy tej została wydzielona powierzchnia  $4 \times 5$  m, na której jednocześnie zmontowano dwa różne układy lodu. W jednym miejscu ustawiono stos dużych płaskich brył lodu do wysokości 1 metra, przedzielając je między sobą warstwami piasku i żwiru oraz obsypując je dookoła do wysokości 0,5 m podobnym materiałem (fig. 1). Od jednej strony, którą nazwano „czołem“, pozostawiono na całej wysokości odsłonięty lód i starannie wymieciono jego przedpole, tak aby można było obserwować formy, które przybierze materiał zsypany się z lodu. Spodziewano się, przez analogię z obserwacjami autora nad topnieniem lodu na Spitsbergenie, że powinna



tu powstać swojego rodzaju „morena czołowa“, na której zapleczu utworzy się zagłębienie bezodpływowe. Dla ułatwienia obserwacji zróżnicowano materiał przedzielający bryły lodu dając między jego poziomymi warstwami przesypkę żwirową, w pionowe zaś szczeliny — piasek (fig. 2).

Z boku, w odległości ok. 1 m od skraju pierwszej, ustawiono drugą grupę brył lodu ułożonych płasko i obficie przysypanych gliną i piaskiem. Czoło lodu miało tu ok. 3 m długości i wysokość 30-40 cm. W tym przypadku chodziło o przekonanie się, jak będzie zachowywał się materiał gliniasty na topniejącym lodzie i sprawdzenie, czy na jego przedpołu po-

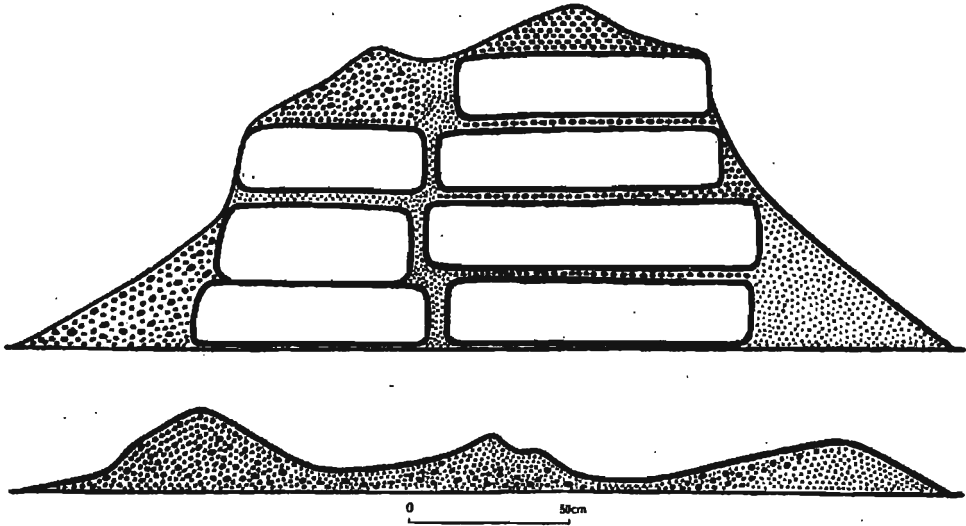


Fig. 2

Eksperyment I (1951). Przekrój przez lód na początku doświadczenia i pozostałości po jego stopnieniu

Experiment I (1951). Section of ice at the beginning of the experiment and relics of melted ice

wstaną formy zbliżone do sandru. Ponieważ cała przestrzeń podłogi miała dosyć równomierne pochylenie, aby skierować odpływ wody do zlewu w podłodze, trzeba było w odległości ok. 2 m od czoła usypać niewielki wałek z piasku i żwiru, który ograniczałby rozplýwanie się wody. Wałek ten miał jednocześnie odegrać rolę „moren czołowych“ z poprzedniej fazy „postoju lodowca“.

Dla ułatwienia opisu, zgodnie z orientacją przyjętą w załączonych planach, pierwszą grupę brył lodu będziemy nazywali grupą „zachodnią“, a drugą — „wschodnią“. Trzeba jeszcze dodać, że na „południu“ znajdują się drzwi wejściowe od pomieszczeń ogrzewanych. W piwnicy codziennie

na parę godzin otwierano okna, tak aby utrzymać w niej przez cały okres topnienia lodu temperaturę między 4-6°C. Poza obszarem doświadczalnym, przy ścianie od strony pomieszczeń ogrzewanych, była ona nieco wyższa i dochodziła do 8-9°C.

Doświadczenie rozpoczęto 23.II.1951 r. Lód stopniał całkowicie dopiero po 16 dniach w dniu 10.III. Żywe zmiany w rzeźbie zachodziły jeszcze przez dalszych kilka dni (do 22 dnia), po czym stały się one bardzo nieznaczne i powolne. W tym terminie przerwano systematyczne obserwacje, pozostawiając utworzone formy w stanie nienaruszonym przez dalszych kilka miesięcy, dla prześledzenia procesu ich „starzenia się“. Dla celów dokumentacyjnych w 1, 3, 7, 14, 16 i 22 dniach doświadczenia wykonano szereg fotografii, po czym zrobiono je jeszcze po dwóch i po sześciu miesiącach.

#### OBSERWACJE W CZASIE PRZEBIEGU DOŚWIADCZENIA

Obserwacje codzienne z tego doświadczenia nie zasługują na szczególne przytaczanie na tym miejscu. Warto je omówić tylko w ogólnym zarysie.

Przy pierwszej, wysokiej masie lodu, już po paru godzinach zaczęły sypać się z lodu pierwsze głaziki, spadając na jego przedpole w odległości do 20 cm przed krawędzią lodu. Proces ten w dalszym ciągu trwania doświadczenia odbywał się jednak dość powoli, ponieważ w 3-im dniu przed zachodnią częścią tej grupy lodu powstał zaledwie kilkucentymetrowy wałek, który tylko w jednym miejscu miał wysokość ponad 5 cm. Po bokach lód odsunął się od okrywającej go z pozostałych trzech stron obsypki i między nią a lodem utworzyła się stroma fosa, do której zsypywał się piasek i żwir z lodu i z otaczającego go nasypu. Dzielne „cofanie się“ lodu było powolne i wynosiło średnio około 2,5-3 cm na dobę. Przedział między dwoma stosami, w które był ułożony lód, obniżał się stosunkowo szybciej i rozdział między nimi akcentował się coraz bardziej. Piasek rozdzielający te dwa stosy lodu zaczął wysypywać się na zewnątrz, tworząc przy czole pewien rodzaj stożka nasypowego o bardzo stromym kącie usypu.

Po tygodniu oba stosy lodu były już oddalone od siebie o 35-40 cm, a w dzielącym je zagłębieniu powstał piaszczysty wał. Lód w tym czasie przybrał formę piramidalną wydatnie zwiężając się ku górze z tym, że na wierzchu pokryta moreną powierzchniową bryła miała większe rozmiary niż leżąca pod nią, co całości nadawało kształt zbliżony do grzyba. „Morena czołowa“ wzrosła w tym czasie do wysokości 5-10 cm, tworząc wał z kilkoma wyraźnie zarysowanymi się pagórkami. Po

10-ciu dniach grzybowata forma lodu znikła i tworzył on dwa wypukłe bochny leżące w środku dużych zagłębień otoczonych ze wszystkich stron piaszczysto-żwirowymi wyniosłościami. Warto zanotować, że prawy stos lodu, który miał początkowo wysokość 90 cm i był przykryty moreną powierzchniową w formie prawidłowego stożka o wysokości do 15 cm, topniał szybciej niż lewy, pierwotnie mający 70 cm lodu i 25 cm pokrycia morenowego. Pierwszy stopniał już całkowicie po 14 dniach, a drugi utrzymywał się do 16-go dnia od początku doświadczenia. Każdy stos lodu utworzył osobne, bardzo dobrze wyrażone zagłębienie bezodpływowe, ku środkowi wysłane coraz drobniejszym materiałem z plamą ilastą na dnie misy w miejscu, gdzie najdłużej istniał ostatni szczątek lodu.

Powierzchnia garbów otaczających te zagłębienia bezodpływowe wykazywała wyraźny brak równowagi w rozłożeniu mas i z ich zboczy ku centralnym depresjom zagłębień ruszyło szereg osuwisk, w których wyniku ich pierwotny kształt zaczął ulegać zmianom.

Na garbie środkowym rozdzielającym misy bezodpływowe zbudowanym z ilastego piasku powstała bardzo niespokojna rzeźba, złożona z masy kalkulentymetrowych piramid ziemnych, żywo przypominających swoim ogólnym charakterem krajobraz „leirhuwy“<sup>1</sup> przed czołem lodowca Nathorsta na Spitsbergenie i na niektórych częściach górnej powierzchni lodowca Pencka w pobliżu jego czoła.

W dalszych dniach, w miarę wysychania gruntu na wyniosłościach, piramidy te zaczęły się rozsypywać. Otaczające poprzednio lód wały również zaczęły tracić swoje pierwotne ostre formy i po dwu miesiącach przybrały już formę wzgórz zaokrąglonych na szczytach. Proces ich przemian nie zakończył się jednak jeszcze całkowicie i trwał w dalszym ciągu mniej więcej do szóstego miesiąca, po czym prawie ustał, a w każdym razie dalsze zmiany stały się prawie zupełnie nieuchwytnie. Zbocza wzgórz, które początkowo miały pochYLENIE od 35° do 45°, a na „piramidach ziemnych“ nawet do 60°, złagodniały zachowując pochYLENIE zbliżające się do 10-15°. Formy żwirowe, które pierwotnie miały mniejsze kąty nachYLENIA stoków, uległy mniejszym przemianom i w ostatecznym rezultacie zachowały bardziej ostre formy, niż piaszczyste, które rozplaszczyły się w dużym stopniu. Różnica w zachowaniu się powstałych po stopnieniu lodu form w zależności od materiału, z którego były one zbudowane, zaznaczyła się bardzo wyraźnie (fig. 3).

Druga (zachodnia) grupa lodu przeszła znacznie mniejszą ewolucję. Gliniaste pokrycie lodu wyschło na powierzchni, spękało silnie i osiadło.

<sup>1</sup> Gwarowe określenie łowców norweskich na niezmiernie oryginalny „turniowy“ typ rzeźby świeżo wymarzających z lodu gliniastych moren.

Tylko w czołowej jego partii powstało szereg zsuwów, które nadały mu bardziej połogi charakter.

Wód topnienia ze stosunkowo niedużej użytej tu ilości lodu było za mało, aby mógł powstać bardziej wydatny odpływ i utworzyć się większy sandr. Pewien jego zarys powstał zresztą samorzutnie tworząc około 50 cm szeroką strefę bardzo płaskich stożków napływowych, ale zaledwie o paromilimetrowej miąższości. Na zewnątrz sandru, między nim i mo-

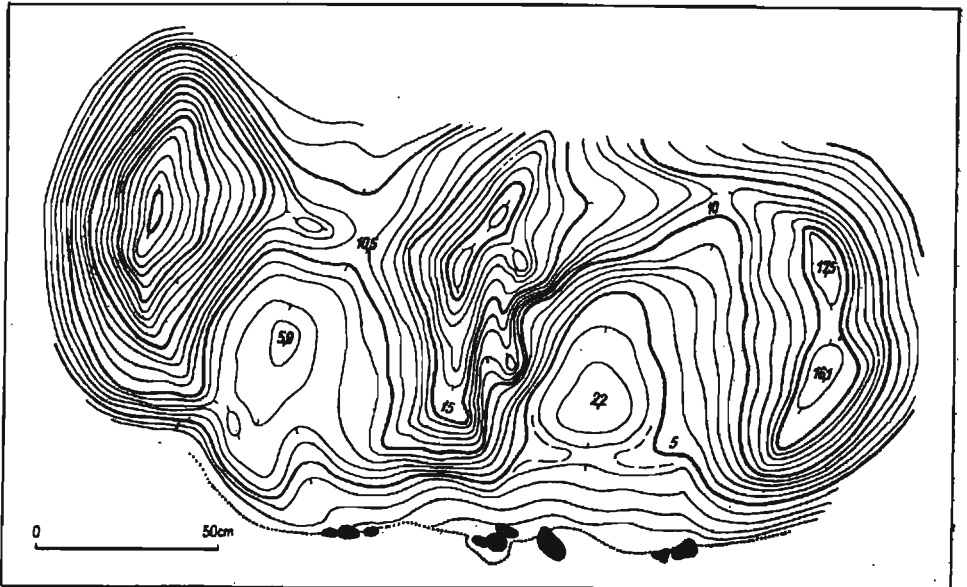


Fig. 3

Eksperyment I (1951). Mapka pozostałości po stopnieniu lodu. Poziomice co 1 cm.  
Zakreskowane gęsto — większe głaziki na przedpolu lodu

Experiment I (1951). Sketch map of relics of melted ice. Contour interval 1 cm.  
Crowded dashes showing larger boulders in the glacier's forefield

renami „starszymi“, powstało duże zastoisko o powierzchni ok. 2 m<sup>2</sup>, w którym tworzył się osad ilasty.

Po stopnieniu się lodu, chcąc obserwować dalszy ciąg tworzenia się sandru, powierzchnię pozostałą po lodzie zaczęto wielokrotnie zraszać wodą. Przedłużyło to i znacznie wzmogło proces sypania się stożków napływowych. Ruszyły one naprzód przysypując osady poprzedniego zastoiska, na miejscu którego, ale w zmienionych granicach, utworzył się

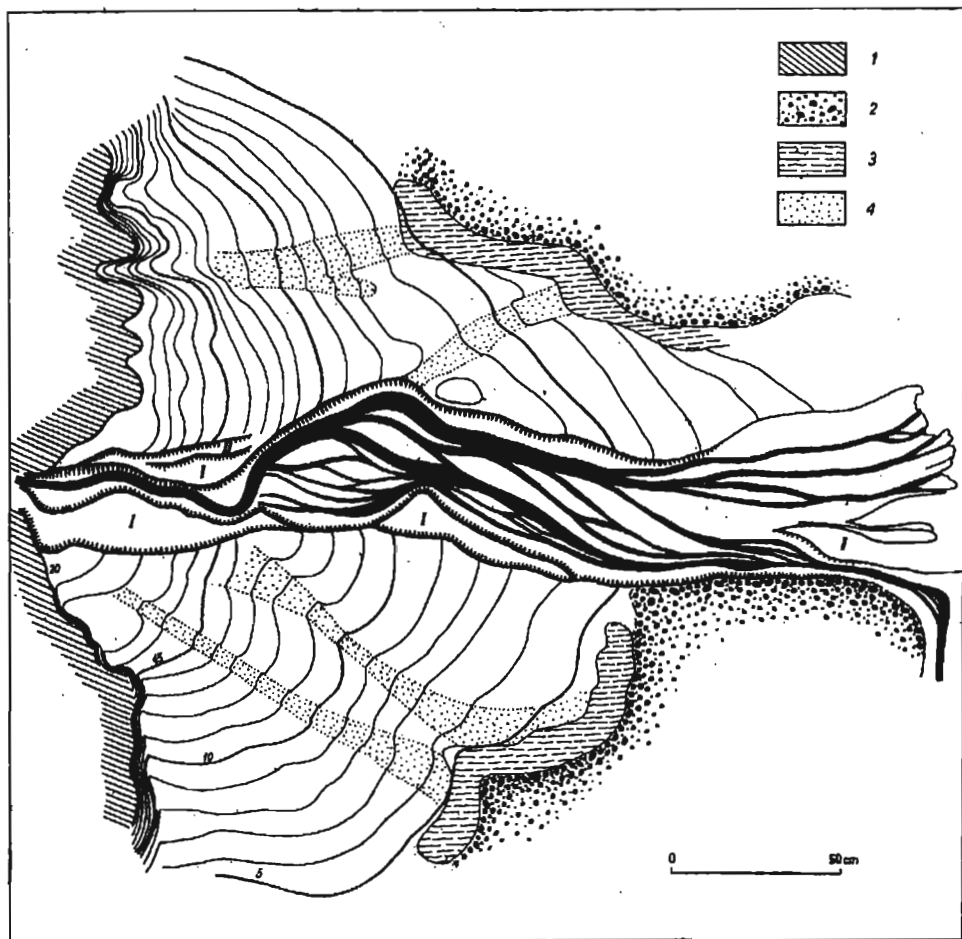


Fig. 4

Eksperyment I (1951). Mapa stożka napływowego (sandru) na przedpolu drugiej grupy lodu. Poziomice co 1 cm

1 „wyżyna“ po stopnieniu lodu z pokryciem gliniasto-piaszczystym, 2 „stare moreny“ na przedpolu, 3 zastoiska w końcowej fazie doświadczenia, 4 ślady starych łożysk przepływu na stożku napływowym

Experiment I (1951). Sketch map of alluvial fan (Sandar) in the forefield of the second ice group. Contour interval 1 cm

1 "plateau" with argillaceous-arenaceous cover after melting of ice, 2 "old moraines" in the forefield, 3 marginal lakes during the final part of the experiment, 4 relics of old flow channels on alluvial fan

nowy zbiornik wodny, stopniowo przesuający się w miarę narastania „sandru“. W końcowym etapie „zastoisko“ rozdzieliło się na dwa nieduże i wąskie zbiorniki peryferyczne o wydłużonym kształcie w kierunku prostopadłym do pochylenia stożka (fig. 4).

Odptyw wody na gliniastej powierzchni wyniosłości po stopionym lodzie coraz bardziej formował się w określoną sieć odpływu tworząc wreszcie jedną główną dolinę, z której spływała większa struga wodna przepływająca przez sandr w formie rzeki, erodującej w nim dolinę tworzącą tarasy a na zewnątrz stożka sypiącą nową własną deltę (fig. 4).

W materiale, z którego był zbudowany sandr, zwracała na siebie uwagę duża ilość drobnych toczeców iłu i gliny użytych do przykrycia lodu. Odgrywały one tu wśród piasków rolę żwirów i głazów notując wszystkie okresy wzmożonego zraszania wyniosłości. Było to również wynikiem tego, że glina do końca nie uzyskiwała półpłynnej konsystencji „błota lodowcowego“, ale wysychając tworzyła drobne grudki, dające materiał na toczące.

Po zakończeniu eksperymentu zaczęto systematycznie rozkopywać powstałe w ciągu doświadczenia formy. Wśród utworów morenowych nie

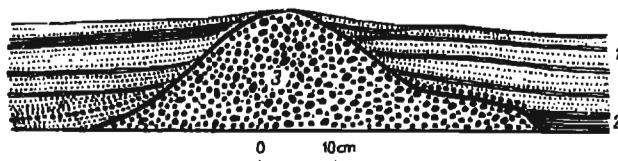


Fig. 5

Eksperyment I (1951). Przekrój geologiczny przez „morenę czołową“ zasypianą przez piaski „sandru“  
1 piaski sandrowe z przewarstwieniami ilastymi, 2 iły zastoiskowe, 3 żwirny „moreny czołowej“

Experiment I (1956). Geological section of “terminal moraine” covered up by “Sandar” sands  
1 Sandar sands with argillaceous interbeddings,  
2 marginal lake clays, 3 “terminal moraine” gravels

ujawniły się żadne ślady uwarstwienia, poza notowanym powyżej zróżnicowaniem się materiału na dnie niektórych większych zagłębień bezodpływowych. Stwierdzono natomiast wyraźne warstwowanie wśród piasków sandrowych, a szczególne wśród osadów zastoiska, które składały się z naprzemianległych warstewek piasku (okresy zmywania) i iłu lub mułu (okresy zastoju), żywo przypominając „warwy“.

Podłużne wykopy przez sandr (ob. pl. IV, fig. 2), wyraźnie zanotowały trzy fazy przesuwania się granic zastoiska na zewnątrz od stożka napływowego, przedzielone dwoma okresami bardziej obfitego zraszania wyniosłości i związanego z tym intensywniejszego sypania się „sandrów“. Ciekawym szczegółem był również przekrój przez wałek morenowy „zatopiony“ i całkowicie pokryty przez wysoko nadsypany „sandr“ (fig. 5).

## OCENA WYNIKÓW EKSPERYMENTU Z 1951 r.

Wyniki eksperymentu z 1951 roku uznane zostały za zachęcające do dalszych prób. Z obserwacji wynikało, że tworzenie się „moren czołowych” typu „zypowego” daje się powtórzyć w warunkach laboratoryjnych. „Odślanianie się” brył lodu z pokrywy morenowej wystąpiło tak jaskrawo, że zachęcało do dalszych obserwacji nad przebiegiem tego procesu. Jeśli chodzi o moreny gliniaste pokrywające lód, to wyraźnie zaznaczyła się rola ich wysychania i fakt, że w warunkach „klimatu suchego” nawet przy dopływie wody, z gliny znajdującej się na lodzie nie utworzyło się „błoto lodowcowe”, spływające soliflukcyjnie, ale dały one materiał na toczenie łożowe.

Dla obserwacji nad rozwojem sandru konieczne okazało się większe „zaplecze” lodowcowe lub doprowadzenie wody z zewnątrz. Ustalono, że eksperyment powinien trwać około 2 do 3 miesięcy, gdyż w ciągu tego czasu przebiegają wszystkie procesy żywszych przemian i istotne etapy „starzenia się” rzeźby lodowcowej.

## EKSPERYMENT II (1952 r.)

Niewłaściwość użycia lodu rzecznoego do doświadczeń mających założeń śledzenia analogii z lodowcem była od początku jasna. Postanowiono więc podjąć próbę przygotowania lodu „zlepieńcowego”, który byłby bardziej zbliżony do lodu lodowcowego.

Korzystając z mrozu w początkach marca 1952 r., przygotowano lód i dnia 9.III.1952 r. przystąpiono do wyrobu bloków lodu o tego rodzaju strukturze. W skrzyni umieszczono tłuczeń lodowy przemieszany ze śniegiem, rozwodnioną gliną oraz piaskiem i żwirem, ubijając mocno tę mieszaninę i zalewając wodą. Przy panującym mrozie ok. 10°C bloki stężały na powierzchni. Projektowano, aby je zostawić na wolnym powietrzu przez okres tygodnia dla całkowitego zamarznięcia całego bloku. Jednak zwyżka temperatury w dniu 11.III i obawa odwilży spowodowały, że trzeba je było zabrać już po 46 godzinach. Po tym czasie zewnętrzna część bloków o grubości od 10-15 cm zamarzła dobrze, jednak pozostała ziarnista masa w środku nie stężała jeszcze w pełni. Wobec wspomnianej zwyżki temperatury trzeba było rozpocząć doświadczenia z blokami w takim stanie, w jakim znajdowały się one 11 marca o godz. 9-ej. Stracone również zostały szanse na uzyskanie większej ilości bloków, tak jak to było projektowane pierwotnie. Z powyższych względów już od początku powstały zastrzeżenia co do prawidłowości warunków, w których rozpoczynano obserwację.

Dwa bloki lodu „zlepieńcowego” o wymiarach 47 × 51 × 76,5 cm i 39 × 39 × 64 cm ustawiono na podłodze w tej samej piwnicy, co w roku

ubiegłym, kładąc pierwszy blok większą powierzchnią na podłożu cementowej z podsypką piasku, a drugi, mniejszy — na nim w analogiczny sposób. Celem tego było prześledzenie formowania się zagłębień bezodpływowych po stopnieniu lodu o budowie zlepieńcowej. Zdawało się

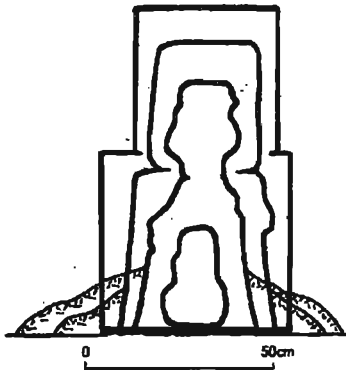


Fig. 6

Eksperyment II (1952). Przekrój poprzeczny przez topniejące bloki lodu „zlepieńcowatego“ w odstępach 24-godzinnych. Grube linie — zarys brył lodu. Zakreskowane — „moreny“ wytopione z lodu

Experiment II (1952). Cross section of melting blocks of “conglomeratic” ice at 24 hours intervals. Outline of ice-blocks indicated by thick lines and “moraine” deposited by melting ice

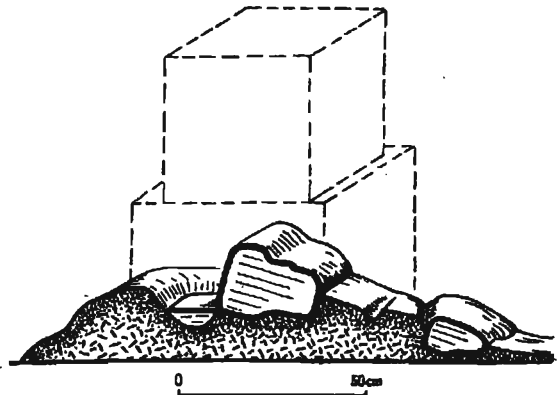


Fig. 7

Eksperyment II (1952). Przekrój przez pozostałości po częściowym stopnieniu i po przewróceniu brył lodu. Kontur przerywany — zarys bloków lodu na początku doświadczenia. Resztki lodu i jezioro na wytopionej morenie

Experiment II (1952). Section of relics after partial melting of ice and overturning of ice-blocks. Outline of ice-blocks indicated by interrupted lines. Ice-relics and small lake on the moraine

wówczas, że prawidłowy geometryczny kształt bloków ułatwi obserwację tych procesów.

Przebieg topnienia brył w ciągu pierwszych 3 dni monotony i mało ciekawy ilustruje rysunek zmiany ich przekroju poprzecznego (fig. 6). Z topniejących ścian lodu sływał wytapiający się z niego materiał usypując się zwałem u jego podnóża. Na górnej powierzchni wyżej leżącego bloku utworzyła się cienka warstwa „moreny powierzchniowej“. Pomiarów bloków wykazywały zdecydowanie szybszy postęp topnienia górnego bloku niż dolnego. Podobna różnica wystąpiła nawet na ścianach poszczególnych brył, tak że z pierwotnie zupełnie pionowych stopniowo



stawały się one coraz bardziej pochyle. W trzecim dniu różnica długości dolnej i górnej krawędzi dolnego bloku wynosiła 7 cm, a górnego — 6 cm i obie miały dalszą tendencję powiększania tej różnicy. Ubytki na ścianach pionowych były przeciętnie prawie dwa razy większe niż na poziomych. Szczelina między blokami była również płaszczyną topnienia, tak że już w drugim dniu były one oddzielone od siebie warstwą wytopionego gruzu.

U podnóża bloków usypywał się zwał materiału „morenowego“, który mimo malenia wysokości brył lodu, co dnia zwiększał zajmowaną przez siebie przestrzeń (w 2-gim dniu — 77 cm, w 3-im — 85 cm, w 4-y — 100 cm średnicy). Było to spowodowane nie spadaniem dalej od bryły wytapiającego się z niej materiału, a stopniowym rozpełzaniem się soliflukcyjnym „moreny“, która cała była przesycona wodą i zachowywała konsystencję półpłynną. Ta cecha „moren“ stanowiła najistotniejszą różnicę w porównaniu z poprzednim doświadczeniem, do którego był użyty czysty lód rzeczny. Grubość zwału morenowego w drugim dniu wynosiła 13 cm, a w dalszych dniach wzrosła do 20-25 cm.

W czwartym dniu nastąpiła katastrofa. Nierównomiernie obtopione bryły stojące na plastycznym, a właściwie półpłynnym podkładzie, przewróciły się. Górna bryła ześlizgnęła się po powierzchni moreny i przesunęła się o 70 cm, a dolna przewaliła się na bok i zanurzyła się w błocie morenowym, wypychając je nieco naprzód. W miejscu, gdzie leżała ona poprzednio, pozostało zagłębienie, w którym samorzutnie utworzyło się jezioro do 6 cm głębokie (fig. 7).

Eksperyment omawiany trudno nazwać udanym, gdyż nie doprowadził on do rozwinięcia się określonego typu rzeźby.

Użycie bloków o prawidłowej formie geometrycznej było błędne, gdyż jako bryły o nienaturalnych kształtach musiały one prowadzić w końcowym wyniku do niewłaściwych efektów morfologicznych. Pozytywnym wynikiem doświadczenia było stwierdzenie, że blok „zlepiewcowy“ da się wyprodukować zamierzoną drogą i to łatwiej niż pierwotnie sądzono. Przekonano się również, że tylko użycie tego rodzaju lodu zapewnia otrzymanie rozwodnionej moreny gliniastej, analogicznej do półpłynnego błota morenowego. W przypadkach więc, gdy w doświadczeniach chodzi o uzyskanie analogii z rzeźbą rozwiniętą w materiale glin zwałowych, użycie tego rodzaju lodu jest celowe i konieczne. Lód zwykły może dawać tylko formy zbliżone do powstających na lodowcach, których powierzchnia jest dobrze spłukiwana i pokryta materiałem piaszczysto-żwirowym.

Nie pozbawionym znaczenia faktem było stwierdzenie, że na granicy dwóch bloków ujawniło się szybsze topnienie, a nawet utworzyła się

warstewka moreny. Na niektórych czołach lodowców spitsbergeńskich, z dobrze wyrażonymi płaszczyznami poślizgu wewnątrz lodu, zaobserwowano analogiczny proces, który w podobny sposób przyspiesza topnienie wzdłuż tych płaszczyzn i powoduje powstawanie płaskich szczyb w czołach lodowców. Gromadzący się wzdłuż tych szczyb materiał po pewnym czasie spada grawitacyjnie lub też jest szybko wymywany. Autor miał okazję obserwować podobne zjawisko m. in. na czołe lodowca Finsterwaldera.

W sumie doświadczenie 1952 r. nie dało pozytywnych rezultatów morfologicznych, pozwalając jedynie zrobić kilka obserwacji technicznych, które mogły być wykorzystane przy dalszych eksperymentach.

### EKSPERYMENT III (1956 r.)

Po kilkuletniej przerwie dalsze eksperymenty geomorfologiczne mogły być kontynuowane w Zakładzie Geologii Czwartorzędu Uniwersytetu Warszawskiego w specjalnie do tego celu dostosowanej piwnicy z basenem o wymiarach  $2,5 \times 3$  m, z przestrzenią eksperymentalną o powierzchni  $6,35 \text{ m}^2$ . Basen ten pozwalał również na spiętrzanie wody, gdyż był otoczony ściankami betonowymi o wysokości 30 cm. Dno basenu było lekko pochylone w kierunku przegrody, za którą znajdował się przedział do łapania piasku wynoszonego przez wodę, a na zewnątrz basenu, w odległości 1,5 m od niego, znajdował się następny specjalny osadnik z rurą pozwalający mierzyć całkowity odpływ wody (fig. 8).

Na jednej ze ścian piwnicy były umieszczone 2 krany wodociągowe umożliwiające jednoczesne operowanie dwoma strumieniami wody o znanym przepływie. Na ścianach dokoła basenu znajdowało się szereg kontaktów elektrycznych ułatwiających oświetlenie wnętrza basenu przy robieniu zdjęć fotograficznych.

Całe powyższe urządzenie mieściło się w piwnicy bez okien, do której wchodziło się pośrednio przez inne nieoświetlone pomieszczenia, przez drzwi zasłonięte grubą kotarą, leżące w odległości 4 m od najbliższego skraju basenu. W stosunku do warunków, w których robiono doświadczenia poprzednie, były to warunki o wiele lepsze i pozwalające na postawienie sobie szerszych zadań. Nie rozwiązana tylko pozostała nadal sprawa urządzeń do wytwarzania we własnym zakresie brył lodu o właściwym składzie i strukturze.

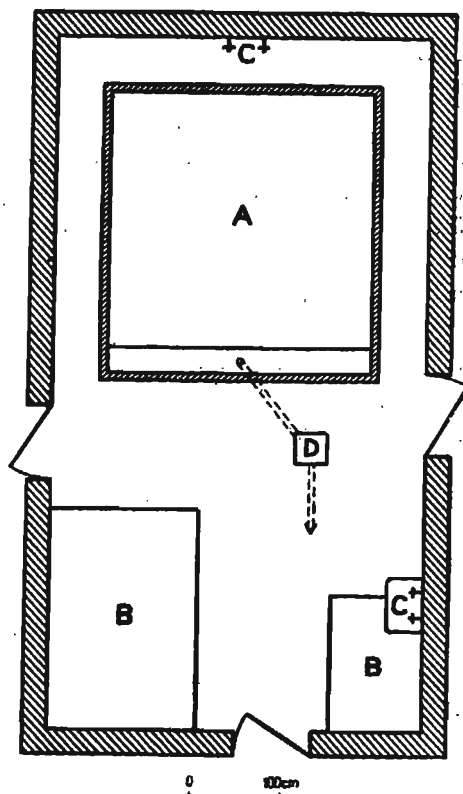
### ZAŁOŻENIA I WARUNKI PRZEPROWADZANIA TRZECIEGO EKSPERYMENTU W ROKU 1956

Zadaniem postawionym przed przystąpieniem do trzeciego eksperymentu geomorfologicznego było odtworzyć w głównych zarysach cały

Fig. 8

Plan piwnicy, w której były wykonywane eksperymenty III (1956) i IV (1957). A basen doświadczalny z przegrodą do zatrzymania spływającego piasku, B przegrody na piasek, żwir i glinę, C krany wodne, D osadnik dla materiału drobnoziarnistego i miejsce pomiaru odpływu wody z basenu

Sketch-plan of cellar where experiments III (1956) and IV (1957) were carried out. A experimental reservoir with a partition to hold up downflowing sand, B partitions for sand, gravel and clay, C water taps, D sedimentation box for fine-grained material, also site of measurement of the volume of water outflowing from the reservoir



przebieg kształtowania się rzeźby typu naszych pojezierzy od chwili rozpoczęcia się recesji czoła ostatniego lądolodu do uformowania się rzeźby współczesnej. Do eksperymentu tym razem użyto ok. 4 ton lodu oraz  $0,5 \text{ m}^3$  żwiru,  $0,75 \text{ m}^3$  piasku i  $0,25 \text{ m}^3$  łu. Dno basenu zostało wysypane warstwą piasku o grubości 5 cm, na którym umieszczono możliwie ściśle obok siebie duże płaskie bryły lodu w taflach o grubości 30-35 cm i średnicy od 40 do 70 cm. Na nich ułożono następne warstwy brył lodu, przedzielając je od poprzednich mieszaniną piasku, żwiru i gliny. W ten sposób ułożony lód zajmował ponad  $\frac{2}{3}$  powierzchni basenu ( $4,45 \text{ m}^2$ ). Od strony frontowej pozostawiono przestrzeń wolną ( $1,90 \text{ m}^2$ ), na której sztucznie uformowano wzgórze zajmujące powierzchnię  $0,35 \text{ m}^2$  z bryłą lodową ok.  $20 \text{ dcm}^3$  w środku. Miała ona imitować starsze formy morenowe „z poprzedniego zlodowacenia“. Przy brzegu wolnej od lodu części basenu pozostawiono wąską wyższą listwę piaszczystą, jako ostaniec starszego sandru. W skład „lodowca“ weszły trzy warstwy lodu, które tworzyły stromy jego front wysokości od 90 do 105 cm, ponad którym wznosiła się kopulasta wyniosłość zbudowana również z brył lodu i po-

kryta mniej więcej decymetrową warstwą piasku i żwiru jako moreny powierzchniowej. Kulminacja w ten sposób uformowanego „lodowca“ wznosiła się prawie na 1,5 m ponad dno basenu.

Przedpole „lodowca“ wysłane zostało warstwą piasku o miąższości ok. 10 cm, tak aby wodom spływającym z lodowca pozwolić na ukształtowanie w nim doliny. Wszystkie czynności „budowlane“ ukończono dnia 5 marca o godz. 16 i od tej chwili do końca doświadczenia nie robiono na obszarze basenu żadnych istotnych zmian pozostawiając dalszy rozwój wypadków własnemu biegowi. Jediną formą ingerencji z zewnątrz było wprowadzenie za pomocą węzów gumowych dwóch strumieni wody lub skrapiania powierzchni „terenu“ w formie „deszczu“.

W końcu 1-go oraz w 3-im, 5-ym i 9-ym dniu doświadczenia wykonano szkice wysokościowe z poziomcami co 5 i 2,5 cm, a w parę dni po stopieniu się lodu (między 15 a 20 dniem) oraz po zakończeniu całości doświadczenia (w 58-ym dniu) zrobiono szczegółowe zdjęcie topograficzne z poziomcami co 1 cm (fig. 9-13). Oprócz tego dwukrotnie, w tych samych terminach co szczegółowe zdjęcia topograficzne, sporządzono mapki geologiczne i geomorfologiczne powierzchni uformowanych w basenie (fig. 15).

Po zakończeniu eksperymentu dokonano jeszcze specjalnych pomiarów, które pozwoliły skonstruować profile podłużne rzek oraz przekroje poprzeczne dolin. Poza tym wykonano jeszcze kilkadziesiąt zdjęć fotograficznych całości basenu lub jego fragmentów, powtarzając je kilkakrotnie z tego samego miejsca. Doświadczenia zakończono po dwóch miesiącach, a w jakiś czas potem rozkopano „teren“ dla zapoznania się z profilami geologicznymi.

### „Glacialna“ część eksperymentu

#### *Tworzenie się rzeźby po stopieniu „martwego lodu“*

#### OBSERWACJE W CZASIE PRZEBIEGU DOŚWIADCZENIA

Wrażenia z obserwacji w basenie są dosyć dziwne. Przy jednokrotnym jego obejrzeniu patrząc na zwały lodu, piasku i gliny, właściwie ma się wrażenie, „że nic się nie dzieje“. Jest ono analogiczne do tych, które odnosi człowiek nieobeznany z dynamiką rzeźby terenu patrząc na współczesny krajobraz. Obserwując dłużej basen zauważa się, jak od czasu do czasu spadnie jakiś „kamyczek“, zsunie się grudka błota lub zwali się kawałek lodu. Tylko strumień powoli sączącej się wody zdaje się tu reprezentować „życie“.

Spojrzenie na basen po przerwie dziennej, a w niektórych przypadkach nawet po kilku godzinach wskazuje na zachodzące zmiany. Jest ich tak wiele, że trudno się zdecydować, które z nich są istotnie ważne i godne zanotowania. Dopiero po kilku dniach, gdy dana sytuacja dobiega do końca, jako jej konsekwencja zaczyna się wyłaniać określona forma rzeźby i wówczas jest się w stanie ocenić, które ze zjawisk obserwowanych poprzednio miało istotne znaczenie w danym procesie rzeźbotwórczym. W wyniku tego dostaje się do notatek prowadzonych podczas obserwacji dużo uwag nieistotnych, a niejednokrotnie powstają luki w obserwacjach najważniejszych. Dopiero doświadczenia z poprzednich eksperymentów pozwalają na właściwe opracowanie programu obserwacji, ale też tylko dla tych procesów, na które uprzednio zwrócono już uwagę.

Nie należy też do łatwych rzeczy sporządzanie szkiców topograficznych „na bieżąco“, równoległe z toczącą się w basenie akcją. Zajmuje ono tak dużo czasu, że procesy rzeźbotwórcze w drugiej części basenu wyprzedzają to, co zostało pomierzone i przeniesione na papier z pierwszej części basenu. O uzupełnieniu szkicu w dniu następnym oczywiście już nie może być mowy. Jednocześnie bogactwo szczegółów jest tak duże, że nierzadko następuje to trudności w ich przedstawianiu graficznym na mapie. Ideałem byłyby zdjęcia fotogrametryczne, których zastosowanie pozwoliłoby w pełni dokładnie opracować kartograficznie stan „terenu“ utrwalony na kliszy. W naszym przypadku przy robieniu „map“ metodą domiarów trzeba było poprzestać na dosyć ogólnikowym rysunku rzeźby, który niestety nie jest wolny od szeregu nieścisłości.

Dokładniejsze są nasze zdjęcia topograficzne, robione po zakończeniu każdej z części eksperymentu, kiedy procesy rzeźbotwórcze prawie się „zatrzymały“, ponieważ te zdjęcia topograficzne mogły być robione w ciągu kilku dni, bardziej ścisłymi metodami. Stosowano przy nich sieć z nici nylonowych rozpiętą w układzie prostokątnym na jednej wysokości ponad całym basenem. Umożliwiało to nie tylko lepszą lokalizację, ale i ścisłejszy pomiar wysokości punktów. Wszystkie wysokości na szkicach mierzone są od „0“, które leży w najniższym punkcie basenu, koło miejsca ujścia wody. Pomierzone wysokości i rysunek poziomic były jeszcze w końcowych etapach sprawdzane metodą „zatapiań“. Metoda ta dawała bardzo dobre wyniki.

Wszystkie szkice topograficzne w oryginale wykonano w skali 1 : 10 w stosunku do modelu w basenie. Jeśli je porównać z rzeczywistymi zdjęciami topograficznymi „młodych“ terenów polodowcowych, to dochodzi się do wniosku, że zbliżają się one w swoim charakterze (fig. 14) do planów w skalach 1 : 500 do 1 : 1000. Z kolei nasze poziomicę jednocenty-

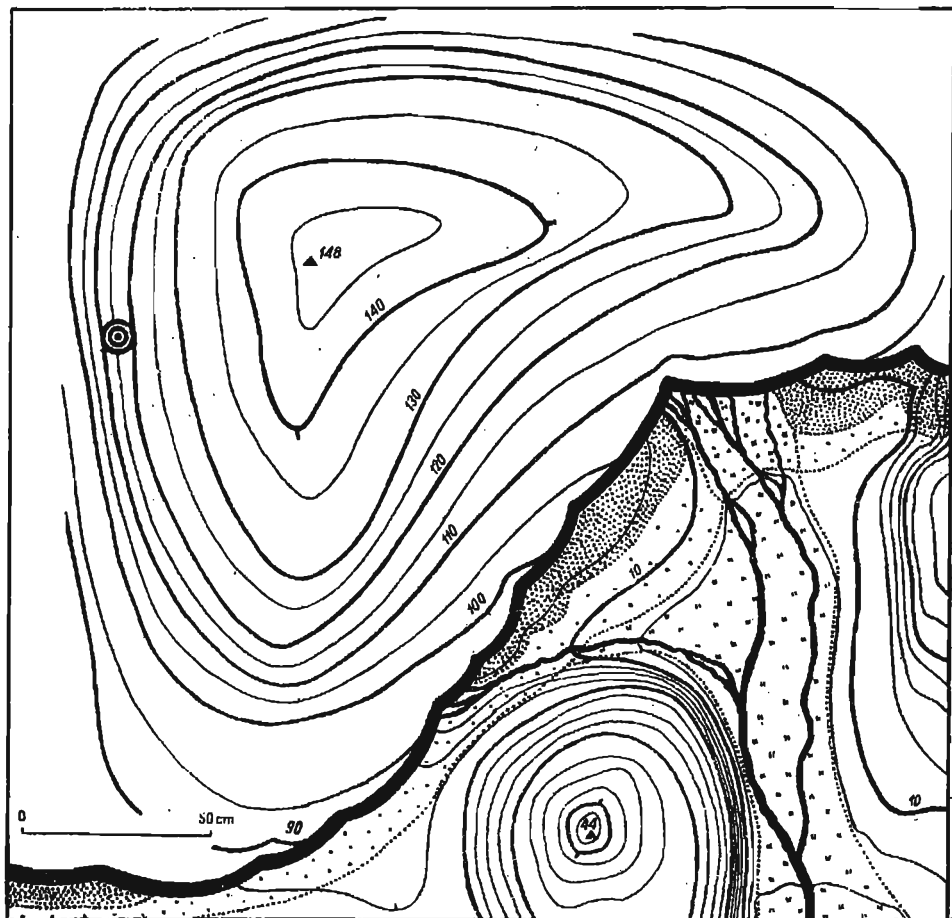


Fig. 9

Eksperyment III (1956). Mapa konfiguracji powierzchni w basenie doświadczalnym po 1-y dniu doświadczenia. Poziomice co 5 cm

1 czoło lodu, 2 kontury brył lodu oddzielonych od głównej jego masy, 3 moreny świeżo usypane w okresie przedstawionym na mapie, 4 moreny usypane w poprzednich dniach, 5 piaszki sandrowe z głazikami stoczonymi z lodu, 6 powierzchnie dolin odpływu wód, 7 jeziora i zastoiska, 8 osady ilaste jezior i zastoisk

Experiment III (1956). Sketch map of surface configuration within the experimental reservoir after the 1st day. Contour interval 5 cm.

1 ice-edge, 2 outlines of ice-blocks broken off from the bulk of ice, 3 moraines, newly heaped up during the time-interval represented by the sketch-map, 4 moraines heaped during the preceding days, 5 Sandar sands with boulders rolled down the ice, 6 surface of water-flow valleys, 7 lakes and marginal lakes, 8 argillaceous deposits of lakes and marginal lakes

metrowe odpowiadają mniej więcej rzeczywistym poziomicom co 2,5 m, a więc skali 1 : 250. Z zestawienia tego wynika, że rzeźba w basenie jest „przewyższona“, jednak w takich granicach, że nie wprowadza to zbyt-niego skażenia w przedstawionym obrazie. Gdybyśmy jednak rzeźbę uzyskaną w basenie porównywali z zupełnie świeżymi formami morenowymi z krajów polarnych, na przykład lodowców Nathorsta, Pencka lub Finsterwaldera na Spitsbergenie, co autor miał możliwość zrobić dzięki znajomości tych lodowców z polskiej wyprawy polarnej 1934 r., to wniosek nasz co do skali byłby inny. W świetle tych obserwacji plan modelu odpowiadałby skali 1 : 100, a poziomice jednocentymetrowe — cięciu co 1 m, tak że w tym przypadku nie trzeba by było mówić o „przewyższeniu“ form, które powstały w czasie doświadczenia.

Dla lepszego wprowadzenia w przebieg eksperymentu podaję poniżej wyciąg z dziennika obserwacji codziennych. Podobnie jak mapy, nie obejmują one wszystkich szczegółów, ale notują ważniejsze zdarzenia, które w dalszym biegu wypadków miały swoje konsekwencje morfologiczne. Dla ułatwienia lokalizacji obserwacji muszą dodać, że w opisie i w orientacji na planach przyjęte zostały dla basenu umowne strony świata. Kierunek od wejścia, z którego szedł powiew ocieplający nazwano „południem“, a przeciwny do niego, zamknięty głąchą chłodną ścianą — „północą“. Odpowiednio do tego po prawej stronie od wejścia znalazł się „wschód“, a po lewej — „zachód“.

Dla obserwowania ruchu materiału morenowego, w kilku punktach na powierzchni lodowca umieszczono numerowane kostki z kredy w formie sześciątów o boku ok. 1 cm, których położenie notowano przy okazji sporządzania każdego szkicu topograficznego. Rachubę czasu zachowano według dni kalendarzowych, tak że określając ilość godzin trwania jakiegoś zjawiska fakt ten trzeba uwzględnić.

### *1-y dzień doświadczenia*

„Budowę lodowca“, jak już powiedziano wyżej, rozpoczęto o godzinie 12-ej i ukończono o godzinie 16-ej tegoż dnia. Dla zmniejszenia wsiąkania wody topnienia w suchy materiał morenowy użyty do budowy, cały „lodowiec“ i jego przedpole zlano wodą w formie „deszczu“ (z węża gumowego). Między godz. 18-20 zrobiono pierwszy szkic topograficzny (fig. 9), w którym uwidocznił pierwszy zarys tworzących się form i sieci wodnej na sandrze.

Przed czołem spadają pojedyncze gładziki, które do godziny 22-ej zdołały już utworzyć niską i płaską morenkę szerokości od kilku do kilkunastu cm. Poszczególne gładziki, szczególnie większe, staczają się jednak znacznie dalej i tworzą do 30 cm szeroką strefę, w której „duże“ gładziki leżą wśród osadów typu sandrowego. Na przedpolu lodu formują się

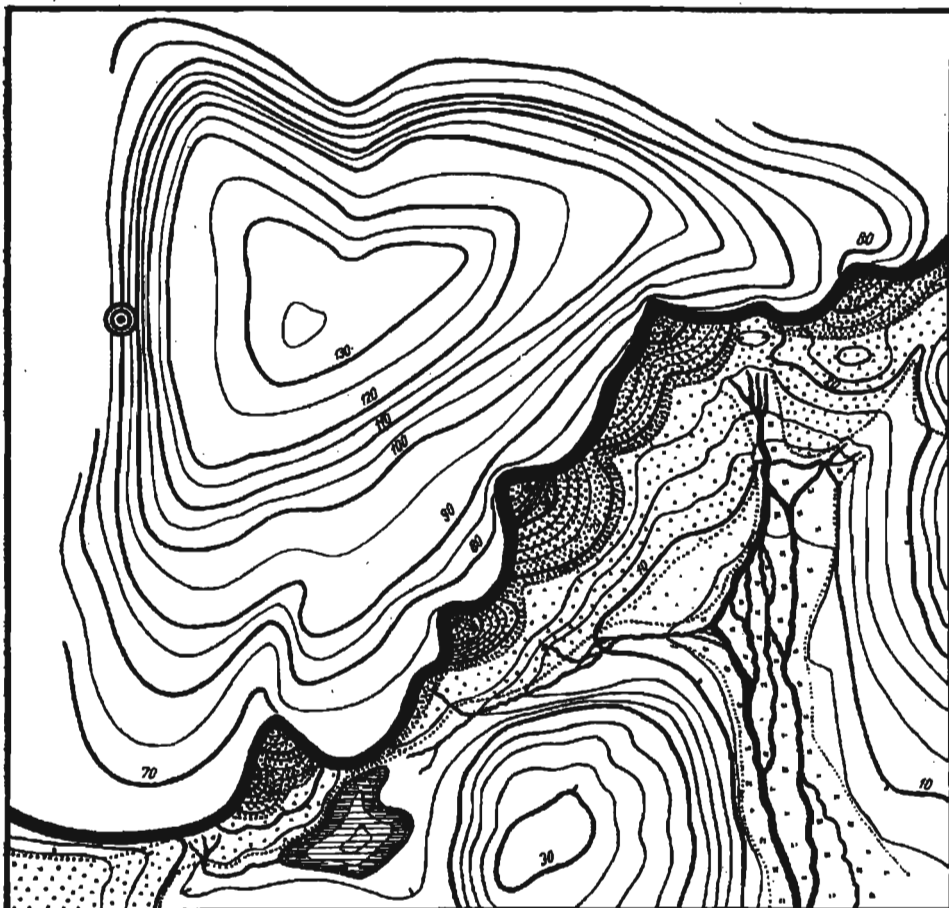


Fig. 10

Eksperyment III (1956). Mapka konfiguracji powierzchni w basenie doświadczalnym po 3-cim dniu doświadczenia. Oznaczenia jak na fig. 9

Experiment III (1956). Situation after three days of the experiment. Scale and legend as in fig. 9

dwa strumyki z wody ściekającej z topniejącego „czoła“ lodowca. Wypływów spod lodu nie ma.

#### 2-gi dzień doświadczenia

Nastąpiło ogólne obniżenie poziomu powierzchni lodu o około 10 cm z zachowaniem poprzednio istniejących na nim nierówności. W brzeżnej części lodu tworzy się szereg szczelin i zaczyna z niego sphywać materiał morenowy (gliniasty), tworzący przed czołem lodu zaczątek „moreny czo-



łowej". Ściana lodu („czoło lodowca") jest w szeregu miejsc przykryta zsuniętym z góry materiałem, który utrzymuje się na niej nawet przy dosyć znacznych kątach nachylenia. Spod lodu ukazuje się pierwszy wypływ. Wody jego przemywają sypiącą się z góry morenę, tak że pozostaje tu tylko czysty żwir. Przy zachodniej krawędzi basenu czoło „cofnęło się" o około 5 cm, pozostawiając między poprzednio usypanym sandrem a lodem dobrze wyrażoną „fosę" kilkucentymetrowej głębokości. Do piasku sandru spadają odrywające się od czoła niewielkie bryłki lodu, po wytopieniu się których zostają małe zagłębienia bezodpływowe. Na samym sandrze rozwinęła się dolina wcięta w świeżo naniesione masy piasku.

### *3-ci dzień doświadczenia*

Lód obniżył się o dalsze kilka centymetrów. W stosunku do jego kształtu z pierwszego dnia zaszło szereg zmian. Zarysowały się na nim połogie obniżenia, a w brzeżnej części powstały dolinki. Ilość szczelin i jaskiń wzrosła. Między niektórymi szczelinami utworzyły się „mosty" lodowe. Czoło lodu pozostało nadal prawie pionowe, ale coraz bardziej zróżnicowane w zależności od struktury lodu.

Materiał morenowy jest jeszcze bardziej rozwodniony niż w dniu poprzednim i wykazuje szereg ruchów spływowych. Przed czołem lodu uformowało się kilka stożków z zsuniętego z lodu materiału morenowego. Mają one od 10 do 15 cm wysokości ponad poziom poprzednio usypanych moren czołowych, przy średnicach podstawy od 15 do 30 cm.

Czoło lodu cofnęło się średnio około 10 cm i obniżyło (w środkowej części do 80-85 cm). Kilka kostek z numerami spadło z lodu i leży na zwale morenowym. Opuszczoną przez lodowiec przestrzeń pokrywa materiał morenowy tworzący sfalowaną, nierówną powierzchnię, ale w całości konsekwentnie pochyloną w kierunku sandru. Żadnych form o charakterze wałów nie ma. Jedynie przed głównym (wschodnim) wypływem spod lodu z materiału zsuwającego się z góry utworzył się niewielki garbik (oddalony już na kilka centymetrów od obecnego położenia wypływu), przez który przelewa się wydostająca się z tego wypływu woda. We wschodniej części na przedpolu lodu, na sandrze, powstało niewielkie zastoisko. Fosa między czołem lodu i moreną usypaną w pierwszym dniu przy wschodniej krawędzi basenu utrzymuje się i poszerza. Pod koniec dnia wykonano drugi szkic topograficzny (fig. 10).

### *4-ty dzień doświadczenia*

Kulminacja lodu obniżyła się w sumie już prawie o 25 cm, a pozostała część powierzchni od 20 do 30 cm. Ilość i amplituda wzniesień na



Fig. 11

Eksperyment III (1956). Mapa konfiguracji powierzchni w basenie doświadczalnym po 5-ym dniu doświadczenia. Oznaczenia jak na fig. 9

Experiment III (1956). Situation after five days of the experiment. Legend as in fig. 9

lodzie wzrosła. Miejsca nowopowstałych obniżeń odpowiadają przede wszystkim strefom zapełnionym tłucznem lodowym i lukom między bryłami jednolitego lodu. Ilość szczelin wzrosła. Zapełnia je zsuwający się materiał morenowy. Na krawędzi lodu pogłębiły się widoczne już w dniu poprzednim dolinki poprzeczne, nacinające jego czoło.

Strefa moreny czołowej narasta intensywnie w dalszym ciągu. Stałe dominującą rolę odgrywają na niej strome spływy przywierające do lodu, chociaż nie są one tak wysokie jak poprzednio. Stożki spływów sprzed trzech dni rozpełzły się i osiadły tracąc oparcie w stopionych ścia-

nach lodu, a na ich miejscu powstają małe pagórki o kulminacjach znacznie niższych niż poprzednio szczyty stożków.

Dalsze kostki numerowane zsunęły się na morenę u podnóża lodu lub tkwią jeszcze na lodzie, ale zbliżają się do jego krawędzi. Główny wypływ spod lodu funkcjonuje w dalszym ciągu, choć poziom jego przelewu przez zamykającą go morenę podniósł się w stosunku do poprzedniego dnia o kilka centymetrów. Widać wyraźnie, jak woda bije spod lodu pod ciśnieniem. Z wypływu zachodniego woda sączy się małym strumyczkiem i szybko wsiąka. Potoki sandrowe na głównym sandrze już wielokrotnie zmieniły swój bieg żłobiąc łożyska między naniesionym przez siebie materiałem i tworząc w nim kilka małych tarasików.

#### *5-ty dzień doświadczenia*

Obszar zajmowany przez lód zmniejszył się już znacznie. Na początku doświadczenia zajmował on powierzchnię 445 dcm<sup>2</sup>; obecnie — ok. 340 dcm<sup>2</sup>. Kulminacja lodu ma 116 cm nad poziom dna basenu (obniżyła się o 32 cm) i znajduje się w nieco innym miejscu niż w pierwszym dniu (przesunięta o ok. 20 cm na południe), ale prawie pokrywa się z punktem, w którym leżała przed dwoma dniami.

Czoło lodu obniżyło się znacznie i wysokość jego nigdzie nie przekracza 70 cm. Stromy jego kształt utrzymuje się nadal. Powierzchnia lodu jest jeszcze bardziej nierówna niż poprzednio. W zachodniej części zaczyna się zarysowywać kilka lokalnych kulminacji. Nie ma stromych wąwozów poprzecznie nacinających krawędź. Pojawiły się natomiast w brzeżnej części jego powierzchni dosyć poogie dolinki. Zniknęły również dalsze stożki spływowe, materiał z nich rozpełzł się wśród moreny czołowej, która zaczyna przybierać formę wału zbudowanego z materiału gliniasto-żwirowego.

W miejscu głównego wypływu wody lód cofnął się w sumie o ok. 25 cm pozostawiając przed sobą w odległości 8 do 10 cm wał usypany z dobrze przemytego żwiru, za którym utworzyło się niewielkie jeziorko, częściowo zajęte jeszcze przez bryłę lodu, która oderwała się od czoła. Woda z tego jeziorka nie przelewa się przez rygiel, ale przesącza się na zewnątrz poprzez żwiry. Brzeżna część lodu przy czole w znacznym stopniu uwolniła się już od pokrywy morenowej i obecnie cofa się, sypiąc stosunkowo mało materiału na morenę czołową.

Przy zachodnim brzegu basenu od zwartej masy lodu oddzieliła się bryła o przekroju poziomym 15 × 40 cm i wysokości ok. 30 cm. Bryła ta jest prawie całkowicie uwolniona od pokrywy morenowej i topnieje w szybkim tempie, pozostawiając po sobie zagłębienie wystające materiałem drobnoziarnistym i mułkowatym.

W ciągu godzin popołudniowych wykonano szkic topograficzny (fig. 11).

Zrobiono kilka próbnych pomiarów temperatury:

— przy wejściu do piwnicy w odległości 4 m od lodu . . . . .	+ 14,4°C
— na sandrze w odległości 1,5 m od lodu . . . . .	+ 12,7°C
— na górnej powierzchni lodu . . . . .	+ 6,8°C

#### *6-ty dzień doświadczenia*

W związku ze znacznym stopniem lodu (kulminacja lodu leży poniżej 110 cm; czoło ma wysokość ok. 60 cm) zaczyna powoli zanikać wysoka, pionowa krawędź jego czoła. Prawie do połowy wysokości jest ona zasypana materiałem morenowym, który w środkowej części basenu sięga do 30-35 cm ponad poziom jego dna. Stożki zsuwowe przy czole odgrywają coraz mniejszą rolę, natomiast częstsze jest zsypanie się materiału przy krawędzi, powodujące powstanie u podnóża ściany lodu niewysokich podłużnych walików.

Na peryferiach zwartej masy lodu, a szczególnie w zachodniej jego części zarysowuje się coraz wyraźniej szereg pagórków lodowych, między które wdzierają się parowy wytopionych już obniżen. Materiał sypany na morenach czołowych jest bardziej gliniasty niż w dniach poprzednich. Jezioro przed głównym wypływem spod lodu rozrasta się. Woda dostaje się do niego w dalszym ciągu pod ciśnieniem spod lodu i przelewa się na zewnątrz, przesączając się przez żwir w miejscu dawnego wypływu na linii moren czołowych z pierwszych dni.

Bryła przy zachodnim brzegu basenu, oddzielona wczoraj od zwartej masy lodu, stopniała już więcej niż do połowy. Resztką jej tkwi jako stromościenna skałka na środku wklęsłej misy powtarzającej jej poprzedni zarys. Dookoła niej gromadzi się materiał obsypujący się i zmywany ze stoków zagłębienia.

#### *7-y dzień doświadczenia*

Obserwuje się dalszy ciąg topnienia i rozczłonkowania się zachodniej części lodu na pojedyncze bryły. Podobnie jak przy zachodnim brzegu, duża bryła (30 × 40 cm) oddzieliła się od zwartej masy lodu w pn.-wschodnim narożu basenu. W miejscu bryły pozostawionej przed dwoma dniami w strefie moreny przed czołem lodu, obecnie powstało dość duże zagłębienie bezodpływowe (25 × 50 cm), wypełnione wodą. W środku tego zbiornika, jako niewielka wysepka, tkwi jeszcze bryłka lodu nawpół zagrzebana w tworzące się w jeziorze ilaste osady wyściełające równomiernie całą misę zagłębienia, z wyjątkiem miejsca zajmowanego przez wspomnianą bryłkę lodu. Dwie bryły lodu (utworzone już poprzedniego dnia) w zachodniej części basenu, leżące nieco na północ

od bryły wyżej opisanej, również topnieją pozostawiając podobne płaskie misy. Nieco na zachód od nich, po małej bryle lodu zagrzebanej wśród moren czołowych, powstaje niewielkie zagłębienie bezodpływowe ( $10 \times 15$  cm), mające kształt lejka około 4 cm głębokości. Kąt pochylenia jego zboczy odpowiada kątom usypu materiału piaszczysto-żwirowego.

Główny wypływ spod lodu we wschodniej jego części działa jeszcze w dalszym ciągu. Tworzące się tu jezioro znacznie się zwiększyło. Widać, że zajmuje ono owalną misę z dwoma mniejszymi zagłębieniami na dnie. Mają one kształt bardziej zaokrąglony niż oba typy podobnych zagłębień w zachodniej części zbiornika. Przez wał morenowy w dalszym ciągu przesącza się woda wypływająca na sandr.

Oprócz głównego wypływu spod lodu we wschodniej jego części, który w sporym odcinku jest zasypany świeżym materiałem morenowym, w odległości 1 m na pd.-zachód od niego (i ok. 1 m od zachodniej krawędzi basenu) pojawia się nowy wypływ. W poprzednich dniach zaznaczał się on bardzo słabo małymi wysiękami. Obecnie ilość wypływającej z niego wody wydatnie wzrosła. Początkowo woda wydostając się spod lodu zatrzymuje się i tworzy przed czołem małe jezioro (kilka centymetrów średnicy), które następnie przelewa się przez niewielki wałek piaszczystej moreny usypany w dniu poprzednim i płynie stałym strumieniem najpierw na południe, a po przekroczeniu moren skręca zdecydowanie na zachód w kierunku głównej doliny, gdzie łączy się z potokiem płynącym od dawnego głównego wypływu.

#### *8-y dzień doświadczenia*

Bryły lodu w pd.-zachodniej części obszaru morenowego są całkowicie stopione. Jedna z tych małych bryłek w końcowym momencie swego istnienia wypłynęła na powierzchnię wody opuszczając zagłębienie, w którym spoczywała dotychczas i żegluje swobodnie po wodach jeziora — zastoiska. Akumulacja w zastoiskach jest coraz słabsza i tworzy się w nich obecnie prawie wyłącznie osad ilasty.

Oba wypływy spod lodu funkcjonują równolegle, ale wyraźnie zaczyna się zaznaczać przeważająca rola wypływu zachodniego (nowego), który formuje sobie bardziej wciętą i lepiej rozwiniętą dolinę. Przed starym (wschodnim) wypływem głównym ponownie tworzy się nowe jezioro, oddzielone od poprzedniego wyraźnym walikiem morenowym.

Zwały morenowe w środkowej części basenu tworzą już wyraźnie zarysowany wał moreny czołowej, zbudowany z nakładającego się na siebie materiału morenowego z kilku pierwszych dni. Z pewnym trudem można tu wyróżnić na zboczu pd.-wschodnim trzy etapy jej sypania za-



Fig. 12

**Eksperyment III (1956).** Mapa konfiguracji powierzchni w basenie doświadczalnym po 9-ym dniu doświadczenia. Oznaczenia jak na fig. 9. Poziomice co 2,5 cm

**Experiment III (1956).** Situation after nine days of the experiment. Scale and legend as in fig. 9. Contour interval 2.5 cm.

znaczone niewielkimi stromiznami w formie jakby tarasów. Kulminacje na wale tworzą wzgórki po rozplyniętych spływach stożkowych z 5-go dnia doświadczenia. Późniejsze spływy po stopnieniu i cofnięciu się lodu rozpełzły się, tworząc pn.-zachodnie zbocze wału morenowego.

W procesie ustawicznie trwającego sypania się moren zdecydowanie przeważają obecnie ruchy spływowe i zsuwowe. Zsypywanie się materiału morenowego z lodu obserwuje się rzadko. Z ukształtowania wa-

łów morenowych można odczytać trzy starsze kolejne stadia cofania się lodu odpowiadające mniej więcej dwudniowym okresom czasu. Czwarte stadium jest dopiero w fazie tworzenia się i można je obserwować *in statu nascendi*.

W materiale pokrywającym powierzchnię lodu dominuje zdecydowanie piasek ze żwirem. Jest to materiał, który był umieszczony między dwiema dolnymi warstwami lodu jako „morena wewnętrzna“. Materiał morenowy gliniasty i żwirowy z wyższych warstw został już cały zsypany na zewnątrz lodowca. W pn.-zachodniej i północnej części zwartej masy lodu oddzieliły się dalsze duże bryły lodu. Przerwano wlewanie wody do studni lodowcowej, gdyż całe jej otoczenie stopniało. W miejscu, gdzie ona istniała, ukazało się wysokie i strome wzgórze usypane z grubego dobrze przemytego żwiru. Na stokach tego wzgórza widać dwa „ostre“ waliki, które schodzą w dół po zboczach, prawie do podstawy wyniosłości. Kierunki ich odpowiadają przerwom między zwartymi blokami lodu.

#### 9-ty dzień doświadczenia

Lód zwarty zajmuje powierzchnię ok. 125 cm<sup>2</sup>, a więc ok. 28% jego pierwotnego obszaru. Łącznie z oderwanymi od niego bryłami ok. 150 cm<sup>2</sup> powierzchnia, na której on jeszcze leży, stanowi nieco mniej niż 1/3 w stosunku do początku doświadczenia. Poziom powierzchni lodu również się obniżył bardzo wydatnie. Przeciętnie ma on wysokości rzędu 40-50 cm. Jedyne w jego środkowej części istnieje dwudzielna kopulasta wyniosłość z kulminacjami o wysokości 66 i 68 cm ponad dno basenu. Ogólną ilość pozostałej jeszcze masy lodu można ocenić na około 0,7 m<sup>3</sup>, a więc jest to mniej więcej szósta część lodu użytego na początku doświadczenia.

Na powierzchni lodu obok „dolinek“ widać wklęsłe zagłębienia w formie zamkniętych kotlin. Lód pokryty jest prawie wyłącznie materiałem piaszczystym z dolnych warstw „moreny wewnętrznej“. Żwir z tej samej warstwy zsunął się już na zewnątrz.

Zupełny brak ruchów zsypanych; materiał morenowy przemieszcza się po powierzchni lodu głównie w formie spływów. Przy krawędzi lodu tworzą się z niego podłużne nasypy zboczowe. Nowotworzące się moreny czołowe, w środku basenu, od poprzednich dzieli dobrze wyrażona fosa z szeregiem niewielkich zagłębień bezodpływowych wydłużonych w kierunku równoległym do osi grzbietu moren. Powstały one bez bezpośredniego udziału lodu lub wody, jedynie jako obniżenia między nierównomiernie zsuwającym się materiałem zwałowym moren czołowych.

W jeziorkach-zastoiskach, których obecnie istnieje kilka, w dalszym ciągu sedymentuje osad ilasty, z wyjątkiem położonych w pobliżu mo-

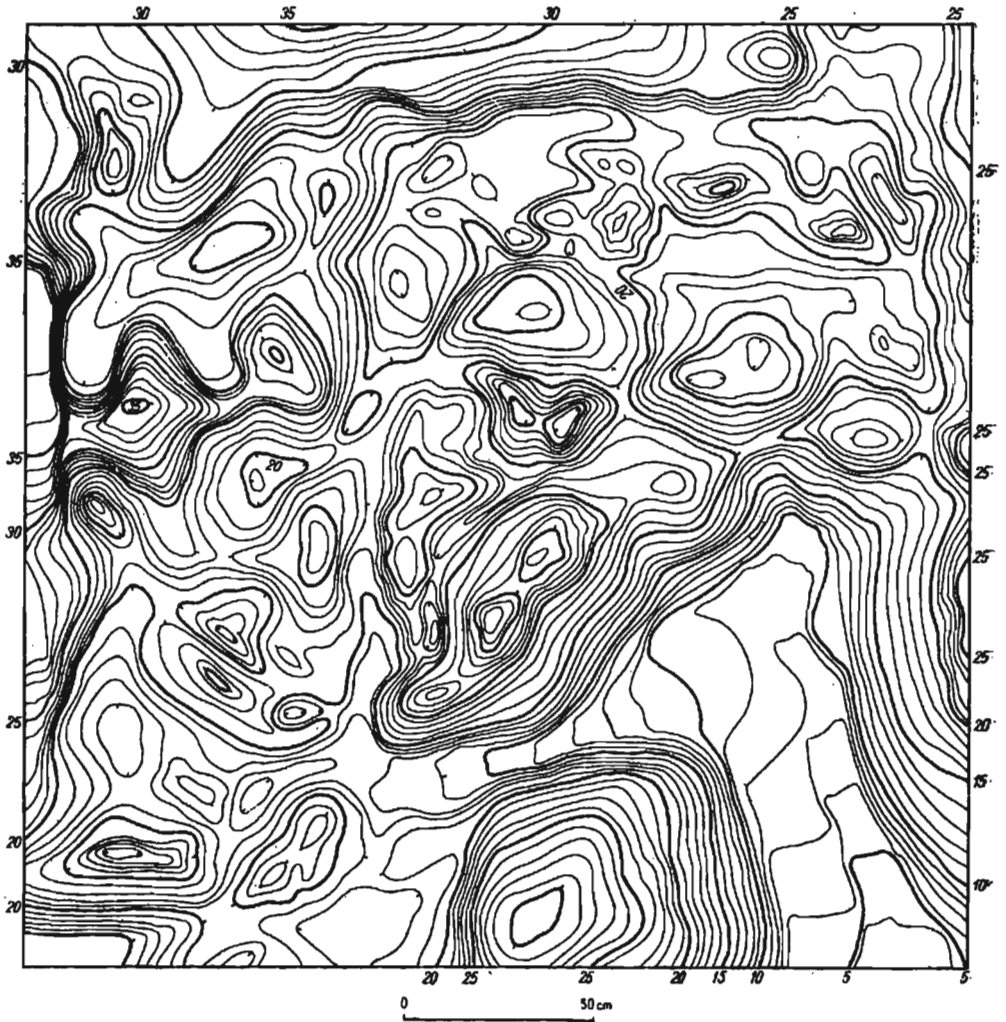


Fig. 13

Eksperyment III (1956). Mapka hipsometryczna powierzchni po zakończeniu glacialnej części doświadczenia. Poziomice co 1 cm

Experiment III (1956). Hipsometric surface sketch map upon termination of the glacial part of experiment. Contour interval 1 cm.

ren, do których dostaje się nieco grubego materiału. Jedno z jeziorek znajdujących się tuż przy czole zostało nawet częściowo zasypane przez spływ moreny z lodu.

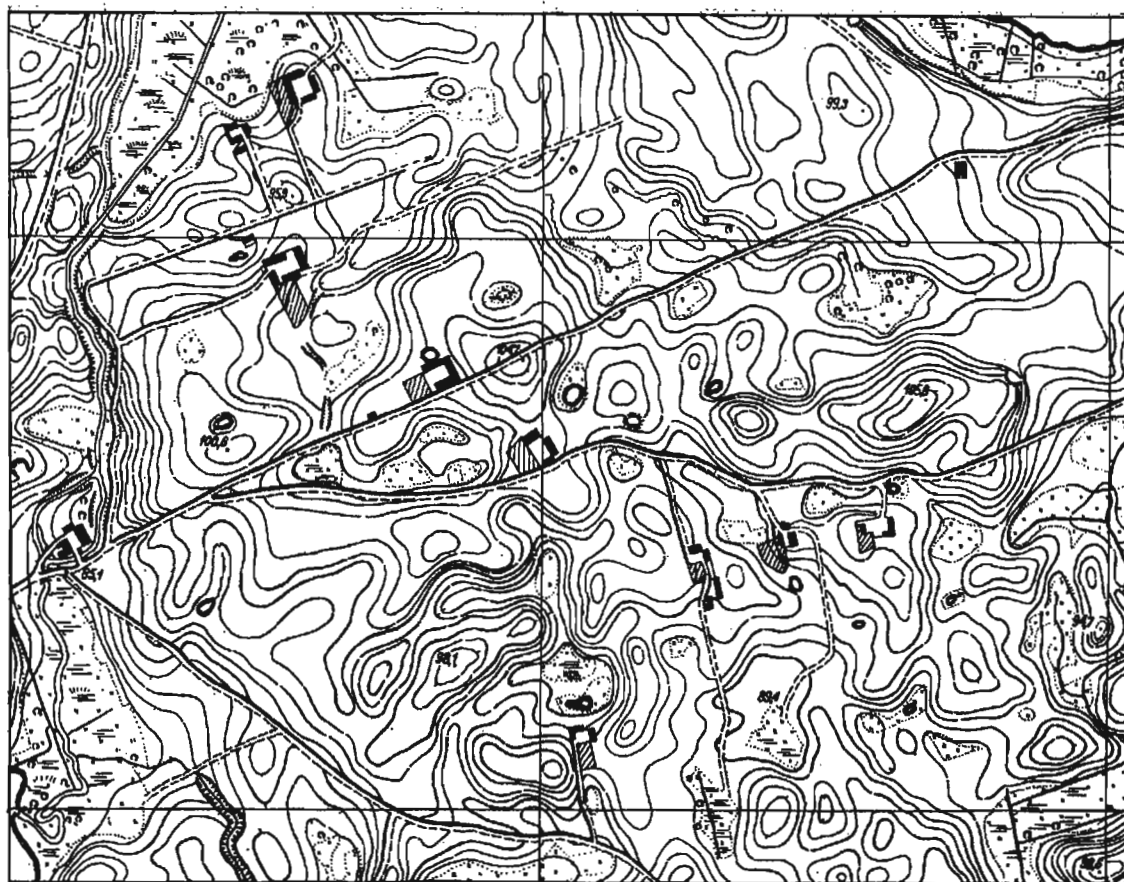
W ciągu dnia wykonano szkic topograficzny, który ukończony został w późnych godzinach popołudniowych i oddaje stan powierzchni z tego czasu (fig. 12).



Fig. 14

Wycinek z mapy topograficznej szczegółowej powiększony do skali porównywalnej z rzeźbą otrzymaną w basenie doświadczalnym. Wycinek z okolic Hawy na Pojezierzu Mazurskim. Skala ok. 1:5000

Fragment of detailed topographic map from the vicinity of Hawa in the Mazury Lake District with enlarged scale, comparable to that of the relief carved out in the experimental reservoir. Scale ca. 1:5000



*10-ty dzień doświadczenia*

Druga seria moren tworzy już wyraźne strefy wydłużonych wzgórz przed lodem, którego czoło odsunęło się już od nich.

W środkowej części wschodniej krawędzi lodu ponownie utworzyło się jeziorko, już trzecie z kolei na tej linii, odpowiadającej głównej drodze wód do wschodniego wypływu tak dobrze wyrażonego w pierwszych dniach doświadczenia. Woda bije spod lodu pod ciśnieniem, tworząc zbiornik, a następnie przelewając się z niego na wschód, przemywa powstały tu w 8-mym i 9-tym dniu wałek morenowy, po którym zostało tylko niewielkie nabrzmienie, oddzielające obecnie powstałe zagłębienie od poprzedniego, tak że ostatecznie oba one znalazły się we wspólnym większym zagłębieniu bezodpływowym (późniejsze jezioro G; ob. fig. 21).

W pozostałych jeziorkach, w których zwierciadło wody leży na różnych poziomach, w dalszym ciągu trwa sedymentacja ilasta. Środkowa masa lodu jest coraz bardziej pocięta zagłębieniami i nierównościami i wykazuje skłonność do rozdzielenia się na kilka części.

*11-ty i 12-ty dzień doświadczenia*

Na miejscu zwartej środkowej masy lodu z 9-go dnia pozostały tylko cztery większe bryły o rzucie poziomym od 8 do 15 dcm<sup>2</sup>, zajmujące razem powierzchnię 43 dcm<sup>2</sup> i o łącznej objętości lodu około 0,1 m<sup>3</sup>. Wysokość lodu tylko w niewielu punktach dochodzi do 30-35 cm.

Bryły te przysypane są z wierzchu prawie wyłącznie materiałem piaszczystym. W sąsiedztwie brył tworzy się skomplikowana „garbata” rzeźba, bez wyraźnie określonych większych form.

Stare wały morenowe z pierwszych pięciu dni już ukształtowały się całkowicie i od pewnego czasu stanowią trwałe elementy rzeźby, nie ulegające dalszym widocznym zmianom. Jednakże trwałość wymienionych form nie jest równoznaczna z ich niezmiennością. Pomiarów punktów wysokościowych stwierdzają, że nadal osiadają one nieco, a po deszczach (sztucznych) drobniejsze formy na nich obniżają się i zacierają, dając jakby bardziej zgeneralizowany obraz. Trzech stadiów sypania moren z pierwszego tygodnia, o których mowa była poprzednio, już nie można tak dobrze rozpoznać, jak to było możliwe jeszcze w ósmym dniu doświadczenia.

Zarysy mis bezodpływowych z jeziorkami zastoiskowymi są już również utrwalone. Po deszczach ze zboczy pagórków spływają do nich strumyki, syjąc nieduże, płaskie stożki napływowe. Nie ma również większych zmian na przestrzeniach sandrowych.

Następuje wyraźna faza znacznego zmniejszenia się nasilenia rzeźbotwórczych procesów glacialnych.

*13-ty i 14-ty dzień doświadczenia*

Lód w środkowej części basenu stopniał już całkowicie. W miejscu, gdzie leżały jego ostatnie bryły, powstał obszar pagórkowaty, piaszczysto-żwirowy z dosyć rozległymi zagłębieniami bezodpływowymi, w których obrębie jest dosyć dużo drobnych nierówności. W nowo powstałych zagłębieniach osadzają się mułki i piaski, a brak jest sedimentacji ilastej. Stadium jezierek zastoiskowych w tych obniżeniach trwa krótko.

Na pozostałej części terenu widać drobne zmiany wyrażające się „osiadaniem“ młodszych form; starsze pozostają na pozór niezmienione.

*15-ty, 16-ty i 17-ty dzień doświadczenia*

Procesy rzeźbotwórcze związane z lodem skończyły się już zupełnie. Dobięła końca również pierwsza faza intensywniejszego osiadania zwałów morenowych. Jeziorka-zastoiska wysychają.

Podczas sztucznych deszczów materiał drobniejszy jest wyplukiwany z obszarów bardziej wyniesionych i wały moren czołowych stają się na powierzchni bardziej przemyte, lepiej uwidaczniając swoją „kamienistość“. Po deszczach w zagłębieniach odżywają ponownie jeziorka, do których znoszony jest materiał piaszczysty, zacierający stopniowo drobne formy rzeźby na ich dnie.

Mimo dosyć obfitego deszczu odpływ powierzchniowy na obszarach wewnątrz moren czołowych nie istnieje, wszystkie wody ściekają „drogami podziemnymi“, poprzez dobrze przepuszczalne piaski i żwiry. W zagłębieniach woda zatrzymuje się na powierzchni dzięki wyściółce ilastej, która powstała w nich w fazie zastoiskowej. Zagłębienia, które nie przeszły fazy zastoiskowej i nie mają na swym dnie uszczelnienia ilastego, mimo obfitego deszczu, pozostają suche.

W ciągu 18-20 dnia od początku doświadczenia wykonane zostało szczegółowe zdjęcie topograficzne, przedstawione na fig. 13. Na tym pierwszej części eksperymentu zakończono.

## PRZEBIEG TOPNIENIA LODU

Szereg wykonanych w czasie doświadczenia szkiców topograficznych oraz notatek z doraźnych obserwacji pozwala na zestawienie w jednym szkicu głównych etapów topnienia lodu i rozmieszczenia związanych z nim form „akumulacji glacialnej“ (fig. 15).

Topnienie lodu rozpoczyna się od stosunkowo powolnego „cofania się“ zwartym frontem czoła lodu. W ciągu pierwszych pięciu dni przesu-nęło się ono wstecz o około 25 cm. Średnia szybkość tego procesu w tym okresie wynosiła więc około 5 cm na dobę i w zasadzie w tych samych granicach utrzymywała się przez cały czas eksperymentu.

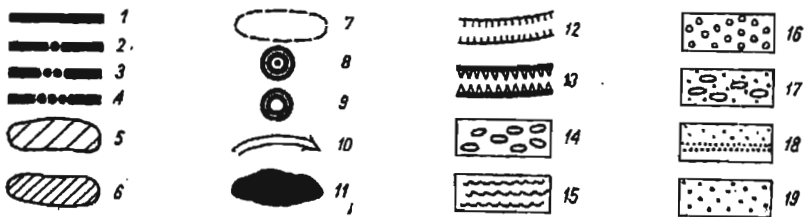
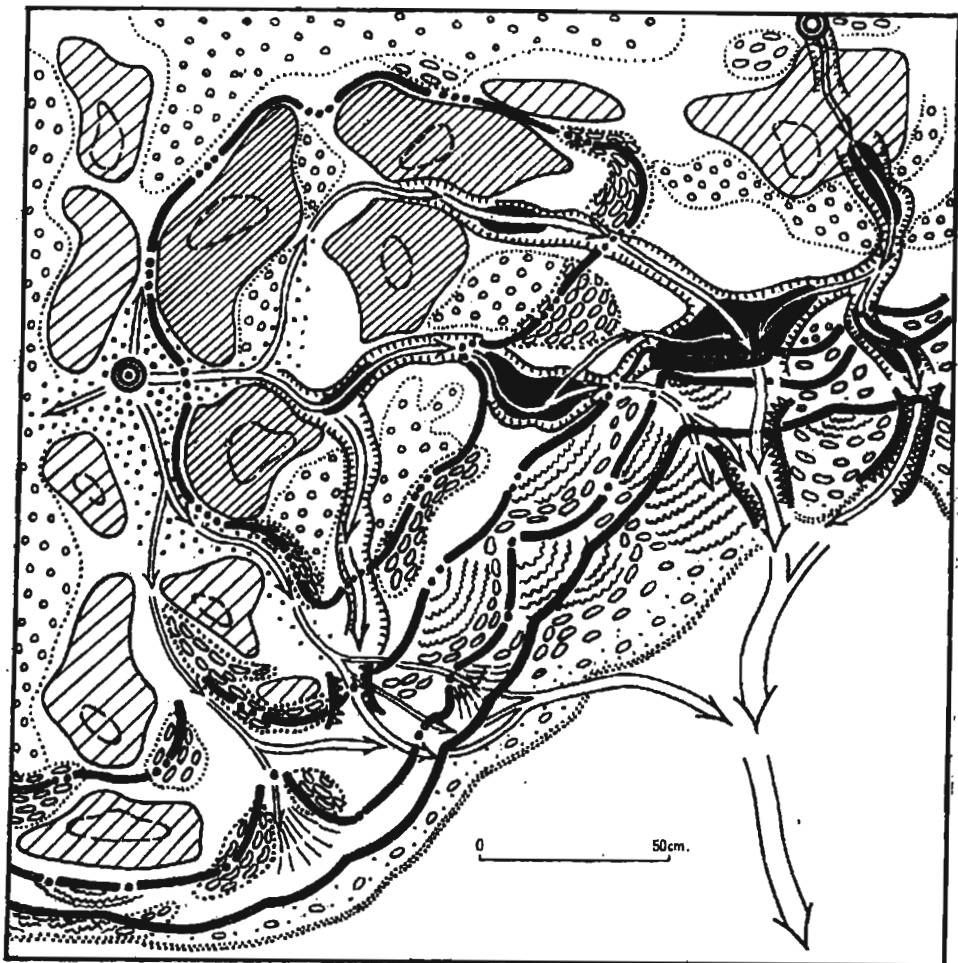


Fig. 15

Eksperyment III (1956). Szkic etapów topnienia lodu i odpływu wód pod lodem oraz związanych z nimi typów moren i form rzeźby i położenie czoła lodu na początku doświadczenia; 2, 3, 4 położenie czoła lodu w 3-im, 5-tym i 9-ym dniu doświadczenia; 5, 6 zarysy brył lodu po ostatecznym rozdzieleniu się jego głównej masy; 7 zarysy szczątkowych partii lodu w ostatniej

Inaczej natomiast kształtuje się prędkość osiadania pionowego górnej powierzchni lodu. Mierzona ona była na środku głównej masy lodu, na jej kulminacji. Punkt ten na początku doświadczenia leżał na wysokości 148 cm, w trzecim dniu na 132,5 cm, w piątym na 116 cm, w siódmym na 94 cm, a w dziewiątym na 66 cm. W dwunastym dniu, po całkowitym stopnieniu lodu, w miejscu tym utworzyło się zagłębienie z dnem na poziomie 18 cm, a po kilku dalszych dniach grunt osiadł jeszcze do 16 cm ponad dno basenu (fig. 16).

Prędkości obniżania się powierzchni kulminacji na lodzie w pierwszych pięciu dniach wynosiły średnio 7,5 do 8,5 cm na dobę, wykazując tendencję do stopniowego, ale nieznacznego wzrostu. Po piątym dniu powłoka morenowa zaczęła spełzać z lodu i szybkość obniżania się jego powierzchni w następnych dniach zaczęła wzrastać kolejno do 10, 12, 13 i 15 cm dziennie.

W dziewiątym dniu na lodzie pozostały już tylko pojedyncze strzępy morenowe i od tego momentu lód obniżał się dosyć równomiernie z szybkością mniej więcej ok. 16 cm na dobę, aż do chwili całkowitego jego stopnienia w 12-ym dniu eksperymentu.

fazie topnienia brył lodu; 8 główna studnia lodowcowa z dopływem wody z góry; 9 miejsce wprowadzenia dopływu wody pod lód; 10 kierunki odpływu wód pod lodem i na jego przedpolu; 11 przegłębienia eworsyjne; 12 krawędzie dolin odpływu wód pod lodem; 13 przełomy w wałach morenowych w miejscu wypływu wód spod lodu; 14 moreny czołowe „zsykowe“ z przemytego materiału żwirowego; 15 moreny czołowe „zsuwowe“ i „spływowe“ z materiału słabo przemytego i gliniastego; 16 moreny innych typów; 17 piaski sandrowe z głazkami stoczonymi z lodu; 18 granica zasięgu materiału morenowego; 19 żwirzy przemyte wzdłuż dróg odpływu wód pod lodem

Experiment III (1956). Sketch drawing showing stages of the melting of ice and escape of water beneath ice, also associated types of moraines and forms of relief

1 position of ice-edge at the beginning of the experiment; 2, 3, 4 position of ice edge on the 3rd, 5th and 9th days of the experiment; 5, 6 outlines of ice-blocks after final detachment from the bulk of glacier; 7 outlines of ice-relics during the last stage in the melting of ice-blocks; 8 main glacier well fed by water from top; 9 site where water flowing under the ice was introduced; 10 directions of water outflow under the ice and in the glacier's forefield; 11 evorsion deepening; 12 margins of valleys carrying off water beneath the ice; 13 breaks in moraine ridges at sites of outflow of subglacial water; 14 terminal "block" moraines built of outwashed gravel material; 15 terminal "creep" and "flowage" moraines built of poorly outwashed argillaceous material; 16 other types of moraines; 17 Sandar sands with boulders rolled down the ice-slope; 18 boundary of the range of moraine material; 19 gravels outwashed along the route followed by outflowing subglacial waters

W podobny sposób, ale w tempie nieco wolniejszym ze względu na grubszą powłokę morenową, „osiadł” również lód w innych częściach powierzchni „lodowca”. Prowadziło to do stopniowego zmniejszania się maksymalnej amplitudy nierówności na jego górnej powierzchni (w pierwszych dniach około 55-60 cm, w piątym dniu około 45 cm, a w dziewiątym — niecałe 30 cm).

Topnienie masy lodu pokrytego z wierzchu morenami odbywało się niejednakowo w różnych jego częściach. Front („czoło”) lodu cofało się dosyć równomiernie, powierzchnia zaś górna obniżała się ze zmien-

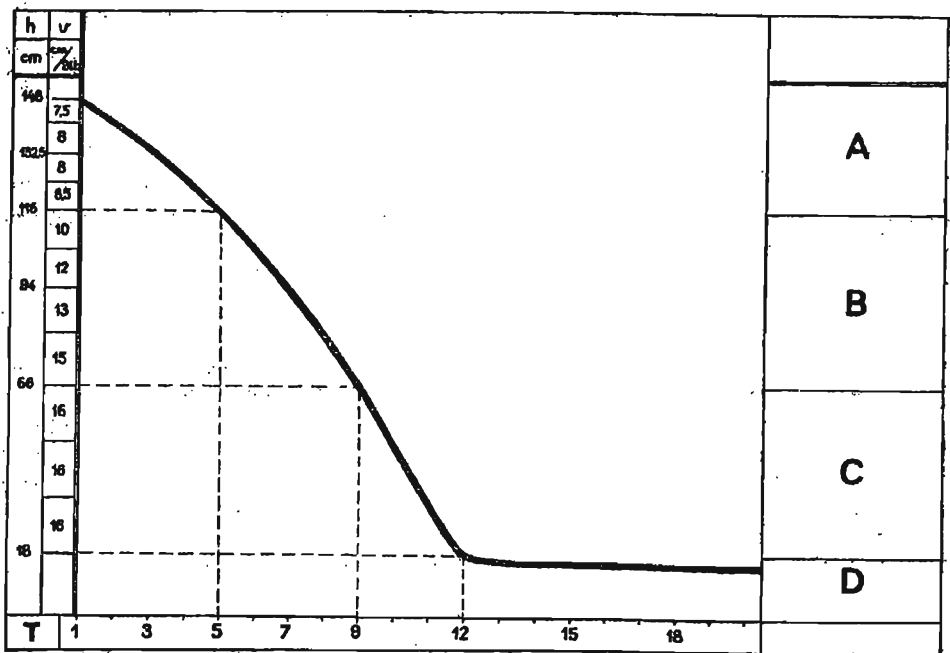


Fig. 16

Eksperyment III (1956). Wykres obniżania się wysokości głównej kulminacji lodu T kolejne dni doświadczeń, h rzędna wysokości kulminacji lodu ponad dnem basenu doświadczalnego, v szybkość obniżania się kulminacji lodu w cm na dobę w poszczególnych dniach doświadczenia; A, B, C, D wyróżnione okresy w przebiegu topnienia lodu (ob. tekst)

Experiment III (1956). Diagrammatical drawing showing the reduction of the main ice culmination

T successive days of the experiment, h height of ice culmination above the floor of the experimental reservoir, v rate of subsidence of ice culmination, in centimetres per 24 hours, during the various days of the experiment; A, B, C, D ice-melting stages as differentiated during the experiment (see text)

nymi prędkościami, zależnie od jej ukształtowania. Każdy z tych procesów miał określoną strefę, w której przeważało jego działanie.

W miarę topnienia czoła zwartej masy lodu powstawały w nim poprzeczne nacięcia, skutkiem czego front lodu był coraz bardziej postrzępiony. Nacięcia, posuwając się wzdłuż stref wypełnionych gruzem lodowym i silnie spękanych, doprowadziły do oddzielenia się pojedynczych brył lodu, które znalazły się na przedpolu lodowca, z dala od głównej masy lodu. Bryły te z reguły składały się z większych, jednolitych bloków lodu. Na ich brzegach uformowały się własne lokalne „czoła” otaczające dookoła te bryły. Pierwsza bryła tego rodzaju oddzieliła się od głównej masy lodu w piątym dniu doświadczenia. W następnym okresie (5-ty - 9-ty dzień) było ich już siedem.

Podobny los spotkał i resztę głównej masy lodu, która w 9-ym dniu tworzyła jeszcze zwarty płat o powierzchni około 125 dcm<sup>2</sup>, a w dziesiątym i jedenastym dniu rozpadła się na cztery niezależne bryły po kilkanaście dcm<sup>2</sup> powierzchni każda.

W miarę komplikowania się linii czoła i oddzielania się brył, długość sumaryczna frontu lodu (początkowo 92,5 dcm) stopniowo wzrastała, osiągając największą wartość w dziewiątym dniu (122,5 dcm), po czym szybko zaczęła maleć (w 11 dniu — około 60 dcm).

Przeciętnie na jeden decymetr bieżący frontu lodu, jak wynika z przeliczeń zrobionych dla dwudniowych okresów, ubywa dziennie 0,5 do 0,6 dcm<sup>2</sup> powierzchni zajmowanej przez lód, co odpowiada bezpośrednio obserwowanemu „cofaniu się” czoła ok. 5 cm na dobę. Nasuwa to wniosek, że szybkość zmniejszania się powierzchni zajmowanej przez lód przy topnieniu jest przede wszystkim zależna od długości jego frontu (czy też obwodu brył), oczywiście w takich warunkach jak w czasie doświadczenia, to znaczy przy niewielkich wahaniami temperatury, w mało zmiennych warunkach „klimatycznych”.

#### RUCHY MATERIAŁU MORENOWEGO

Dla obserwacji ruchów grubszego materiału morenowego w czasie eksperymentu na powierzchni lodu położono 20 numerowanych kostek. Kostki te zrobione były z kredy i miały kształt sześciątów o boku 1 cm. Osiemnaście z tych kostek umieszczono w charakterystycznych punktach na lodowcu (fig. 17). Z 10 kostek ułożonych w strefie czoła lodowca oraz 8 na kulminacji lodowej i na jej zboczach oraz 2 na sztucznie zbudowanym wzgórzu na przedpolu, odnaleziono tylko 8 kostek w strefie czołowej oraz 3 na lodowcu; 7 kostek zaginęło.

Większość kostek wykazała ruchy odbywające się w zasadzie zgodnie z pochyleniem pierwotnej powierzchni lodu, chociaż droga przez nie

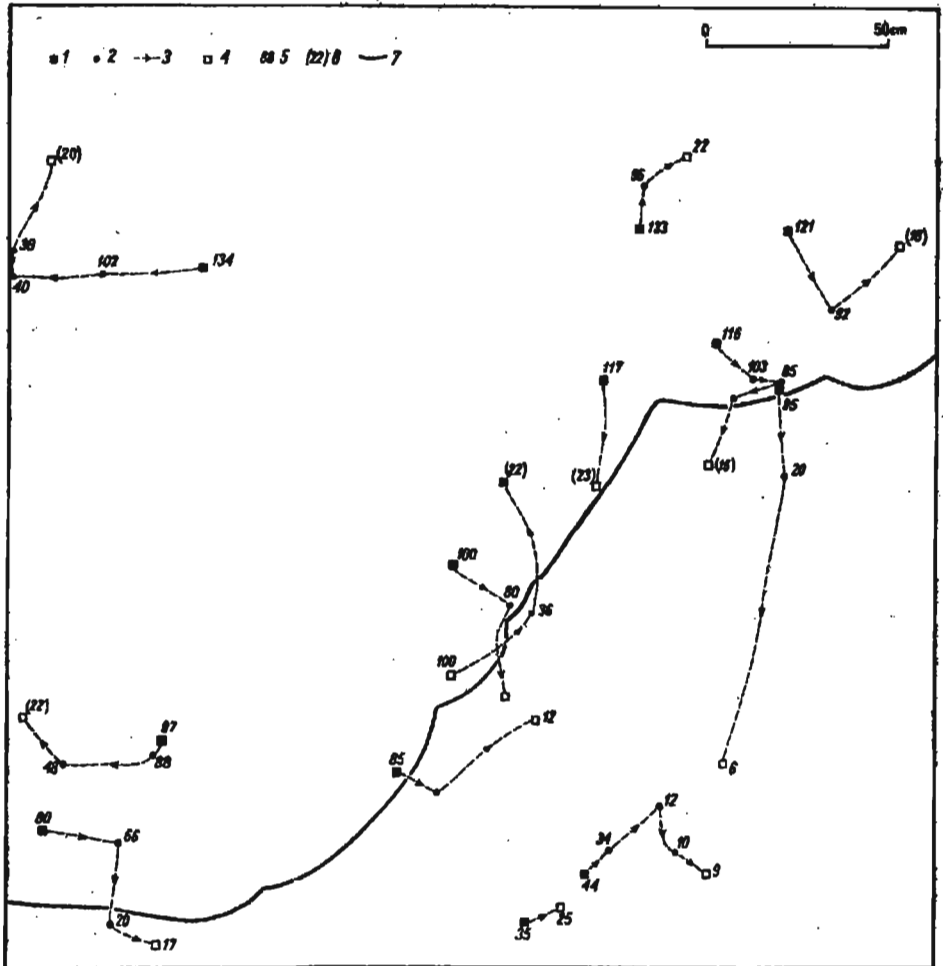


Fig. 17

Eksperyment III (1956). Drogi odbyte przez znaczone kostki umieszczone na lodzie na początku doświadczenia

1 położenie kostki na początku doświadczenia, 2 miejsce dłuższego postoju kostki, 3 drogi przebyte przez kostki, 4 końcowe położenie kostki, 5 rzędna wysokości położenia kostki na powierzchni, 6 rzędna wysokości kostki zagrzebanej wśród moren, 7 początkowe położenie czoła lodu

Experiment III (1956). Routes followed by marked cubes placed on the glacier at the beginning of the experiment

1 position of cube at the beginning of the experiment, 2 longer stop of cube, 3 routes followed by cubes, 4 final position of the cube, 5 height of cube position on surface, 6 height of cube buried in moraines, 7 initial position of ice-edge



przebyta z reguły miała kształt zygzakowaty. W pojedynczych przypadkach wystąpiły jednak również ruchy wsteczne (kostka nr 18). Stało się to wskutek tego, że kostka dostała się do stromego stożka usypanego przy prawie pionowym czole lodu, po stopnieniu którego cała górna część stożka zwała się „wstecz“ i rozpełzała się tworząc stok wzgórza od strony lodowca.

Ruchy kostek z zasady odbywały się nieregularnie. Przez długi czas leżały one na jednym miejscu, osiadając przez czas dłuższy w miarę topnienia lodu razem z całą masą moren powierzchniowych, a potem przesuwały się gwałtownie na nowe miejsce. W szeregu przypadków przesunięcia tego rodzaju powtarzały się wielokrotnie i miały różne kierunki. Przemieszczenie kostek w rzucie poziomym na ogół wynosiło od 50 do 80 cm, cała zaś przebyta przez nie rzeczywista droga od 88 do 178 cm.

Na wzgórzu zbudowanym na przedpolu, które w swoim jądrze miało dużą bryłę lodu, umieszczono dwie kostki mające zanotować ewentualnie istnienie ruchów soliflukcyjnych. Ujawniły się one istotnie i nastąpiło przemieszczenie obu kostek. Ruchy te były znacznie mniejsze niż na lodowcu, ponieważ kostka umieszczona na dosyć płaskiej powierzchni na stoku wzgórza (nr 8) przesunęła się tylko o 1 cm, a położenie jej obniżyło się z rzędnej „35“ na „25“. Druga zaś kostka, pierwotnie położona na szczycie wzgórza (rzędna „44“), najpierw zsunęła się na stok (rzędna „34“), a następnie wzięła udział w dość znacznym zsuwie zboczowym, który obniżył ją do poziomu rzędnej „12“, przesuując ją w sumie o 28 cm od pierwotnego położenia. W ostatnim etapie z krawędzi podmytej przez erozję boczną potoków sandrowych dostała się ona do osadów rzecznych i odbyła z nimi jeszcze dalszą drogę długości około 25 cm.

W sumie obserwacje nad ruchami kostek potwierdziły istnienie znacznych przemieszczeń poziomych materiału przy tworzeniu się moren. Ani jedna kostka nie znalazła się w miejscu, które leżałoby ściśle poniżej punktu, w którym została ona umieszczona na początku doświadczenia, a co najmniej pięć z nich znalazło się w ogóle poza obrębem „lodowca“, na którym umieszczone były pierwotnie.

Przy dalszych doświadczeniach, mimo ogromnej wygody, którą dają doskonale wyróżniające się od reszty materiału morenowego białe kostki kredowe, należałoby jednak przejść na znaczone kolorami ziarna żwiru, aby uniknąć różnic wynikających z ich kształtu i mniejszego ciężaru właściwego, niż pozostały materiał morenowy.

Oprócz kierunków przemieszczeniaznaczonych kostek w rzucie na płaszczyznę, można jeszcze zestawić ich ruchy pionowe i rzeczywiste przebyte przez nie drogi, tak jak to zostało zrobione na wykresie (fig. 18). Wyróżniają się na nim dwie grupy: pierwsza, w której linia drogi ko-

stek idzie od razu stromo w dół i druga, gdzie w początkowej części jest ona bardziej płaska. Pierwsza grupa odpowiada kostkom, które leżały w pobliżu krawędzi lodu, druga zaś — znajdującym się od niej w pewnej odległości (20-40 cm).

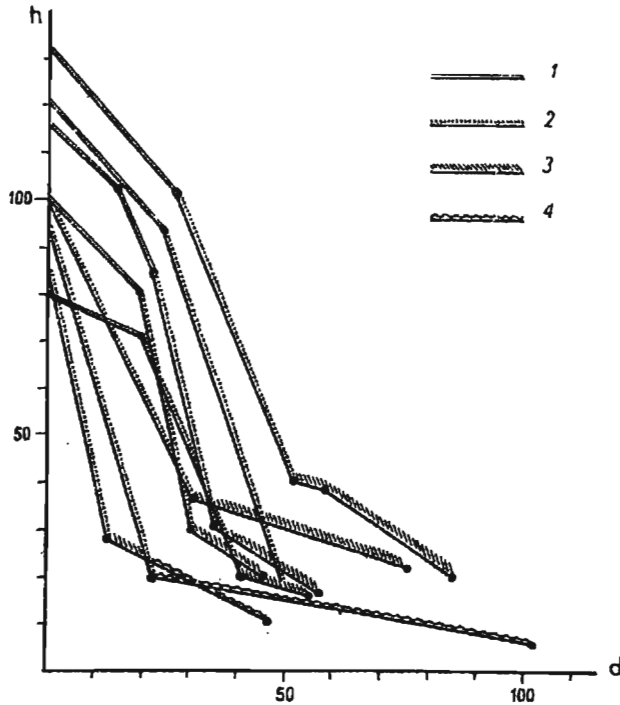


Fig. 18

Eksperyment III (1956). Wykres dróg przebytych przez znaczone kostki

1 zsuwanie się po lodzie, 2 spadanie z czoła lodu, 3 ruchy wśród moren, 4 transport przez wodę bieżącą

Experiment III (1956). Diagrammatical sketch of routes followed by marked cubes

1 creep on ice, 2 falling over the ice-edge, 3 movements in moraines, 4 transport by flowing water

Analizując ruchy kostek możemy wyróżnić cztery ich rodzaje:

1) zsuwanie się po powierzchni lodu (bardziej płaska część krzywej charakterystyczna dla kostek oddalonych od krawędzi lodu);

2) spadanie z krawędzi lodu (stroma część krzywej, występująca u wszystkich kostek);

3) ruchy kostek w obrębie moreny (płaskie końcowe odcinki górnego zespołu krzywych);

4) transport wodny (płaskie końcowe odcinki dwóch kostek, które dostały się najniżej).

Kolejność tych ruchów następowała po sobie zawsze w przytoczonym wyżej porządku, nawet w przypadku, gdy któryś z tych rodzajów ruchu został pominięty. Należy zaznaczyć, że poszczególne rodzaje ruchów układają się strefami w pewnych piętrach wysokościowych.

Warto jeszcze zauważyć, że oble kostki, które były po upadku z krawędzi lodu transportowane dalej przez wodę, pierwotnie znajdowały się w pobliżu skraju lodu, a więc należały do tej części materiału, która najwcześniej znalazła się u podnóża czoła lodu.

#### PROCESY MORFOGENETYCZNE W CZASIE TOPNIENIA LODU

Równoległe z topnieniem lodu odbywał się proces tworzenia się moren. Pierwszym jego objawem było staczanie się z wysokiej krawędzi czoła lodu pojedynczych głazików, które spadały o kilka do kilkunastu centymetrów przed nim. W niektórych przypadkach spadały one w odległości do 30 cm od lodu. Stopniowo z głazików tych zaczął się formować mały wałek imitujący morenę czołową.

Po pewnym nadtopieniu się górnej części krawędzi lodu, zaczęły się z niej zsuwać partie piaszczysto-gliniaste, tworząc przylegające do ściany lodowej strome stożki spływowo. Po stopieniu się i „cofnięciu“ ściany lodowej, kształt ich uległ całkowitej zmianie. W dolnej części, spoczywającej na podłożu poprzednio już usypanej moreny, zmiany te były mniejsze i polegały głównie na rozmyciu podstawy stożków przez drobne strużki wodne spływające z lodu. Natomiast górna część tych stożków, która straciła oparcie w leżącej za nią masie lodu, przeszła zupełne przeobrażenie. W miarę topienia się i odsuwania się lodu od linii, na której się on znajdował w chwili tworzenia się spływów, górna część stożków obsypywała się w dół i zsuwała „wstecz“ w szczelinę powstałą między lodem i wałem morenowym.

W konsekwencji tego procesu, po stromym stożku spływowym pozostawało niewielkie płaskie wyniesienie, które później ginęło przysypane przez dalszą akumulację morenową. W środkowej części basenu proces ten powtarzał się wielokrotnie. Zsypujący się żwir oraz gliniaste zsuwy przykrywając materiał, który dostał się tam poprzednio podobną drogą, zaczęły nadbudowywać wał, w piątym dniu mający już do 25 cm wysokości. W tym czasie miał on kształt nieregularnej powierzchni dosyć stromo pochyłonej na zewnątrz od czoła lodu. Nadbudowany jeszcze tą samą drogą w następnych dniach osiągnął on ostatecznie na kulminacjach wysokość 30-35 cm.

Intensywne zsuwanie się materiału morenowego ze skraju lodu, odbywające się przez czas dłuższy, ogołociło w dużym stopniu jego część brzeżną z moren powierzchniowych. Ponieważ dopływ materiału z zaplecza odbywał się bardzo wolno, powstała tu listwa lodu nie pokryta moreną i nie dająca dalszych zsyków i spływów, wobec czego lód cofał się dalej, ale już nie sypał moren tak intensywnie jak poprzednio. Miało to natychmiastową swoją konsekwencję w kształtowaniu się tworzącego się wału morenowego, za którym zaczęło się formować obniżenie. Do tego obniżenia zsunęła się część materiału z górnej części ostatniej generacji stożków-spływów. Dolne części tych stożków pozostały na grzbiecie wału, tworząc pagórkowate formy zbliżone do wzgórków wieńczących często w rzeczywistości kulminacje moren czołowych.

Opisany wyżej przebieg tworzenia się form morenowych miał miejsce w środkowej i wschodniej części basenu, natomiast w zachodniej jego części, w pobliżu krawędzi zbiornika, odbywał się on inaczej. Tu również początkowo usypał się drogą „zsykową“ niewielki żwirowy walik morenowy, pokryty potem przez piaszczyste zsuwy. Szybko został on przerobiony razem z zsuwami w płasko pochyloną powierzchnię, łagodnie spadająca na zewnątrz od „lodowca“. Krawędziowa partia lodu, ogołociona z „moreny powierzchniowej“, przy dalszym topnieniu nie dała już zsuwów. Pomiedzy poprzednio usypaną formą a lodem, po jego „cofnięciu się“ utworzyła się głęboka fosa poszerzająca się jeszcze później. Zamiast moreny czołowej maksymalny zasięg lodu zaznaczył się tu krawędzią stromo spadającą w stronę lodowca, później trochę złagodzoną przez jej wtórne rozmycie.

Moreny typu „zsuwowego“ (spływowego) i „zsykowego“ tworzyły się intensywnie tylko w ciągu pierwszych kilku dni, po czym rola ich zmalała i miejsce ich zaczęły zajmować moreny powstające drogą „osiadania“ i powolnego osuwania się materiału morenowego ze zboczy.

Dopóki lód tworzył większą zwartą całość, dopływ ten, choć stopniowo malejący, jednak ciągle istniał. Gdy natomiast lód rozdzielił się na pojedyncze bloki, sytuacja ta szybko uległa radykalnej zmianie i rozpoczął się cykl przemian brył lodu uwalniających się z pokrywy morenowej, analogiczny do znanego nam z pierwszego eksperymentu (1951). W miejscu, gdzie leżał blok, w miarę zsuwania się z niego pokrywy morenowej, tworzyła się dosyć obszerna, płaska, wklęsła misa, wyścielana coraz drobniejszym materiałem (fig. 19). Od momentu, w którym lód uwolnił się od nadmiaru pokrywających go moren, akumulacja u jego podnóża tak zmalała, że za cofającym się frontem lodu zaczęło się tworzyć następne, już znacznie mniejsze zagłębienie, ograniczone stromymi zboczami, wyścielane drobniejszym materiałem, w którym, w końcowym momencie topnienia bryły lodu, powstało małe jeziorko, po którym zo-

stał następnie ślad w postaci cienkiej warstwy ilastego osadu. Forma, która powstała ostatecznie, jako całość miała kształt zagłębienia „podwójnie wklęsłego“, z zewnątrz otoczonego niewielkim walikiem (fig. 20).

W przypadku bryły znajdującej się w pn.-wschodnim narożu basenu wystąpiło pewne odchylenie od wyżej opisanego przebiegu zjawiska. Grunt otaczający to zagłębienie był słabiej przepuszczalny, tak że woda już w dosyć wczesnym stadium zaczęła tworzyć tu jezioro, które otaczało topniejącą bryłę lodu. W pewnym momencie, gdy bryła ta znacznie zmalała, uniosła się i zaczęła pływać po powierzchni jeziora jako „góra lodowa“. Zagłębienie po niej w tym przypadku również zaznaczyło się dość wyraźnie, ale jego kontur był mniej ostro zarysowany, a ograniczające je zbocza bardziej łagodne.

W sumie rzeźba powstająca po stopnieniu rozrzuconych brył lodu przypomina żywo tzw. „morenę denną pagórkowatą“, występującą często w niedużej odległości za strefą właściwych moren czołowych, obserwowaną na Spitsbergenie oraz w Polsce Północnej (por. fig. 13 i 14).

Na tle obserwacji przytoczonych wyżej jestem zdania, że bogaty w zagłębienia bezodpływowe i „oczka“ typ rzeźby powstawał w rzeczywistości w sposób analogiczny, tzn. nie drogą zapadliskowych zagłębień „po wytopionym lodzie“, ale poprzez zsuwanie się z brył lodu, które leżały na miejscu tych zagłębień, pokrywy morenowej „zsypanych“ w przypadku materiału gruboziarnistego, czy „spływającej“ na ich zewnętrzne otoczenie przy materiale gliniastym. Skłonny jestem, może trochę ryzykownie, przychylić się do poglądu, że powstawały one już w tej części lodowca, gdzie lód jest ubogi w wmarznięty weń materiał morenowy i właśnie tego rodzaju „czystsze“ bryły przyczyniały się najbardziej do powstawania zagłębień „oczek“. Nie wyklucza to możliwości powstawania oczek i na innej drodze. W danym przypadku miałem na myśli formy występujące wśród moren typu pagórkowatego.

Na powierzchni lodowca w zachodniej jego części, około 25-30 cm od brzegu basenu, wykonano w lodzie pionowy otwór sięgający do dna

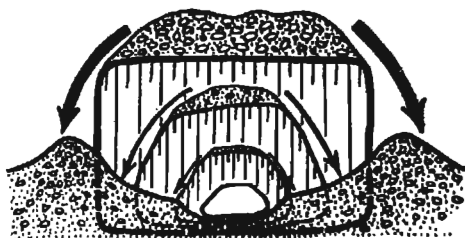


Fig. 19

Eksperyment III (1956). Proces tworzenia się zagłębień bezodpływowych podwójnie wklęsłych. Strzałki — kierunek staczania się materiału morenowego z lodu

Experiment III (1956). Formation of biconcave depressions without outlet. Arrows indicate direction along which moraine material is rolled down the glacier

zbiornika, który miał naśladować studnię lodowcową. Do studni tej wkrótce zaczął spływać z powierzchni lodu materiał morenowy, który ją szybko zappełnił. Aby zapewnić dalsze jej działanie, zbliżone do realnej sytuacji, do studni tej za pomocą węża gumowego skierowano strumyk wody o przepływie ok. 1 l/min. Był on stale utrzymywany przez kilka godzin dziennie, aż do siódmego dnia doświadczenia, kiedy do studni zaczęło się zbliżać czoło topniejącego lodu.

Przez dosyć długi czas woda wpuszczona do studni nie wypływała na zewnątrz. Dopiero po upływie około godziny drobne strumyki wody

pojawily się we wschodniej części czoła lodu, w odległości około 1,80 m na wschód od studni. W tym też miejscu do szóstego dnia eksperymentu cały czas istniał główny odpływ wód spod lodowca.

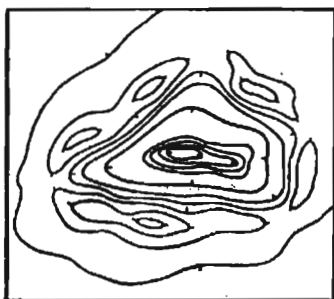


Fig. 20

Eksperyment III (1956). Mapa przykładowa podwójnie wklęsłego zagłębienia bezodpływowego. Poziornice co 1 cm

Experiment III (1956). Sketch map illustrating the bi-concavity of an undrained depression. Contour interval 1 cm

Początkowo była to niewielka szczelinka, którą spod lodu sączyła się mała struga. Później utworzyła się tu cała brama lodowcowa, stanowiąca wylot jaskini lodowej szerokości ok. 5 cm i wysokości do 2 cm, którą wypływał spory potok. Ponieważ brama ta znajdowała się u podnóża stromej i wysokiej ściany lodowej, spadający i ześlizgujący się z niej materiał morenowy zasypywał ją wielokrotnie. Woda wydostająca się pod ciśnieniem przemywała moreny, pozostawiając tylko materiał najgrubszy i znajdowała sobie ponownie drogi odpływu. Mimo nieustannej walki wody z sypiącą się moreną, wysokość

rygla morenowego podnosiła się nieustannie, była jednak stale znacznie niższa niż sąsiednich wałów morenowych.

W piątym dniu woda przelewała się przez rygiew na wysokości ok. 17,5 cm ponad dno basenu (nadbudowa morenowa ok. 7-8 cm), podczas gdy moreny po obu jej stronach sięgały do 25 cm (15 cm nadbudowy morenowej). Mimo ciągłego przemywania rygiew tak się uszczelnił, że woda wydostawała się spod lodu poprzez źródło, które wykazywało istnienie dosyć znacznego ciśnienia wód płynących pod lodem. Pozwalało to spodziewać się, że pod lodem będą istniały zjawiska eworsji. Istotnie, po stopieniu się lodu, za rygiewem morenowym ukazało się dość znaczne zagłębienie bezodpływowe ze śladami wymytych w nim przegłębień. Miały

one formę wydłużonych rynien znajdujących się na drodze, po której płynęły te wody tunelami pod większymi, nie spękanyymi bryłami lodu.

W opisanym układzie stosunków wody ze studni płynęły na wschód dwiema drogami, spotykając się ponownie w przegłębieniu przed rygłem morenowym koło wypływu. Najlepiej wyrażona rynna powstała około 1 m na wschód od studni (por. fig. 15).

Układ dwóch wschodnich ramion odpływu przez długi czas był jedyną drogą odwodnienia pod lodem i nie wykazywał tendencji do dalszych zmian. Stosunki zmieniły się dopiero wtedy, gdy dopływ wody do studni został zwiększony z 1 l/min. do 1,5 l/min., a przez pewien czas nawet do 2 l/min. Główny poprzednio istniejący wypływ wzmógł swoją działalność; woda biła tu intensywniej niż poprzednio, ale istniejące pod lodem kanały nie były w stanie przepuścić całej wody. Woda zalała studnię i poziom jej zaczął się stopniowo podnosić. Mniej więcej po kwadransie w środkowej części czoła lodu pojawił się drugi, wprawdzie nieco słabszy wypływ, a jednocześnie poziom wody w studni rozpoczął się stopniowo obniżać. Nowy wypływ powoli torował sobie drogę, sypiąc na swym przedpolu nowy własny sandr, który dalej łączył się z rozleglejszym sandrem, tworzącym się przed głównym wypływem. Ten drugi wypływ istniał aż do piątego dnia eksperymentu i działał przy wypływie wody powyżej 1,5 l/min., a zamierał przy mniejszym.

Oprócz wody wprowadzonej do wspomnianej wyżej studni lodowej, nieco później drugi strumień wodny skierowano bezpośrednio pod lód w pn.-wschodnim narożu basenu. Woda ta, jak sprawdzono metodą barwienia przed zamknięciem się pierwszego dopływu, częściowo przedostawała się do głównego odpływu, większa jednak jej struga zdołała utworować sobie własną drogę i utworzyć trzeci odpływ tuż przy wschodniej ścianie basenu. Na jej drodze utworzyły się, jak później o tym można się było przekonać, dwie wydłużone rynny przegłębień wskazujące, że i tutaj zaistniały warunki powodujące eworsję.

Wspomniano wyżej, że do studni lodowej przy zachodniej krawędzi basenu sływał dosyć obficie materiał morenowy z powierzchni. Po stopieniu się lodu w miejscu tym ukazał się wysoki czworogranny pagórek, którego szczyt miał wysokości 35 cm ponad dno basenu, a więc był najwyższą wyniosłością spośród wszystkich form akumulacji lodowej powstałych w czasie eksperymentu. Składał się on głównie z dobrze przemytego grubego żwiru. „Graniastość“ zarysu tego pagórka wynikała z tego, że znajdował się on na skrzyżowaniu szerokich szczelin między czterema masywnymi blokami lodu. Szczeliny te zostały przez wodę poszerzone, a następnie zapełnione żwirem. Można było również zaobserwować, że w kierunku dwóch najbardziej czynnych strumieni

(wschodniego i południowego) od wzgórza na miejscu studni odchodziły wydłużone wały usypane z dobrze przemytego żwiru. Na przedłużeniu jednego z nich widoczny był ślad podlodowej doliny tunelowej, w której w odległości około 0,5 m od studni stwierdzono przegłębienie eworsyjne. Można więc było stąd wywnioskować, że wały żwirowe i doliny rynnowe są ze sobą genetycznie powiązane działalnością potoku podlodowego.

W miarę topnienia czoła lodu ujawniały się opisane formy podlodowe. W dalszym biegu wypadków często ulegały one jednak zatarciu przez przysypujące je z wierzchu moreny zsypane się z powierzchni istniejącego jeszcze lodu. Rzeźba podlodowa w obrazie ostatecznym zachowała się tylko we fragmentach. Prawie na całej powierzchni podlodowej skomplikowała się ona znacznie wskutek połączenia z formami o innej genezie. I tak na przykład na części wału, odchodzącej na wschód od wzgórza po studni lodowej i na odgałęziającej się od niej ramię, nałożyła się młodsza od nich oba morena zsunięta z jednej z sąsiednich brył lodu, tworząc na nich pozornie niezrozumiałe nabrzmienie.

Niektóre doliny odpływu podlodowego, po stopieniu się lodu i wydostaniu się na powierzchnię, funkcjonowały nadal jako doliny otwarte, którymi płynęły wody sprzed lodowca. Takie przeobrażenie przeszło przede wszystkim południowe odgałęzienie wschodniej rzeki podlodowej, prowadzące wody z lodowca w 8-ym i 9-ym dniu (już po ustaniu działania studni), odprowadzając wody topnienia z istniejącego jeszcze wówczas zwartego płata lodu w środkowej części basenu. Nadało to sporemu odcinkowi tej doliny charakter doliny erozyjnej, który uzyskała ona na znacznym odcinku jeszcze przed rozpoczęciem drugiej części doświadczeń z formowaniem się sieci odpływu powierzchniowego.

Małe przedpole lodowca, zmniejszone jeszcze przez umieszczenie na nim ostańców z „poprzedniego zlodowacenia“, bardzo ograniczyło możliwości dobrego rozwinięcia się sandru. Poczynione na nim obserwacje nie wniosły też nic nowego w stosunku do eksperymentu z roku 1950, kiedy to formy miały o wiele lepsze warunki do swobodnego ukształtowania się. Z tych samych przyczyn słabo były reprezentowane w czasie tego doświadczenia zastoiska na przedpolu lodowca. W pierwszych dniach eksperymentu istniało przed czołem i na wschód od wzgórza przy południowej krawędzi basenu niewielkie płytkie zastoisko, zasilane przez pewien niedługi okres czasu wodami z zachodniego wypływu spod lodowca. Po zakończeniu doświadczeń nad procesami glacialnymi pozostała po nim płytka płaska misa, która jeszcze później była zalana przez jedno z odgałęzień głównej rzeki w początkowej fazie jej powstania i przez krótki czas istniało tu niewielkie jezioro (R na fig. 21).

Ciekawszym zaobserwowanym faktem, nieznanym z poprzednich doświadczeń, było stwierdzenie, że w misach bezodpływowych po sto-



pieniu się większych brył lodu powstało szereg niewielkich zastoisk czy też jezior „śródmorenowych”, w których w końcowych fazach ich istnienia osadziła się cienka warstwa ilasta wyścielająca dno tych obniżen. Śródmorenowe zbiorniki wodne nie były jednak jeszcze właściwymi jeziorami „późniejszych pojezierzy”, gdyż istniały one kosztem wód topnienia lodu. Gdy tych wód zabrakło, wszystkie omawiane zbiorniki, które cały czas były płytkie i małe, wyschły. Misy ich odżyły jako jeziora dopiero w następnej fazie doświadczenia, gdy zaczęła się w nich zbierać woda opadowa lub doprowadzona z zewnątrz przez rzeki.

Wzgórze z bryłą lodu wewnątrz, „zbudowane” na przedpolu lodowca przy południowej krawędzi basenu, o nadanym mu sztucznie kopulastym kształcie, w ciągu pierwszych trzech dni „osiadło” (z 44 do 31 cm) i rozplaszczyło się, nie zdradzając początkowo żadnych większych zaburzeń. Dopiero gdy w 8-mym dniu jego podnoże zostało podmyte przez potoki sandrowe, z jego wschodniego zbocza ruszył dosyć znaczny zsuw, z wyraźnie zaznaczającym się cyrkiem oberwania w górnej części i wypukłym jezorem w dolnej. W następnym dniu zsuw ten ruszył powtórnie, uzyskując w sumie długość 40 cm i szerokość 15 cm. Do tego czasu szczytowa partia wzgórza jeszcze trochę osiadła i przyplaszczyła się.

### „Wodna” część eksperymentu

#### *Formowanie się odpływu powierzchniowego*

Po pełnym stopieniu się lodu pozostała garbata, pełna zagłębień bezodpływowych powierzchnia, bardzo żywo przypominająca świeże krajobrazy polodowcowe. Pozostawiono ją w takim stanie przez dalszych dziesięć dni, poddając co jakiś czas działaniu „deszczu” w postaci rozpylonego strumienia wody z rurki gumowej skierowanej ku górze, tak aby prąd wody nie uderzał bezpośrednio na teren, lecz aby spadały na niego możliwie drobne krople.

Formy rzeźby w ciągu tego czasu stopniowo zaczęły tracić ostro zarysowane kształty i uzyskiwały kontury bardziej zaokrąglone i „zgeneralizowane”, zbliżone do młodej rzeźby stref morenowych na Pojezierzu Mazurskim. W zagłębieniach bezodpływowych okresowo tworzyły się niewielkie jeziora, nie komunikujące się ze sobą.

Przy takim stanie powierzchni w basenie przystąpiono do drugiej części eksperymentu, która miała unaocznić następny etap modyfikacji rzeźby polodowcowej — formowanie się sieci odpływu powierzchniowego.

Tę część doświadczenia rozpoczęto od długotrwałego „deszczu”. Warunki techniczne nie pozwalały jednak na skrapianie jednoczesne całej

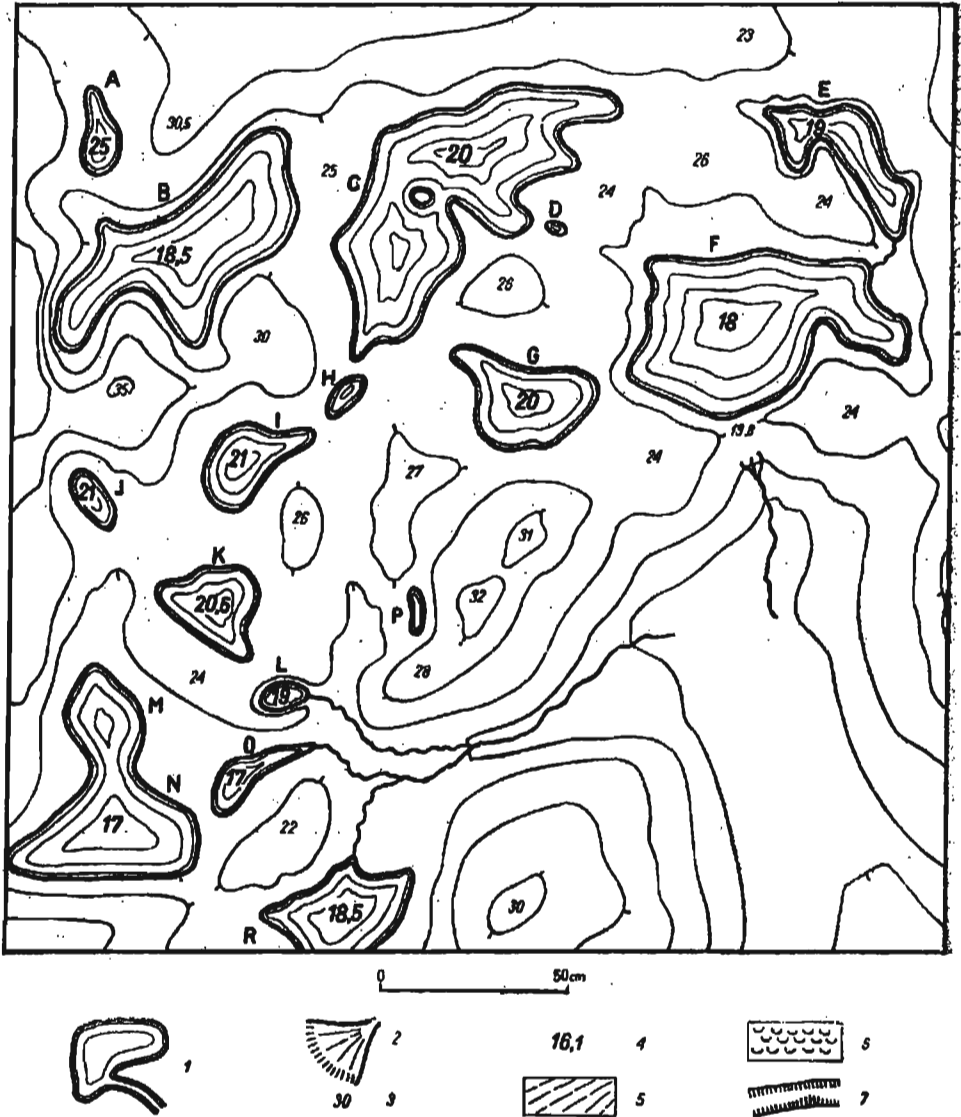


Fig. 21

**Eksperyment III (1956). „Pojezierze przelewowe“**

1 jeziora, 2 podwodne stożki napływowe (delty), 3 rzędne terenu nad poziom dna basenu, 4 rzędne zwierciadła wody w jeziorach, 5 stożki napływowe, 6 zsuwy, 7 krawędzie erozyjne. Poziomice co 5 cm

**Experiment III (1956). “Overflood” lake district**

1 lakes, 2 subaqueous alluvial fans (deltas), 3 heights of area above the level of the reservoir bottom, 4 heights of water level in lakes, 5 alluvial fans, 6 slides, 7 erosional margins. Contour interval 5 cm.

przestrzeni basenu, a jedynie plamami o powierzchniach około 0,5 m<sup>2</sup> przesuwanymi z miejsca na miejsce. Na powierzchniach piaszczystych i gliniastych pojawiły się miejscami drobne nacięcia erozyjne po spływających po stokach wzgórz strużkach wody. Niewielkie ilości materiału drobnoziarnistego spłynęły z wodą do zagłębień. Do utworzenia się sieci większych strumieni i potoków jednak nie dochodziło. Powierzchnie pokryte żwirem trwały prawie bez zmian. Podniósł się natomiast wydatnie poziom wody w jeziorach, których misy miały w swoim podłożu warstwę ilastą po dawnych zastoiskach śródmorenowych. Doszło do wypełnienia prawie wszystkich zagłębień bezodpływowych, a nawet z niektórych jezior woda zaczęła się przelewać na zewnątrz, tworząc małe potoczki wpadające do sąsiednich, niżej położonych jezior lub też wsiąkające po drodze w podłoże (fig. 21).

#### ROZWÓJ I PRZEMIANY POJEZIERZY

Ponieważ przy zastosowaniu metody „deszczowej“ procesy formowania się odpływów z jezior rozwijały się zbyt powoli, aby można było tą drogą uzyskać pożądane efekty w znajdującej się do dyspozycji ilości czasu, zdecydowano się na zmianę dalszego sposobu postępowania.

Przy stosowaniu „deszczu“ na powierzchnię spadało nie więcej jak 0,2 do 0,3 l/min. wody. Widoczne natomiast na powierzchni zmiany, jak ustaliły próby, można było uzyskać doprowadzając nie mniej jak 1 litr/min. Ponieważ środki techniczne nie pozwalały na stworzenie tak obfitego deszczu, przy jednoczesnym zachowaniu warunku dobrego rozpylania wody, trzeba było wprowadzić ją na „teren“ w postaci większego strumienia, przyjmując, że jest to rzeka płynąca z górnej części dorzecza leżącego „na północ“, poza granicami zbiornika doświadczalnego. W pn.-zachodnim narożu zbiornika został umieszczony wąż gumowy doprowadzający około 1,5 l/min. wody. Wykonano to w taki sposób, aby zabezpieczyć je od działania rozmywającego strumienia wody wypływającej z węża pod ciśnieniem, a pozwolić jej spływać drogą przelewu. Teraz sytuacja zaczęła się rozwijać szybciej. W krótkim czasie doszło do przelania się wody z pierwszych dwóch jezior (A i B na fig. 21) znajdujących się na drodze wody do trzeciego dużego jeziora C, leżącego mniej więcej w środku północnej części basenu. Tu jednak sytuacja skomplikowała się, gdyż z tego jeziora w różnych kierunkach prowadziły cztery możliwe drogi odpływu, poprzez obniżenia leżące między wzgórzami morenowymi, bardzo nieznacznie różniące się od siebie wysokościami.

Pierwszy przelew pojawił się w kierunku małego jeziora H, które zostało zalane wodą i włączone do jeziora C jako niewielka zatoczka w je-

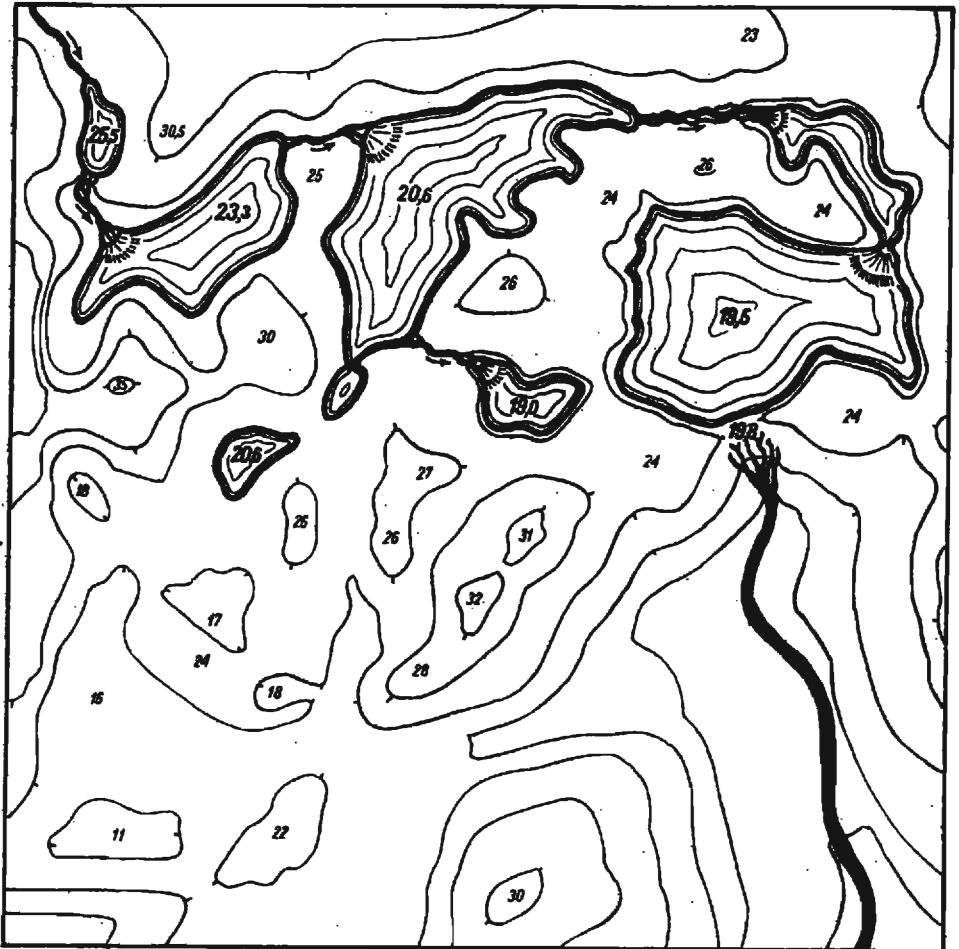


Fig. 22

**Eksperyment III (1956). „Pojezierze zamknięte” („deszczowe”). Jeziora powstałe po deszczach równomiernie rozprowadzanych po całej powierzchni basenu doświadczalnego. Poziomice co 5 cm**

**Experiment III (1956). “Closed” lake district (caused by “rains”). Lakes resulting from rains uniformly precipitated over the whole area of the experimental reservoir. Contour interval 5 cm.**

go południowej części. Pojawiła się również woda w jezioru I, do którego przedostała się ona drogą przesiąkania przez przepuszczalny grunt. Dalej jednak postęp wody na południe na razie zatrzymał się.

Drugi, zresztą bardzo mały przelew, pojawił się na obniżeniu prowadzącym do zagłębienia bezodpływowego G, które powoli zaczęło przeobrażać się w jezioro.

Prawie jednocześnie, z bardzo tylko nieznacznym opóźnieniem, rozpoczął się drugi odpływ w kierunku wschodnim w pobliżu północnej granicy basenu i skierował się poprzez misę bezodpływową E do dużego zagłębienia F. Przelew między tymi zagłębieniami został szybko poszerzony tak, że utworzyły one wkrótce jedno duże jezioro EF.

Między przepływami C-E i C-G zaczęła rozgrywać się walka, o wyniku której zdecydował rodzaj materiału leżącego na drodze tych dwóch strumieni. Piaszczyste koryto C-E pogłębiło się szybciej niż zasłane żwirami C-G i dlatego pierwszą drogą skierował się główny strumień wody złościąc swoje koryto i obniżając nieco poziom jeziora C, a tym samym zmniejszając jeszcze bardziej przepływ łożyskiem C-G. Do wypełnienia wodą zagłębienia G i do przelewu z niego do jeziora F nie doszło, choć cały ten kierunek miał predysponowaną drogę wzdłuż starego odpływu pod lodem (fig. 22).

Czwarty możliwy konkurent do stworzenia drogi odpływu poprzez małe zagłębienia eworsyjne na linii bardziej północnego przepływu podlodowcowego, w tym etapie rozwoju wypadków w ogóle nie doszedł do głosu.

W miarę podnoszenia się poziomu wody w dużym jeziorze EF, które od południa zamykał wał moren czołowych z pierwszych dni eksperymentu, na miejscu dawnego głównego wypływu spod lodu na zewnętrznej stronie moreny zaczęły się ukazywać coraz liczniejsze wysięki i źródelka. Utworzyły one dość spory strumień, płynący przez powierzchnię sandrową do miejsca odpływu wód z basenu.

W jeziorach B, C, E, F i G w miejscach, gdzie wpadały do nich strumienie, zaczęły się tworzyć podwodne stożki napływowe typu zatopionych delt z pięknie wyrażonymi stromo pochyłymi czołami zewnętrznymi, dosyć szybko narastające i posuwające się w kierunku toni jezior. Poza tymi stożkami sedimentacja na dnie jezior była bardzo słaba i ich dna wyściełała jedynie cienka warstewka osadu mulastego lub drobnopiaszczystego.

Z powyższego opisu widać, że na skutek wprowadzenia wód bieżących w pn.-zachodnim narożu basenu ożywiła się północna grupa jezior, tworząc tu cały system „pojezierza“ złożonego z szeregu jezior powiązanych ze sobą przelewami lub podziemnymi przesiekami wód. Natomiast południowa grupa jezior (J, K, L, M, N, O, P i R) zupełnie zamarała i prezentowała się w tym czasie jako szereg suchych zagłębień bezodpływo-



Fig. 23

Ekspertym III (1956). „Pojezierze przelewowo-przepływowe“. Oznaczenia jak na fig. 21

Experiment III (1956). “Overflood-water-flow” lake district. Scale and legend as in fig. 21

wych. Suche pozostało również zagłębienie D, leżące w środku „północnego pojezierza“.

Poziom wody w jeziorach „północnego pojezierza“ ustalił się jako szereg coraz niżej leżących stopni wodnych. Zwierciadło wody w kolejnych jeziorach leżało na poziomach 25,5; 23,3; 20,6 i 19,5 cm ponad dnem basenu. Jedynie w jeziorze G, odczuwającym ciągły niedobór wody, poziom był niższy i wynosił 19 cm ponad dno basenu.

W miarę trwania tej sytuacji wody przepływające między jeziorami formowały coraz głębsze łożyska i powodowały stopniowe obniżanie się poziomu wody w jeziorach. Aby do rozwoju sytuacji wprowadzić nowy element, pierwotny dopływ wody wynoszący 1,5 l/min., został zwiększony do 3 l/min. Stało się to poważnym nowym bodźcem do wznowienia walki konkurencyjnej między możliwymi drogami odpływu. Mimo że poziom wody w jeziorze C podniósł się tylko o kilka milimetrów (do 21,2 cm), wystarczyło to jednak, aby stworzyć szanse przelewu drogami, które poprzednio nie były wykorzystane.

Jezioro G szybko zaczęło się wypełniać, osiągając poziom wody bliższy 20 cm. Woda z niego znalazła sobie drogę do jeziora F. Czynny zaczął być również przelew poprzez zagłębienie D. Poziom wód w połączonych ze sobą jeziorach E i F podniósł się, spadek zaś wzdłuż łożyska C-F zmalał. Źródła przy starym wypływie na zewnętrznej stronie moreny wzmożły się. Strumień płynący sandrem stał się obfity.

Oprócz trzech wymienionych odpływów z jeziora C w kierunku wschodnim pojawił się jeszcze czwarty. Prowadził on wody wprost na południe. Początkowo mała struga, która przedarła się tą drogą, w dalszym rozwoju wypadków okazała się groźnym współzawodnikiem dla innych odpływów, gdyż miała ona już częściowo przygotowane łożysko przez dolinę dawnego odpływu wód topnienia sprzed czoła lodu, utworzoną między 5 a 10 dniem. Nie było na niej również takiej przeszkody, jaką stwarzała zapora morenowa na południe od jeziora F z kamienistym rygłem o wysokości 19,8 cm. Wprawdzie rygiel ten przepuszczał drogą przesiąkania pewną ilość wody, jednak ograniczał możliwości postępu erozji w głębszej przez utrzymywanie na dosyć wysokim poziomie zwierciadła wody w jeziorze F, decydującym o położeniu lokalnej bazy erozyjnej. Na nowej drodze żadnych przeszkód tego rodzaju nie było. Baza erozyjna strugi leżała tu na poziomie o całe 15 cm niższym. Toteż dalszy rozwój wypadków potoczył się bardzo szybko i w ciągu niecałej godziny poważnie przeobraził układ stosunków wodnych, zmieniając mały początkowo strumyk południowy w główną rzekę odpływu wód z jeziora C i obniżając jego poziom do 20,4 cm. Wszystkie przepływy wschodnie osłabły, choć funkcjonowały nadal. Większą rolę wśród nich odgrywał teraz przepływ C-G-E, prowadzący przez jezioro eworsyjne G, z którego już w międzyczasie uformowało się łożysko przepływu do jeziora F.

Poziom tego ostatniego jeziora, które obecnie otrzymywało mniej wody, zaczął się dosyć wydatnie obniżać i oddzieliło się ono ponownie od jeziora E. Źródła przesiekowe, odprowadzające wody z tego jeziora na zewnątrz moren, stały się mniej intensywne.

W przeciwieństwie do osłabienia dopływu wód do wschodniej grupy jezior, wzmożł się dopływ wód do jeziora I. Rzeka południowa niosła



Fig. 24.

Eksperyment III (1956). „Pojezierze przepływowe“. Oznaczenia jak na fig. 21

Experiment III (1956). "Water-flow" lake district. Scale and legend as in fig. 21

coraz więcej wody, intensywniej złobiła łożysko nadgryzając poprzez erozję boczną drobne przeszkody stojące na drodze do jeziora I, do którego woda mogła się teraz przedostawać normalnym dopływem powierzchniowym. W środkowym swoim biegu jedno z ramion tej rzeki znalazło drogę do zagłębienia O, a poprzez nie do kotlin N i M, tworząc tam dosyć duże bliźniacze jezioro MN. Na bardzo krótką chwilę odżyło nawet jezioro R, mieszczące się w płytkim obniżeniu pozostałym po niecałkowicie zaakumulowanym zastoisku na przedpolu lodowca.



W dolnym biegu rzeka południowa zaczęła szybko sypać rozległy stożek napływowy z materiału obficie pobieranego ze środkowego biegu. Na stożku tym rozdzieliła się ona na kilka ramion odgrywających na zmianę rolę głównego łożyska.

Rozwijająca się w pośpiesznym tempie sytuacja groziła szybkim spłynięciem jeziora C i przerwaniem dopływów do wschodniej grupy jezior. Pojawiła się jednak przeszkoda, która przedłużyła okres istnienia tego układu stosunków, który ilustruje jedna z załączonych mapek (fig. 23). Przeszkodą tą okazało się nagromadzenie żwiru (jedno z ramion żwirowych odchodzących od wzgórza w miejscu dawnej studni lodowcowej), które zwolniło tempo erozji wglębnej dążącej do przecięcia wzniesienia zamykającego od południa misę jeziorną jeziora C. Poniżej tej przeszkody, w środkowym i dolnym biegu rzeka erodowała w głąb bez większych trudności, doprowadzając do utworzenia się tarasu V (ob. fig. 26) i wcinając się w poprzednio usypany przez siebie stożek. Pogłębianie się łożyska w środkowym biegu rzeki po pewnym czasie spowodowało przerwanie dopływu wody do jeziora I oraz MN. Zmalały one i stopniowo zaczęły zanikać. Mimo trudności przy wypływie z jeziora, przeszkoda stopniowo zaczęła być pokonywana i poziom jeziora C obniżył się do 19,5 cm ponad dno basenu (ob. fig. 24).

Wszystkie odpływy na wschód od tego jeziora zostały przerwane i pn.-zachodnia grupa jezior oddzieliła się definitywnie od pn.-wschodniej.

Aby jednak nie przerwać biegu wypadków w opuszczonej przez strumień wschodniej części basenu, drugim węzłem gumowym doprowadzono wodę z „górnego dorzecza“ (z wodociągu) od północnej krawędzi zbiornika w kierunku jeziora E (ok. 1,5 l/min.). Z kolei i tu zaczęła się formować sytuacja „przepływowa“ i zarysował się układ przyszłej rzeki. Doszło do tego jednak drogą paru niespodziewanych zmian. Pierwsza tego rodzaju zmiana wystąpiła w przelewie między jeziorem E i F. Początkowo odpływ szedł z bardziej wschodniego ramienia jeziora, które jako dawna rynna eworsyjna było również zamknięte od południa rygłem żwirowym, niewidocznym na powierzchni, ale utrudniającym wcinanie się łożyska w głąb. Jeszcze w poprzedniej fazie doświadczenia na południe od bardziej wschodniego ramienia jeziora E pojawiły się drobne wysięki. Spowodowały one ruch piasków, a w miarę rozwoju sytuacji doprowadziły do wytworzenia się dolinki, którą wody jeziora E uzyskiwały nową drogę odpływu porzucając całkowicie stare, trudne do pogłębienia łożysko.

Podobnie ułożyła się sytuacja z odpływem z jeziora F. Przesięki przez rygiel starego wypływu lodowcowego, który działał nienagannie, były bardzo małe. Nieznaczny początkowo wysięk na stoku moren na wschód od tego wypływu, zamknięty znacznie wyższym niż tamten wałem, dzięki swemu piaszczystemu składowi okazał się łatwiejszy do pokonania, tak



Fig. 25

Eksperyment III (1956). Mapa hipsometryczna powierzchni po zakończeniu „wodnej” części doświadczenia. Poziomice co 1 cm

Experiment III (1956). Hipsometric sketch map of the surface after the termination of the “water” part of the experiment. Contour interval 1 cm.

że tędy też otworzył się w pewnym momencie odpływ powierzchniowy z jeziora F. Połączone to było z gwałtownym chłonięciem wód z jeziora F na południe i usypaniem następnego dużego stożka napływowego na przedpolu moren. Ponieważ proces ten odbył się w dwóch fazach, powstały tu dwa stożki (ob. fig. 26). Starszy ( $V^a$ ) tworzył poziom nieco wyższy niż młodszy ( $V^b$ ) i długo zachował swój wypukły kształt. Poprzednie łóżysko potoku z wysięków koło starego wypływu lodowcowego zostało zasypa-

ne i strumień ten skierował się nową drogą idącą po peryferii nowoutworzonych stożków napływowych.

W tym samym czasie na rzece głównej, której dolny bieg został na pewnym odcinku zepchnięty na południe przez te same intensywnie tworzące się stożki, w środkowym i dolnym biegu rozwinęło się szersze dno doliny. W górnym biegu nastąpiła likwidacja jezior A i B, a na ich miejscu powstała szeroka dolina. Część jeziora B włączona została do jeziora C, które stało się jedynym dużym jeziorem grupy pn.-zachodniej.

Do szybkiego rozwoju tych zmian przyczyniła się dosyć znaczna różnica wysokości pierwotnego poziomu zwierciadła wody w jeziorach i małe odległości między nimi. Na przykład przepływ z jeziora B do C przy długości ok. 25 cm miał różnicę wysokości przeszło 2 cm, to znaczy spadek rzeki wynosił 8‰. Podobnie między jeziorami A i B był on rzędu 10‰.

Główną rolę w tym stadium rozwoju sytuacji hydrograficznej zdecydowanie odgrywały jeziora przepływowe z dobrze wypracowanym odpływem. Zbiorniki bezodpływowe miały natomiast charakter szczątkowy i znajdowały się na obszarach leżących na uboczu od stref, w których rozwijają się istotne dla dalszych losów terenu procesy rzeźbotwórcze.

#### ROZWÓJ DOLIN RZECZNYCH I TARASÓW

Całość zmian od chwili wprowadzenia strumienia wodnego do tego stanu, przy którym zatrzymaliśmy się w opisie i który pokazany jest na szkicu (fig. 24), odbyła się w naszym doświadczeniu w ciągu kilku godzin. Natomiast na pełne przecięcie progów, za którymi utrzymywały się jeziora przepływowe, rzeki zużyły więcej niż trzy dni, w ciągu których oba strumienie wodne utrzymywane przy poprzednich przepływach płynęły bez przerwy.

Wcześniej spłynęły ostatecznie jeziora na rzece we wschodniej części terenu. Przy wypływie z jeziora C rzeka przez długi czas musiała walczyć z nagromadzeniami żwirów, które okazały się dla niej zbyt trudne do usunięcia. Ponieważ wśród żwirów znajdowało się parę głazików o średnicy ponad 2 cm, które stwarzały trudności wykraczające poza skalę przyjętą dla eksperymentu, zostały one usunięte z tego miejsca. Była to jedyna istotna ingerencja człowieka w procesy rozwijające się samorzutnie w basenie doświadczalnym.

Równoległe z przepływaniem progów wchodzący od góry prąd wodny sypał i rozbudowywał podwodne stożki napływowe, które swoimi stromymi czołami zdołały dojść prawie do samych progów wypełniając piaskiem misy jeziorne i tą drogą również przyczyniały się do likwidacji jezior. Po przecięciu przeszkód przy wylotach wody z jezior, rzeki szybko

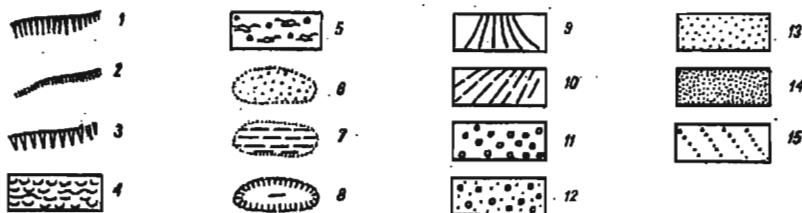


Fig. 26

Eksperyment III (1956). Mapa morfologiczna po zakończeniu „wodnej” części doświadczenia

1 wysokie krawędzie erozyjne, 2 krawędzie tarasów, 3 krawędzie sandru od strony lodu, po jego cofnięciu się, 4 zsuwy przykrawędziowe, 5 spływy zboczowe, 6 płaszczyste osady w misach jeziornych, 7 osady ilaste jezior i zastoiak, 8 prze-

wcięły się w osady usypanych przez siebie stożków i ich górne powierzchnie utworzyły dobrze wyrażone płaszczyzny pojeziernego tarasu akumulacyjnego IV<sup>b</sup>. Wysokością swoją i położeniem ponad wytworzonym później niższym tarasem zajmował on podobne położenie, jak taras IV<sup>a</sup> w dolnym i środkowym biegu obu rzek, jednak czas i sposób jego powstawania w górnym biegu był w rzeczywistości inny.

Tu i ówdzie ponad tarasem IV zachowały się jeszcze wyższe spłaszczenia oznaczone na mapce geomorfologicznej (fig. 26) literą J, które powstały w związku z krótkotrwałymi wysokimi stanami jezior w fazie poprzedzającej utworzenie się odpływu z jeziora C (przed sytuacją pokazaną na fig. 23). Tarasy te pozornie dają się paralelizować z tarasem V w środkowym biegu, a w dolnym — z wiążącymi się z nimi powierzchniami stożków napływowych obu rzek (fig. 27). W rzeczywistości jednak, jak wynikało z bezpośredniej obserwacji, były one od nich znacznie starsze, gdyż pochodziły z okresu, w którym odpływ na południe jeszcze nie istniał.

Oba przykłady wskazują wyraźnie, jak trzeba być ostrożnym przy paralelizacji tarasów, szczególnie wyższych, gdy się opierać tylko na kryterium ich wysokości względnej.

Po opisanych wyżej zdarzeniach obie rzeki wypracowały sobie dobrze rozwinięty na całej długości taras III, który w pełni był już prawdziwym tarasem rzeczny. W dolnym biegu miał on charakter akumulacyjny, w środkowym — noszącym cechy przełomowe przez pasma morenowe — erozyjny, a w górnym — na przemian erozyjny i akumulacyjny,

głębienia na dnie mis bezodpływowych podwójnie wklęsłych, 9 stożki napływowe w miejscach przelewu wód, 10 stożki napływowe zapełniające jeziora i na przedpolu moren, 11 materiał morenowy silnie przemyty, 12 sandr z głazami, 13 powierzchnie piaszczyste na drogach przepływu wód przelewu z jezior, 14 tarasy jeziorne, 15 sandr piaszczysty. Liczby rzymskie — numeracja tarasów. Liczby arabskie — rzędne wysokości na wyniosłościach. Obszary morenowe pozostawione bez oznaczeń na białą.

**Experiment III (1956). Morphological sketch map after termination of the "water" part of experimenting**

1 high erosional margins, 2 margins of terraces, 3 iceward margins of Sandar after ice retreat, 4 marginal slides, 5 slope flowage, 6 arenaceous deposits in lacustrine basins, 7 argillaceous deposits of lakes and marginal lakes, 8 deepening at bottom of bi-concave depressions without outlet, 9 talus cones at places of water discharge, 10 alluvial fans filling up the lakes and those in moraine fore-field, 11 well washed moraine material, 12 Sandar with boulders, 13 sandy surface on routes followed by lake discharge water. 14 lacustrine terraces, 15 sandy Sandar. Terraces numbered by Roman figures; heights on elevated ground by Arabic figures. Areas occupied by moraines left blank without marks

zależnie od tego, czy dolina rzeki przechodziła przez stare misy jeziorne, czy też przez rozdzielające je przegrody.

W piątym dniu doświadczenia trzeci taras był już w pełni uformowany i tworzył w wielu miejscach rozległe powierzchnie. Można więc było rozpocząć dalszy etap eksperymentu mający na celu zanalizowanie kształtowania się tarasów w zależności od zmian ilości przepływającej wody. Dopływ wody w zachodniej głównej rzece został kolejno zmniejszony do 1,5 l/min., a następnie 1 l i 0,5 l/min. Pierwsze przepływy były utrzymywane przez przeciąg 7 dni, a drugie przez dalsze 10 dni. Odpowiednio do tych zmian rzeka tworzyła coraz węższą dolinę wcinając się jednocześnie w głąb i pozostawiając wyżej powierzchnie starszych tarasów. W ten sposób utworzył się taras drugi (II) i poniżej niego leżący poziom nowego łóżyska rzeki „taras zalewowy“, w obrębie którego kształtowały się zmiany biegu rzeki i na korzyść którego odbywało się poszerzanie doliny przez erozję boczną podmywającą wysokie zbocza starszych powierzchni. Dobrze ujawniły się wszelkie przejawy meandrowania, szczególnie ładnie widoczne na płaskiej powierzchni po zaakumulowanym dawnym jeziorze C (fig. 26).

Na rzece wschodniej efekt zmniejszania przepływu wody w górnym biegu odbił się o wiele słabiej niż w dolnym. Taras II wytworzył się tu tylko w części dawnej misy jeziornej zasypanej przez piaski. Tam natomiast, gdzie rzeka musiała walczyć z podłożem żwirowym, ślady wcięcia przy zmniejszonym przepływie były minimalne i nie doprowadziły do powstania tarasu. Brak go również z tych samych przyczyn w całym środkko-

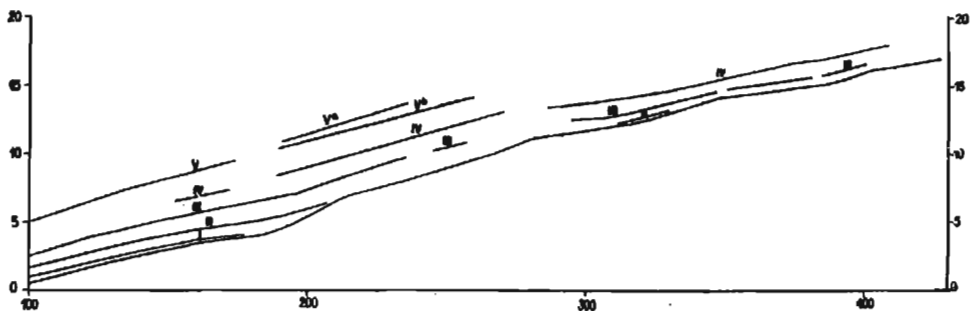


Fig. 27

Eksperyment III (1956). Profil podłużny rzeki głównej (zachodniej) z zaznaczonymi tarasami. W pionie — wysokości nad poziomem dna zbiornika w cm, w poziomie — odległość od miejsca splywu wód ze zbiornika w cm

Experiment III (1956). Longitudinal section of main stream (western) with terraces indicated. Vertically — heights in cm. above level of floor of experimental reservoir, horizontally — distance in cm. from water-flow out of the reservoir

wym biegu tej rzeki (fig. 28). Jest on natomiast dobrze wykształcony w dolnym biegu, w piaszczystych osadach stożka napływowego poniżej strefy morenowej. Warto zauważyć, że kończenie się tarasu II widoczne na profilu podłużnym tej rzeki spowodowane jest przez wstrzymanie erozji wstecznej na grubym żwirze morenowym, który na tym odcinku dominował w materiale podłoża łóżyska.

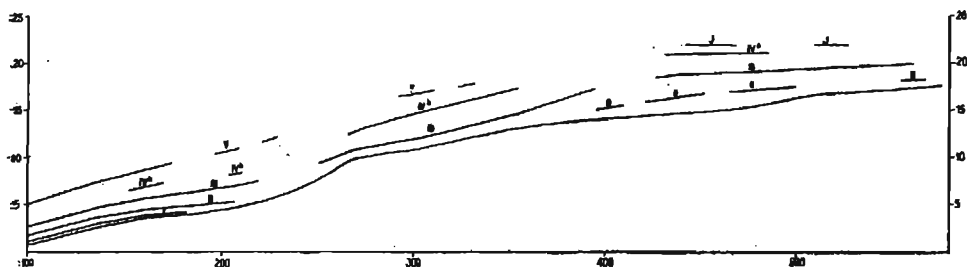


Fig. 28

Eksperyment III (1956). Profil podłużny rzeki wschodniej z zaznaczonymi tarasami. Oznaczenia jak na fig. 27. Dolny bieg rzek odbywał się w obrębie osadnika, poza granicami basenu doświadczalnego na obu profilach podłużnych rzek

Experiment III (1956). Longitudinal section of eastern stream with terraces indicated. Legend as in fig. 27. Lower course of streams situated within the sedimentation box, — outside of the experimental reservoir — on both longitudinal stream sections

Powstanie ostatnio wymienionych tarasów (II, III, IV) było spowodowane przez zmiany przepływu w rzece. Przyczyn należy więc szukać w „górnej części dorzecza“ poza obrębem basenu. Tarasy te są dobrze rozwinięte na ogół na całej długości utworzonych dolin.

W końcowej części doświadczenia próbowano jeszcze prześledzić proces tworzenia się tarasów spowodowanych zmianami bazy erozyjnej przy ujściu rzeki.

W płaskiej części osadnika leżącej poza właściwą powierzchnią eksperymentalną basenu utworzyły się piękne delty palczaste, które dosyć szybko postępowały naprzód, oddalając podstawę erozyjną dla rzek terenu doświadczalnego. Usunięcie z osadnika całej nagromadzonej tu masy piasku ponownie przybliżyło tę bazę do zbiornika. Skutek tego posunięcia był natychmiastowy. Nastąpiło szybkie wcięcie się rzeki w poziom łożyska, powstał „próg odmłodzenia“ pośpiesznie przesuwany się w górę rzeki i malejący w miarę oddalania się od ujścia rzeki. W pewnej odległości prędkość jego przemieszczania się wybitnie zmalała i zatrzymał się

on prawie na miejscu, chociaż jeszcze przez czas dłuższy zaznaczał się wyraźnie w profilu podłużnym rzeki.

Parokrotnie powtarzane usuwanie narastających delt zawsze powodowało ten sam efekt. Nie doszło jednak do wytworzenia się kilku niskich tarasów, ponieważ nowopowstające progi odmłodzenia stosunkowo szybko „dopędzały“ istniejący poprzednio, przyspieszały na pewien czas jego ruch, ale w efekcie morfologicznym „sumowały się“ z nim, nie dopuszczając do powstania nowych form.

Wytworzony w opisany wyżej sposób taras I rozwinął się tylko w dolnym biegu połączonych rzek i do końca doświadczenia „próg odmłodzenia“ nie posunął się wiele poza miejsce, w którym łączyły się ze sobą obie rzeki.

Na doprowadzeniu do powstania tarasu I, doświadczenie w roku 1956 w zasadzie ukończono. Rzeźba, która utworzyła się w basenie doświadczalnym, zdumiewająco żywo przypomina rzeźbę z końcowych stadiów ostatniego zlodowacenia i nosiła podobne cechy późniejszych zmian, jakie możemy obserwować w północnej Polsce.

#### PRÓBNA „TRANSGRESJA“

W podanym wyżej opisie rozwoju rzeki dla zachowania jasności obrazu opuszczony został jeszcze pewien epizod innego nieco charakteru. Po powstaniu głównej rzeki odpływu z jeziora C i utworzeniu się tarasu IV<sup>a</sup>, chcąc zorientować się w zmianach, które powoduje na młodej rzeźbie polodowcowej transgresja morska, analogiczna do transgresji litorynowej na południowych wybrzeżach Bałtyku, zamknięto odpływ z basenu powodując spiętrzenie się wody do poziomu 22 cm nad poziom basenu. Jednocześnie, ponieważ chodziło o odtworzenie warunków istniejących w dużym zbiorniku wód, na powstającym „morzu“ spowodowano cały czas falowanie idące od południa.

Modyfikacje, które ujawniły się przy tej szybko posuwającej się naprzód „transgresji“, były zupełnie nieznaczne. Odbiły się one jedynie na formach piaszczystych, które nieco zmieniły swój kształt, zmniejszając kąty pochylenia zboczy. Formy żwirowate zostały prawie nienaruszone. Transgresję utrzymano na tym samym poziomie przez okres około 2 godzin, przy ciągłym falowaniu. W ciągu tego czasu na piaszczystych wzgórzach przy wschodniej krawędzi zbiornika utworzyła się ładna faleza około 2-3 cm wysokości z wysuniętą przed nią kilkucentymetrową „platformą abrazyjną“. O wiele słabiej zaznaczyła się ona na wzgórzu z kotą 31, którego zbocza pokryte były żwirem. Na zboczach pierwszego głównego południowego pasma moren czołowych dość długo nie było znać żadnych większych zmian. Wyraźniejsza forma o charakterze falezy nie utworzyła



się tu do końca transgresji. Uderzenia fal były zbyt słabe, aby poruszyć grube otoczaki żwiru, z którego zbudowana była morena, natomiast zaczęły one wymywać z pomiędzy głazów piasek i gromadzić go w strefie odpływu.

Po obniżeniu poziomu wody można było stwierdzić, że w strefie moren czołowych ślad dawnego brzegu zaznaczył się jako wąska piaszczysta smuga biegnąca ich zboczami na jednym poziomie.

Ogólnie biorąc modyfikacje spowodowane zatopieniem były minimalne i nie wprowadziły żadnych istotnych zmian. Najwięcej stosunkowo „ucierpiały“ wzgórza piaszczyste, których wierzchołki znalazły się na wysokości bliskiej poziomowi „morza“. Zostały one rozmyte i spłaszczone w swoich górnych częściach, tak że ich partie szczytowe zaczęły przypominać ostańce po poziomie zrównania.

Wnioski, które nasuwa ten ubocznie przeprowadzony epizod doświadczenia wskazują, że szybko posuwająca się transgresja nie powoduje żadnych istotnych zmian w formach morenowych zatopianej rzeźby lodowcowej, a szczególnie na wzgórzach usypanych z grubego materiału żwirowo-glazowego. Wyraźniejsze są zmiany na formach zbudowanych z piasku, ale i w tym przypadku w sposób bardziej wydatny zaznaczają się one głównie w strefie silniejszego falowania. Można natomiast przypuszczać, że powoli podnoszący się poziom morza spowoduje znacznie głębsze zmiany, a nawet może doprowadzić do zatarcia pierwotnej rzeźby polodowcowej.

Wnioski te są w zasadzie zgodne z obserwacjami, które zrobiono na dnie Bałtyku oraz na jego wybrzeżach w strefie zalanej przez transgresję lityrynową.

### Ogólna ocena eksperymentu z 1956 r.

Ogólna ocena trzeciego eksperymentu wypada pozytywnie.

W eksperymencie tym najbardziej cenne jest to, że udało się uzyskać ciągłość rozwoju rzeźby odpowiadającej całej schyłkowej części glacjału (glacjalna część doświadczenia) i pierwszej części interglacjału (wodna część doświadczenia) na tej samej powierzchni. Otrzymane wyniki zachęcają do kontynuowania tego rodzaju eksperymentów z rozszerzeniem tematyki obserwacji i wypracowaniem warunków przebiegu doświadczenia, które zapewniłyby możliwie dużo analogii z podobnymi procesami w przyrodzie.

Ze szczegółowych obserwacji za najciekawsze należy prawdopodobnie uznać spostrzeżenia nad tworzeniem się różnorodnych typów zagłębień bezodpływowych i nad zależnością form rzeźby od odpływu pod lodem, a w szczególności od eworsji. Obserwacje procesu tworzenia się

moren czołowych nasuwają również szereg wniosków, ale mimo uzyskania ostatecznych analogicznych kształtów tych form, budzą one jeszcze szereg zastrzeżeń. Przede wszystkim chodzi tu o nadmiernie „stożkową“ formę spływów z lodowca, które w rzeczywistości mają bardziej „potokowy“ i „spływowy“ charakter. Nie bez wartości są także analogie, które można wysnuć z obserwacji przekształcania się „pojezierzy“ bezodpływowych w powierzchnię o rozwiniętej sieci odpływu powierzchniowego z dobrze uformowanymi dolinami rzecznyymi. Obserwacje nad ruchami materiału morenowego są interesujące, ale jeszcze przeprowadzane w niedostatecznym stopniu. Podobnie o wiele więcej uwagi wymagają procesy odbywające się na sandrze.

Oceniając wyniki eksperymentu, nie można też zapomnieć, że wszystkie obserwowane procesy zachodziły w specyficznych warunkach „klimatycznych“. Fakt ten niewątpliwie poważnie zaważył na przebiegu procesów i na ostatecznej formie „krajobrazu“. Konieczne więc jest bardziej dokładne poznanie „klimatu“, w którym odbywa się doświadczenie, i stwierdzenie lokalnych jego modyfikacji spowodowanych obecnością lodu.

#### EKSPERYMENT IV (1957 r.)

Na rok 1957 projektowano przeprowadzenie w zasadzie podobnego eksperymentu jak w roku poprzednim, ale przy innym składzie materiału morenowego (z większą ilością gliny) oraz z zastosowaniem nie brył lodu rzecznoego, ale bloków z lodu o strukturze zlepieńcowej z wmarzniętym materiałem morenowym. Doświadczenia miały być przeprowadzone w tym samym basenie, co w roku ubiegłym. Wobec jednak trudności w uzyskaniu zarówno lodu wielkobryłowego, jak i nieudania się (z powodu odwilży) próby zamrożenia bloków z tłuczni lodowego, trzeba było dostosować się do istniejącej sytuacji i „zbudować“ lodowiec z ubitego ściśle gruzu lodowego przemieszanego z gliną, piaskiem i żwirem. Tylko frontowa ściana „lodowca“ i niektóre jego części boczne mogły być zbudowane z pełnych brył lodowych.

#### ZAŁOŻENIA I WARUNKI PRZEPROWADZANIA EKSPERYMENTU

Do doświadczenia użyto tym razem 3 tony lodu oraz równe ilości gliny, piasku i żwiru. Żwir przed użyciem przesiano tak, aby jego ziarna nie przekraczały 1 cm średnicy i nie powodowały takich przeszkód dla erozji, jak w roku ubiegłym. Powierzchnię lodu uformowano w postaci dwóch płaskich kulminacji (zachodnia 87 cm i wschodnia 84 cm nad poziom basenu), między którymi znajdowało się obniżenie pochylające się ku frontowi „lodowca“. Czoło uformowano jako dobrze wyrównaną gład-

ką ścianę z około 10 cm przewieszką w górnej części. Wysokość czoła lodowca była stosunkowo nieduża i wynosiła od 45 do 50 cm. Wyściółkę pod lodem i wypełnienie szczelin między bryłami dolnej warstwy zrobiono z mieszaniny gliny i żwiru ubijając je ściśle. W podobny sposób uszczelniono również lód przy czole. Cały środek wypełniono dobrze ubitym drobnym tłucznem lodu przesypanym wielokrotnie żwirem. Od góry pokryto lód ponownie gliną przemieszaną ze żwirem i lodem. W pół-wschodnim narożu basenu 1 m<sup>2</sup> na całą wysokość wypełniono tłucznem lodowym (fig. 29).

W obniżeniu przecinającym w poprzek powierzchnię lodu uformowano dwie studnie lodowcowe sięgające aż do spągu lodu. Trzecią studnię

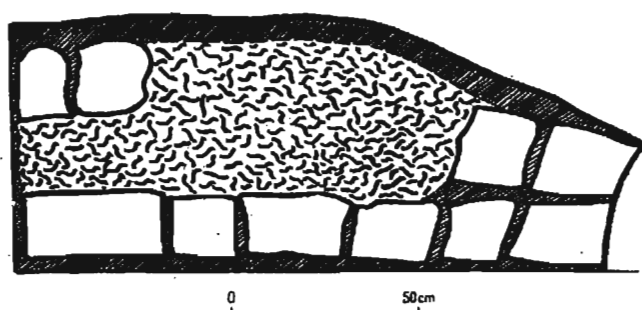


Fig. 29

Eksperyment IV (1957). Przekrój poprzeczny przez lód na początku doświadczenia. Białe — lód zwarty; kreski nieuporządkowane — tłuczeń lodowy ubity z materiałem morenowym; kreski skośne — materiał morenowy glinisty

Experiment IV (1957). Longitudinal section of ice at the beginning of the experiment. Blank areas indicate compact ice; dispersed dashes—ice rubble compressed with moraine material; oblique dashes—argillaceous moraine material

zrobiono na stoku niższej, wschodniej kulminacji w obrębie odcinka całkowicie wypełnionego tłucznem lodowym. Do żadnej z tych studni w czasie całego doświadczenia nie wlewano strumienia wody, tak jak to czyniono przy poprzednim eksperymencie.

Podobnie, jak w roku 1956, co drugi dzień sporządzano szkice topograficzne, a po zakończeniu poszczególnych części doświadczenia robiono bardziej dokładne zdjęcia terenu. Nowym elementem, oprócz innej postaci lodu, było systematyczne przeprowadzanie pomiarów temperatur i mierzenie odpływu wód topnienia. Po zakończeniu części „glacjalnej“

powtórzono również „wodną“ część eksperymentu. Przez cały czas trwania doświadczenia wykonywano liczne fotografie dokumentacyjne.

#### PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

Ponieważ ogólny przebieg eksperymentu IV był w zasadzie zbliżony do poprzedniego, można pominąć szczegółowy opis obserwacji codziennych i poprzestać na omówieniu tylko tej ich części, która uzupełnia w jaki-

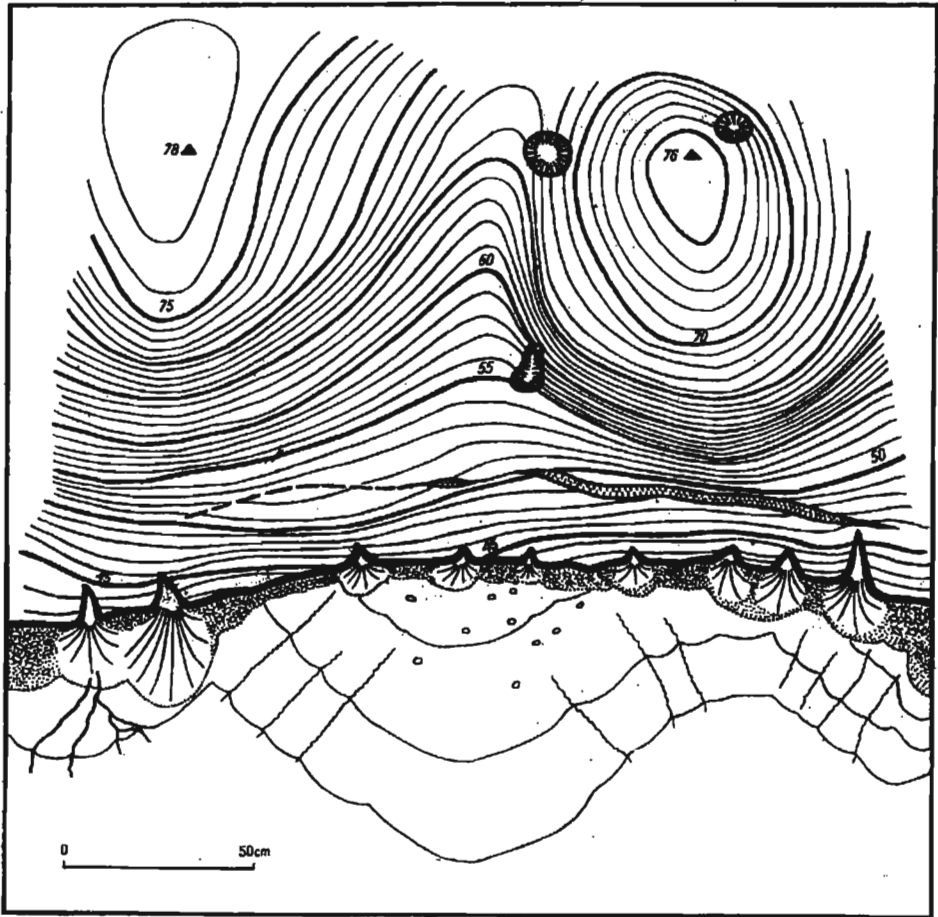


Fig. 30

Eksperyment IV (1957). Mapka układu powierzchni w trzecim dniu eksperymentu. Poziomice na lodzie co 2,5 cm, na przedpolu co 1 cm

Experiment IV (1957). Sketch map of surface configuration on the 3rd day of experiment. Contour interval on ice 2.5 cm., in the forefield 1 cm.

kolwiek sposób obraz uzyskany poprzednio lub pozwala skorygować wnioski wysnute w latach poprzednich.

Montowanie „lodowca“ do czwartego eksperymentu rozpoczęto dnia 5 marca 1957 roku o godzinie 13-tej i ukończono tegoż dnia o godz. 17-ej.

Do godziny 20-ej nie widać żadnych istotnych zmian ani na górnej powierzchni, ani przy czole lodu. Odpływ wody odbywa się licznymi drobnymi strumyczkami; uformowanych większych wypływów wody spod lodu nie ma.

Po godzinie 20-ej z krawędzi lodu spadają pojedyncze głaziki i leżą rozrzucone nieregularnie przed czołem lodu w strefie około 10 cm szerokości. Późnym wieczorem przy wschodnim skraju basenu powstał większy zsuw gliniasty, z którego materiał został rozwleczony na przestrzeni kilku decymetrów. Przy zachodnim brzegu basenu utworzyły się trzy niewielkie stożki spływowe, a przed nimi, jako ich przedłużenie, powstał słaby zarys stożka napływowego.

W ciągu następnego dnia z pomiarów wynika, że front lodu cofnął się o kilka centymetrów, ale ślady tego procesu zaznaczają się słabo. Czoło ma w zasadzie ten sam kształt i tylko miejscami widać ślady podtapiania lodu. Na powierzchni lodowca w pobliżu czoła w pokrywie morenowej tworzą się pęknięcia i powstają szczeliny do paru mm szerokości. Dalej od czoła na powierzchni poprzednio wyrównanej tworzą się nieregularne zagłębienia na skutek osiadania po wytopieniu bryłek lodu w miejscach gdzie lód był bardziej spękany. Brzegi studni lodowcowych są lekko obcypione i odsłania się w nich czysty lód.

Przy skraju lodowca materiał morenowy obsypuje się i ześlizguje w dół, tworząc u podnóża czoła szereg niewielkich stożków nasypowych złożonych głównie z materiału piaszczysto-gliniastego. We wschodniej części czoła, gdzie wytopiła się bruzda wcinająca się w ścianę na kilka centymetrów, tworzy się dosyć duży stromy stożek nasypowy przylegający do lodu, złożony z materiału piaszczysto-żwirowego o bardzo stromym kącie pochylenia — ok.  $60^\circ$ . Kąt pochylenia stożka znacznie przekracza kąt usypu suchego piasku i składa się z kilku nadbudowujących się nad sobą spływów.

Dopiero w trzecim dniu (fig. 30) ślady topnienia czoła lodu zaznaczają się już wyraźniej. Na ścianie frontowej zarysowuje się szereg nacięć poprzecznych, do 10-15 cm długości, przedłużających się w głąb w postaci drobnych szczelin w pokrywie morenowej. Nacięcia te wykorzystane są przez spływy i zsuwy gruzu morenowego z powierzchni lodowca, które przed jego czołem dają materiał na tworzący się wał morenowy i które powtarzając się wielokrotnie wzdłuż tej samej drogi, tworzą w wyniku formy zbliżone do „stożków“ nasypowych, chociaż bierze w nich udział

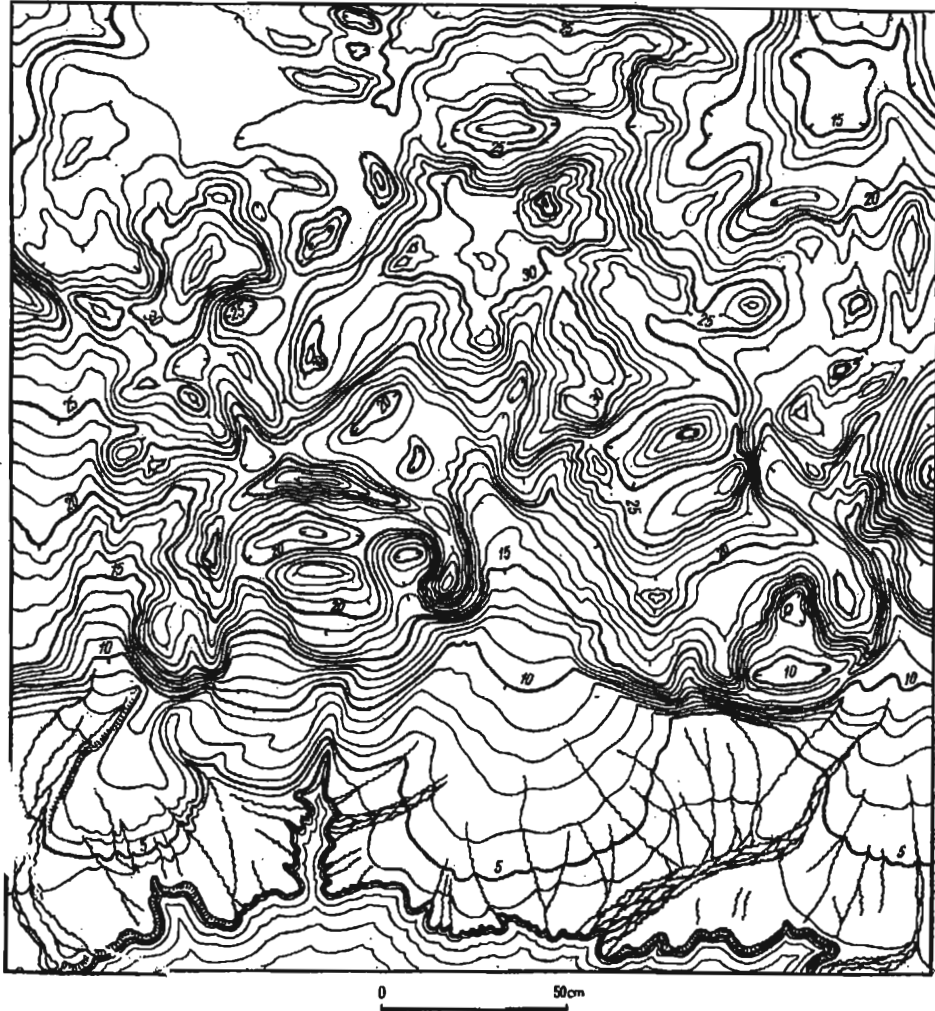


Fig. 31

Eksperyment IV (1957). Mapa hipsometryczna po zakończeniu „glacialnej” części eksperymentu. Poziomice co 1 cm

Experiment IV (1957). Hipsometric sketch map drawn upon termination of the “glacial” part of the experiment. Contour interval 1 cm.

materiał gliniasty. Z czoła lodu zsuwają się żwir, względnie spływa glina ze żwirem, tworząc zaczątek czołowego zwałowiska morenowego, którego część opierająca się o lód ma do 15 cm wysokości i jest stromo nachylona ( $20^{\circ}$ – $40^{\circ}$ ) w kierunku przedpola.

Gliniasty materiał, pokrywający lód na górnej jego powierzchni osiada i zsuwa się z wyniesień, na których pozostają tylko głazy. W obni-

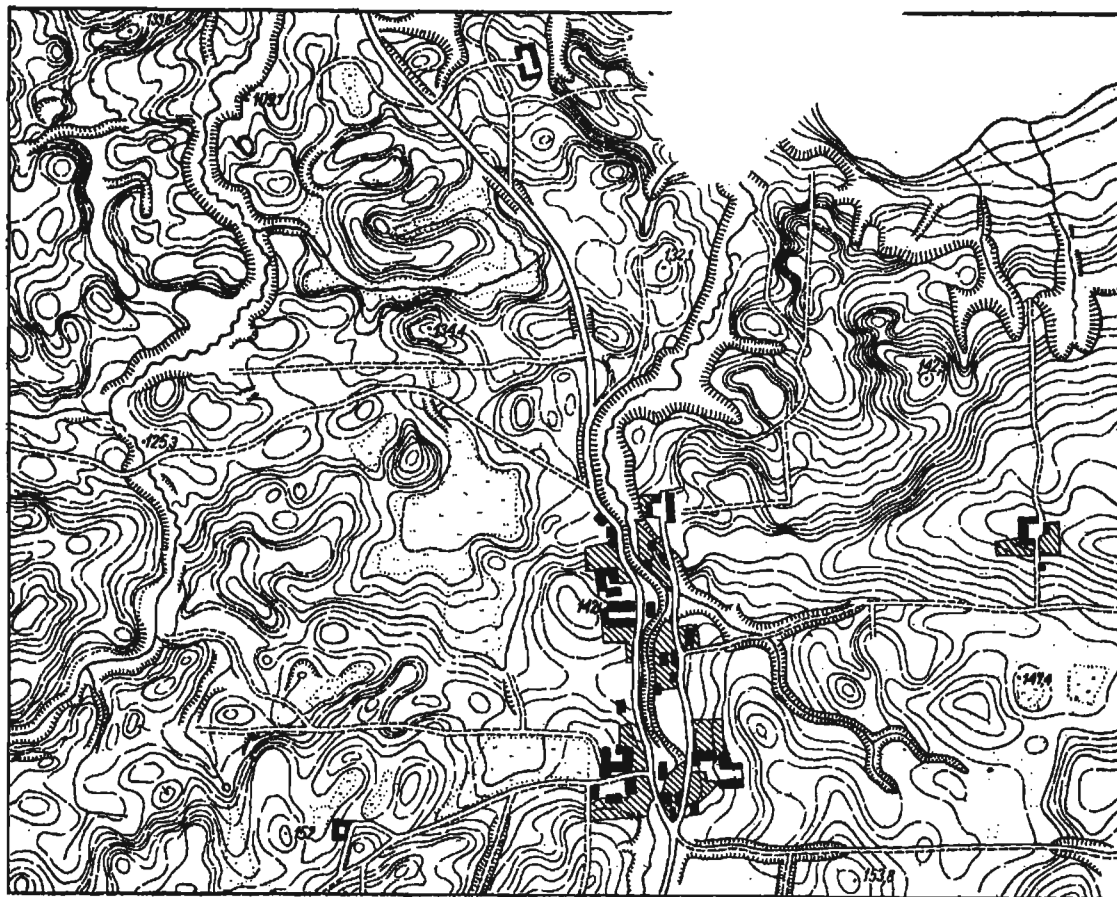


Fig. 32

Wycinek z mapy topograficznej szczegółowej powiększony do skali porównywalnej z rzeźbą otrzymaną w basenie doświadczalnym. Wycinek mapy z okolic Ostródy na Pojezierzu Mazurskim. Skala 1:5000

Fragment of detailed topographic map from the Ostróda area in the Mazury Lake District, with enlarged scale comparable to that of the relief obtained within the experimental basin. Skale

1:5000

zeniach, przez które ścieka woda, gromadzi się piasek. Dwie studnie w lodzie zostały zasypane przez zsuwającą się do nich glinę; trzecia — poszerzyła się przez topnienie i funkcjonuje nadal. Proces sypania się sandrów przyspieszył się nieco. Ich stożki, zakończone palczastymi delta-  
mi przy ujściach potoków, wkraczają do zastoiska, które utworzyło się na przedpołu i zajmuje znaczną jego część. Linia brzegowa tego zastoiska szybko się przesuwa zależnie od zmian układu potoków i ciągle narastających delt. W brzeżnej części zastoiska, w którym tworzy się osad ilasty, widoczne są dennie spływy ilaste. Na przedłużeniu ujść potoków, na skutek rozmywania przez prąd, tworzą się niewielkie podwodne dolinki.

Rozcięcie czoła przez poprzeczne dolinki w czwartym dniu silnie wzrasta, a w związku z tym wzmagają się zsuwanie się materiału zwałowego, który jeszcze wciąż ma tendencję tworzenia „stożków“. Obecnie są one jednak szersze i niższe niż poprzednio i mniej regularne w kształcie.

Rozczłonkowanie czoła i poszerzenie się szczelin prowadzi do wyodrębnienia niektórych brył lodu w górnej części czoła lodu, które ma ok. 35–40 cm wysokości. Jedna z takich brył, odcięta od reszty masy lodu szczeliną rozszerzoną przez topnienie, zsuwa się naprzód pchając przed sobą materiał morenowy, który został nasunięty na sandr.

W piątym dniu wśród moren wypełniających obniżenie między dwiema głównymi kulminacjami lodu utworzyła się dolinka, którą płynie strumyk spływający w dół po powierzchni lodu i sypie na przedpołu szybko narastający stożek napływowy.

Czoło lodu, bardziej pochyłe niż poprzednio i pokryte morenami, daje już inny typ akumulacji czołowej. Formy „stożkowate“ przestają się tworzyć, a świeżo zsunięta morena przybiera kształty nieregularnych rwących się wałów nadsypanych ponad poprzednie moreny, które osuwały się i rozpełzły w związku z cofnięciem się lodu i tworzą teraz niżej leżący płaski stopień.

Zagrzebanie czoła lodu w 6-tym dniu wzrasta. Lód bezpośrednio na powierzchni odsłania się tylko w jednym miejscu. Rzeźba moren staje się bardzo złożona. Wśród licznych pagórków i zagłębień tworzą się małe jeziora wypełnione brudną błotnistą wodą ściekającą z moren na topniejącym lodzie. Pokrycie lodu przez morenę ablacyjną nie jest jednak trwałe. W ciągu dalszych dni coraz to w innym miejscu odsłania się on na powierzchni po zsunięciu się z niego jego pokrywy powierzchniowej.

Większość szczelin w lodzie jest zapełniona już od poprzedniego dnia gliną zsuniętą z góry. Powoduje to „uszczelnienie się“ lodu i zmniejszenie się odpływu spod lodu, a nawet ilości strumieni na jego powierzchni.

Narastanie sandrów odbywa się teraz szybciej. Strugi spływające ze stromizny zewnętrznych wałów moren czołowych znoszą sporo materiału grubszego, który dostaje się teraz na sandr dalej niż poprzednio.



Nowym zjawiskiem jest pojawienie się wśród moren, znajdujących się na zewnątrz lodu, kilku dużych zsuwów, które wysuwają się swymi szerokimi jezorami daleko na sandr. W górnych ich częściach dobrze za-

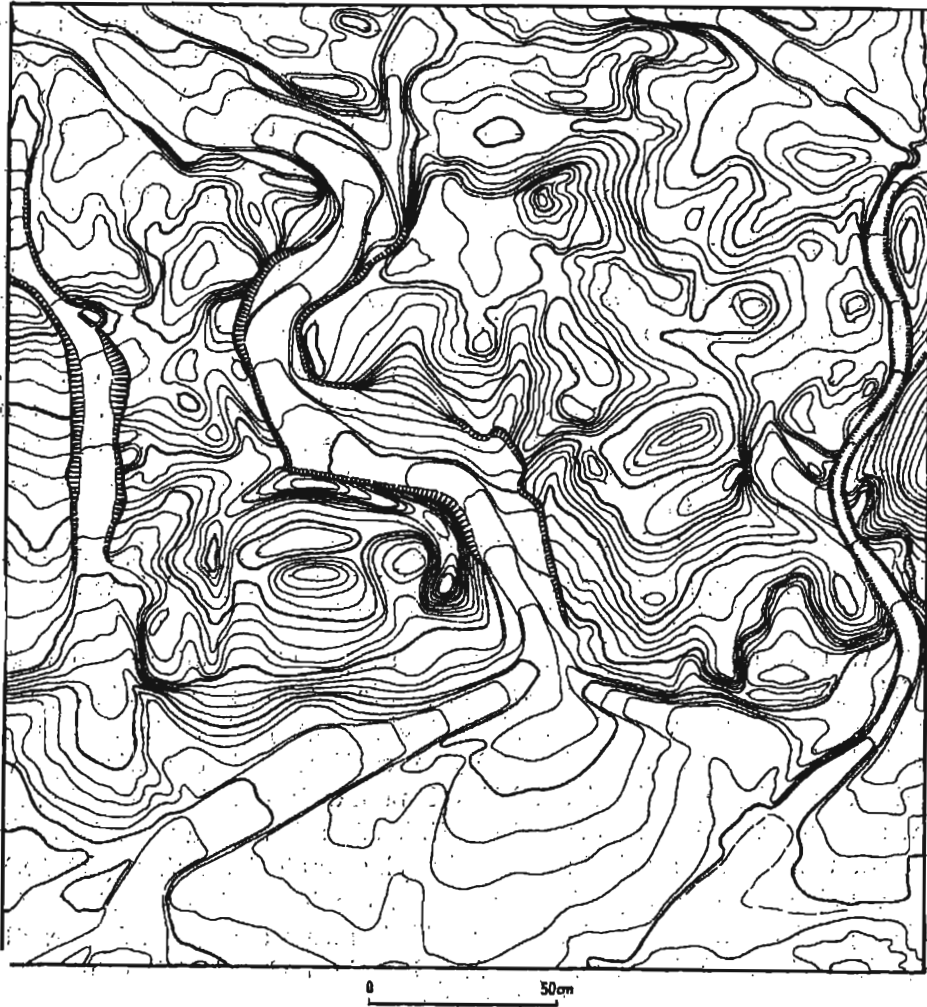


Fig. 33

Eksperyment IV (1957). Mapka hipsometryczna po zakończeniu „wodnej” części eksperymentu. Poziomice co 1 cm

Experiment IV (1957). Hypsometric sketch map upon termination of the “water” part of the experiment. Contour interval 1 cm.

rysowują się „cyrki oberwania“, w niektórych przypadkach z przegłębionymi obniżeniami w środku.

W miarę topnienia lodu, niektóre poprzednio zaszypane szczeliny poszerzają się na krótki okres czasu i wtedy ponownie chwilowo pojawiają się wypływy spod lodu.

Pod koniec siódmego dnia we wschodniej części czoła obsuwa się po glinie duża bryła lodu, spycha moreny i tworzy przed sobą wyraźny wał wysokości 5-8 cm, za którym później powstaje dobrze wyrażona misa bezodpływowa z jeziorem. W głębi moren po innych wytopionych bryłach lodu również powstaje szereg zagłębień z jeziorami wypełnionymi przez wodę topnienia. Brzeżne wały moren czołowych wyodrębniają się coraz lepiej od nieregularnego chaosu pagórków i zagłębień, który panuje na ich zapleczu i ciągle się przeobraża aż do chwili całkowitego stopnienia lodu w 13-ym dniu doświadczenia (odpływ wód topnienia ustaje nieco wcześniej, już w 12-ym dniu).

W ciągu dalszych dni powierzchnia moren zaczyna wysychać. Gruzłowate bryły gliniaste tworzące drobne wyniesienia, twardnieją. Na sandrze wszystkie dolinki są bez wody. Osuszenie i tu postępuje wyraźnie. Tylko w większych zagłębieniach bezodpływowych trwają jeszcze jeziora, ale po 15-ym dniu i one znikają całkowicie.

Na powierzchni coraz liczniej pojawiają się spękania związane z wysychaniem gruntu, grupujące się najliczniej dookoła zagłębień, w których procesy osiadania i wysychania trwają najdłużej.

W 16-ym dniu, po pełnym osuszeniu się powierzchni, zrobiono półgodzinny deszcz, po którym znikają spękania gruntu, rozplývają się gruzłowate formy na wzgórkach gliniastych, kąty pochylenia zboczy na wzniesieniach morenowych łagodnieją i część materiału z nich spływa w dół wypełniając obniżenia, w których ponownie powstają jeziora. Pojawiają się również ślady świeżej erozji. Woda spływająca teraz na sandr, dąży do utworzenia, zamiast masy drobnych strumieni, określonego łożyska rzeki, które pogłębia się i tworzy tarasy. Powierzchnia pognacjalna jest już w pełni uformowana (fig. 31) i znajduje swoje analogie wśród rzeźby pojezierzy (fig. 32). Dalszy bieg doświadczenia, podobnie jak w ubiegłym roku, poświęcony jest rozwojowi rzeźby erozyjnej i w zasadzie przebiega podobnie (fig. 33).

#### ODPŁYW WÓD TOPNIENIA

Dla zorientowania się w przebiegu procesu topnienia lodu prowadzone były obserwacje nad ilością wody spływającej z „sandru“. Odpływ mierzony był przy wylocie rury odprowadzającej wodę z basenu doświad-

czalnego do osadnika znajdującego się na zewnątrz tego basenu<sup>2</sup>. Jako wielkość charakteryzująca odpływ przyjmowana była średnia z trzech kolejnych pomiarów wyrażona w  $\text{cm}^3/\text{min}$ . Wyniki tych obserwacji robionych w zasadzie dwa razy dziennie zestawione zostały na załączonym wykresie (fig. 34) z tym, że dla okresu od południa 6-go dnia do południa 9-go dnia doświadczenia, dla którego nie ma pełnych danych, zostały one zaznaczone liniami przerywanymi.

Z załączonego wykresu widać, że czas topnienia lodu trwał 12 dni. W przebiegu tego procesu wyraźnie uwidacznia się rytm dzienny, mimo że piwnica, w której przeprowadzono eksperyment, nie posiada okien ani bezpośredniego połączenia z pomieszczeniami położonymi na parterze.

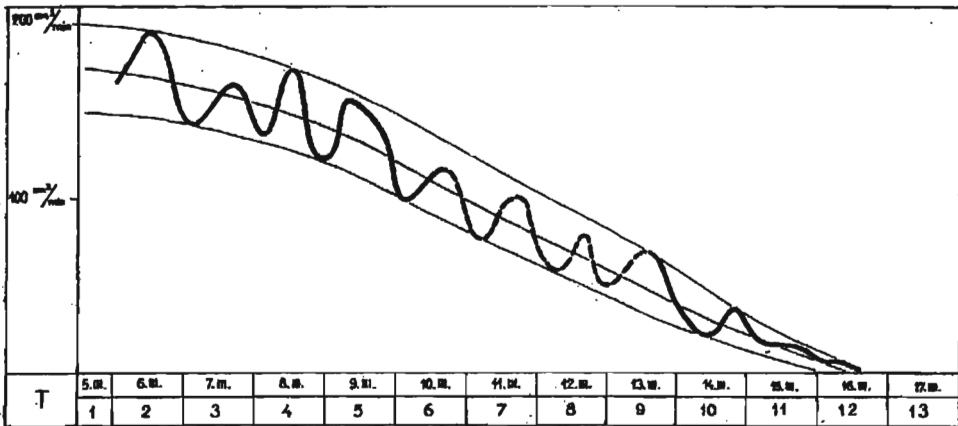


Fig. 34

Eksperyment IV (1957). Krzywa odpływu wód topnienia w  $\text{cm}^3/\text{min}$ .  
T kolejne dni doświadczenia

Experiment IV (1957). Curve of melt-waters runoff in cubic centimetres per minute  
T successive days of experiment

Każdorazowo po nocy notowane jest zmniejszenie odpływu i jego wzrost w godzinach popołudniowych. Podobny rytm dzienny, choć w sposób mniej jaskrawy, ujawniają również temperatury powietrza przy wejściu do piwnicy (krzywa E na fig. 35). Jest on wynikiem dopływu ciepłego powietrza z zewnątrz przy otwieraniu drzwi oraz jego ocieplaniu się w ciągu dnia. Szczególnie wyraźnie zaznacza się to w drugim dniu po pobycie w piwnicy większej grupy ludzi oraz nieco słabiej w siódmym dniu eksperymentu.

<sup>2</sup> W czasie tego doświadczenia do żadnej z trzech istniejących studni lodowych nie wlewano wody z zewnątrz.

Maksymalny odpływ wody z basenu został zanotowany po południu w drugim dniu, kiedy dochodził do 200 cm<sup>3</sup>/min. W dalszych dniach maleje on stopniowo i w południe 12-go dnia spada poniżej 5 cm<sup>3</sup>/min., a pod wieczór tegoż dnia ustaje całkowicie. Moment ten dosyć dokładnie zbiega się z chwilą całkowitego stopienia się lodu.

Zgeneralizowane linie łączące maksimę i minima dziennego odpływu wskazują, że przebieg topnienia lodu odbywał się prawie zupełnie regularnie, bez żadnych większych zakłóceń. Całość odpływu można ocenić na ok. 1,8 m<sup>3</sup> wody. Stanowi to ok. 60% wody, która była zawarta w 3 tonach lodu użytego do doświadczenia. Pozostałe 40% wody przypada w znacznej części na retencję w zagłębieniach bezodpływowych („zastoiska“ i „jeziora“) i na wsiąkanie (nasylenie wilgocią piasków i glin wchodzących w skład moren i sandrów) oraz w mniejszej części na parowanie.

Na podstawie bardzo przybliżonego szacunku wydaje się, że na pierwsze dwie z tych pozycji przypada ok. 25-30% wody pochodzącej z topnienia lodu, a na trzecią nie więcej niż 10-15%.

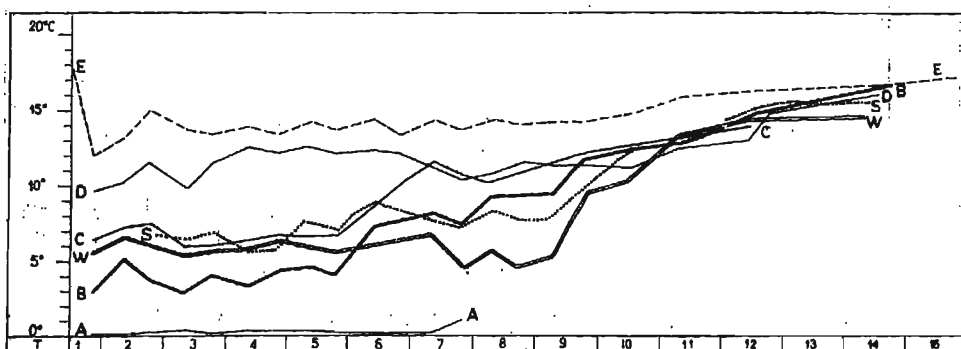


Fig. 35

Eksperyment IV (1957). Wykres zmian temperatur na powierzchni „terenu“  
 A temperatura powietrza w szczelinach lodu, B przed czołem lodu, C w obniżeniu na powierzchni lodu, D na wyniosłości na powierzchni lodu, S na sandrze w odległości 1 m od czoła lodu, W temperatura wody na sandrze, E temperatura powietrza na wysokości 1,2 m ponad podłogą i 4,5 m od lodu, T kolejne dni doświadczenia

Experiment IV (1957). Diagrammatical drawing of temperature changes within the experimental area

A air temperature in ice fissures, B at the ice-edge, C in the depression of the ice surface, D on elevated ground of the ice surface, S on the Sandar at one metre distance from the ice-edge, W water temperature on the Sandar, E air temperature at a height of 1.2 m. above the cellar floor and 4.5 m. distance from the ice, T successive days of the experiment

Obliczenia powyższe charakteryzują sytuację do 12-go dnia eksperymentu. Po tym czasie na skutek dosyć znacznego podniesienia się temperatury gruntu i przyziemnej warstwy powietrza nastąpiło wzmoczenie parowania kosztem wody ze zbiorników, które wyschły całkowicie, oraz wilgoci gruntowej, która wybitnie zaczęła się zmniejszać.

#### OBSERWACJE „KLIMATOLOGICZNE“

W czasie przeprowadzania IV-go eksperymentu nasunęła się myśl, że obok obserwacji geomorfologicznych mogą być przy tej samej okazji dokonane pewne obserwacje klimatologiczne, które pozwoliłyby na zorientowanie się w roli zmian powodowanych obecnością wśród moren większych partii lodu. W tym celu zorganizowane zostały obserwacje temperatury przeprowadzane kilkoma termometrami z podziałką  $0,2^{\circ}\text{C}$  oraz dla celów kontrolnych uruchomiony został jeden termograf i jeden higrograf.

#### *Pomiary temperatur na powierzchni „terenu“*

Pierwsza grupa obserwacji „klimatycznych“ objęła pomiary temperatur w kilku wybranych punktach na nieznacznej wysokości ponad powierzchnią „terenu“. W ciągu pierwszych 9-ciu dni dwa razy dziennie, około godz. 9-ej i 19-ej, dokonywane były systematycznie pomiary temperatur w 9-ciu punktach. Po tym okresie były one jeszcze kontynuowane przez pewien czas, ale już mniej systematycznie i tylko raz dziennie.

Dwa z tych punktów — C i D — znajdowały się na lodowcu, pierwszy z nich w jednym z większych zagłębień na jego powierzchni, drugi zaś na wyniosłości, która na początku doświadczenia leżała około 18 cm wyżej niż punkt poprzedni. W obu przypadkach temperatury były mierzone na wysokości ok. 1 cm ponad powierzchnią terenu.

Trzeci pomiar — A — był wykonany mniej więcej w środku „studni lodowcowej“ o średnicy 5-8 cm, na głębokości ok. 5 cm poniżej powierzchni „lodowca“ w taki sposób, aby termometr nigdzie nie dotykał ścian lodowych. Pomiar ten pozwala zorientować się w temperaturach powietrza panujących wewnątrz naszego „lodowca“.

Następne dwa pomiary były przeprowadzane na sandrze: jeden tuż przed czołem lodowca (B), a drugi (S) w odległości 1 m od niego w pobliżu otworu, którym spływa woda z basenu doświadczalnego do studzienki kontrolnej (osadnik).

Oprócz tego w tych samych terminach mierzono temperaturę wody (W) spływającej z sandru w odległości ok. 1 m od czoła lodowca, po przebyciu przez wodę drogi długości od 2-3 m. Dla celów porównawczych i kon-

trolnych dokonywano jeszcze pomiaru przy wejściu do piwnicy w odległości ok. 4 m od skraju basenu doświadczalnego, a 5 m — od „czoła lodowca“.

Poza tym były obserwowane temperatury na górnej krawędzi ściany basenu i po jej zewnętrznej stronie oraz doraźnie w niektórych innych punktach.

Do obserwacji były użyte termometry pozwalające na dokładność odczytu  $0,1^{\circ}\text{C}$  z założeniem, że za miarodajne uznawane będą odchylenia temperatur powyżej  $0,5^{\circ}\text{C}$  (tab. 1). Zaobserwowane temperatury wykazują dosyć znaczne różnice i pozwalają na wyciągnięcie pewnych wniosków.

W punkcie A, w studni lodowcowej, przez cały czas jej istnienia temperatury utrzymują się w granicach  $0,2-0,4^{\circ}\text{C}$ , wykazując nieznaczne wahania, które należy złożyć na karb błędów obserwacji.

Temperatury przed czołem lodowca (punkt B) przez cały czas, w ciągu którego ma ono kształt stromej ściany, wahają się między  $3-5^{\circ}\text{C}$  i są prawie o  $10^{\circ}$  niższe niż w pozostałej części pomieszczenia. W miarę obniżania się i „cofania się“ czoła lodu, temperatury mierzone w dalszym ciągu w tym samym punkcie stopniowo wzrastają skokami, zależnie od etapów recesyjnych „czoła“.

Na powierzchni lodowca, nierównej i pokrytej morenami o dosyć zróżnicowanej miąższości, temperatury powietrza są również zróżnicowane. Stwierdzone w czasie eksperymentu różnice sięgały  $4-6^{\circ}$  i zaczęły się zacierać dopiero po stopieniu się większych brył lodu, tworzących znaczniejsze kulminacje. Na wyniosłościach, mimo bliskiego występowania lodu, temperatury są znacznie wyższe niż w obniżeniach. Te lokalne „inwersje“ wystąpiły dość jaskrawo nawet przy małej skali eksperymentu.

Po stopieniu się większych kulminacji lodowych (7-my dzień) temperatury w punktach C i D, mimo istniejącej w dalszym ciągu dość znacznej różnicy ich wysokości, wyrównały się, a nawet na wyniosłościach w niektórych sytuacjach były niższe niż w obniżeniach.

Temperatura wody na sandrze (W) przez cały czas istnienia większych brył lodu zagrzebanych wśród moren utrzymuje się między  $4,5-6,8^{\circ}$ , to znaczy jest o  $6,5$  do  $8^{\circ}$  niższa niż temperatura powietrza otoczenia (punkt E). Po stopieniu się lodu (9-ty dzień) temperatura wody szybko się podnosi i już w 11-ym dniu jest niższa od temperatury w pokoju o niecałe  $3^{\circ}$ , a w 14-ym dniu tylko o ok.  $2^{\circ}$ . Charakterystyczne jest pod tym względem „skrzyżowanie“ się temperatur powietrza przed czołem lodu i temperatury wody, widoczne na wykresie (fig. 35) na początku 6-go dnia doświadczania. Jest to moment, w którym znikło stromo zarysowane „czoło“ a pozostały tylko zagrzebane wśród moren bloki „martwego lodu“.

Tabela (Chart) 1.

Zestawienie pomiarów temperatury powietrza i wody na „lodowcu“ i na jego przedpołu

Measurement chart of air and water temperatures on the „glacier“ and its forefield

A — S temperatura powietrza: A wewnątrz lodu (w studni lodowcowej), B przed czołem „lodowca“, C na lodowcu (w zagłębieniu), D na lodowcu (na wyniosłości), E przy wejściu do piwnicy, S na „sandrze“ (1 cm od czoła lodu), W temperatura wody na „sandrze“ (1 m od czoła lodu)

A — S air temperature: A in glacier well, B in front of ice-face, C in glacier depression, D on ice culmination, E at entrance to cellar, S on the „Sandar“ (1 cm from ice-face). W water temperature on the „Sandar“, 1 m. from ice-face. I-IV development stages of experiment

Okres eksper.	Kolejne dni	Data	Godzina	A	B	C	D	E	S	W	U w a g i
I	1	1957 r. 5.III	12	—	—	—	—	ok. 17,5	—	—	przed rozpoczęciem eksperymentu
	2	6.III	20	—	3,0	6,5	9,8	12,0	—	5,5	po zakończeniu „budowy lodowca“
			9	0,2	5,1	7,2	10,2	13,1	—	6,7	(po pobycie większej grupy ludzi)
	19	0,3	3,9	7,6	11,6	15,0	6,6	—			
	3	7.III	9	0,4	3,0	—	9,8	13,7	6,3	5,6	
			19	0,3	4,0	5,9	11,6	13,4	6,7	5,7	
	4	8.III	9	0,4	3,5	6,3	12,6	13,8	5,6	5,8	
			19	0,4	4,3	6,5	12,1	13,4	5,8	6,4	
	5	9.III	9	0,4	4,6	6,5	12,6	14,3	7,8	—	
			19	0,3	4,3	6,8	12,2	13,8	7,0	5,5	
II	6	10.III	9	0,2	7,3	—	12,3	14,3	8,8	—	czoło lodu stopione i zasypane „morenami“
			19	—	—	10,0	12,1	13,3	8,0	—	
	7	11.III	9	0,2	8,1	11,5	9,1	14,4	7,6	6,2	(po pobycie większej grupy ludzi)
			19	1,3	7,5	10,5	10,3	13,8	7,1	4,6	studnia lodowa zasypana moreną
8	12.III	9	—	9,3	10,1	10,8	14,3	8,0	5,9		
		19	—	9,4	9,3	11,6	14,1	7,5	4,7		
9	13.III	9	—	9,5	—	11,3	14,2	7,6	5,3		
		19	—	11,8	11,2	11,6	14,2	9,8	9,8		
III	10	14.III	14	—	12,3	—	11,0	14,8	12,4	10,5	
	11	15.III	9	—	12,9	—	12,7	14,6	—	13,2	
	12	16.III	13	—	14,7	13,8	13,0	15,5	14,5	14,5	topnieją ostatnie bryły lodu
19			—	14,9	14,1	15,2	15,7	15,1	14,4	pełne stopnienie lodu	
IV	13	17.III	13	—	—	—	—	16,1	—	—	
	14	18.III	14	(15,4)*	16,2	15,7	15,5	16,5	15,3	14,4	
	15	19.III	13	—	—	—	—	16,9	—	—	
	16	20.III	13	—	—	—	—	17,5	—	—	

\* Pomiar w miejscu, gdzie poprzednio istniała studnia w lodzie  
Temperature taken at site of former glacier well

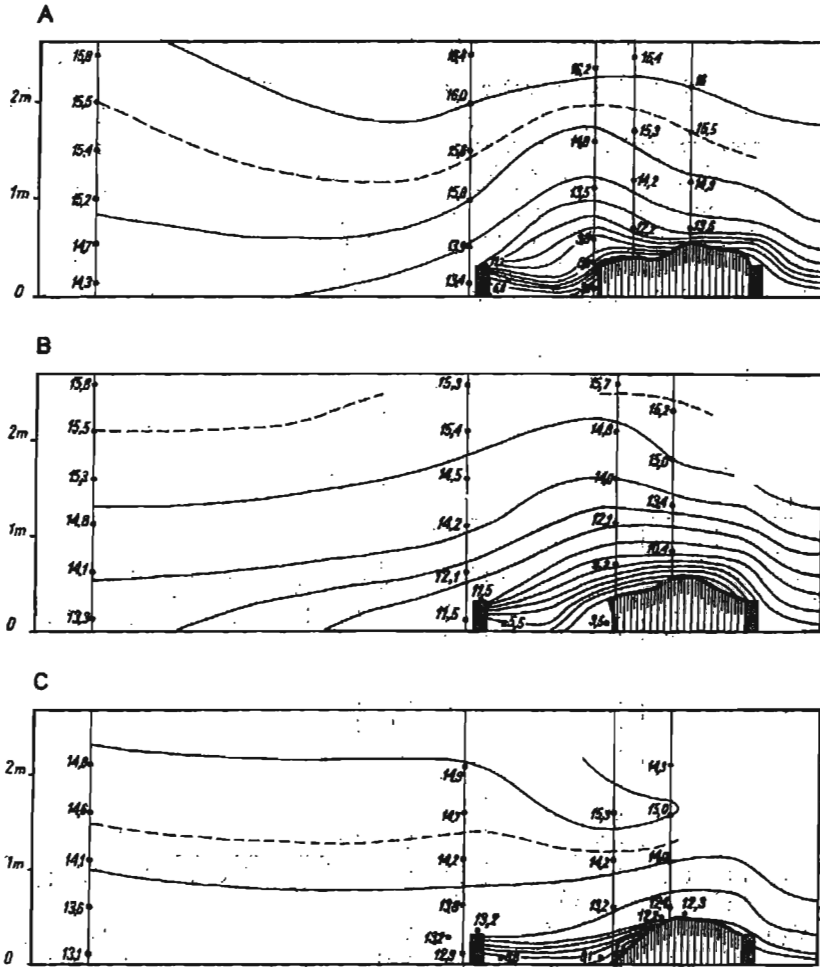


Fig. 36

Eksperyment IV (1957). Przekroje podłużne rozkładu temperatur powietrza ponad lodem w 2-im (A), 4-tym (B) i 6-ym (C) dniu doświadczenia. Zakreskowane pionowo — lód; gęste kreski skośne — ścianki betonowe basenu; izotermy co 1°C; punkty — miejsca pomiaru temperatur

Experiment IV (1957). Longitudinal sections of air temperature pattern over the glacier during the 2nd (A), 4th (B) and 6th (C) days of experimenting. Ice indicated by vertical dashes; concrete reservoir walls by crowded oblique dashes; isothermic lines plotted for every 1°C; sites of temperature measurements indicated by dots



### Profile termiczne

Oprócz pomiarów temperatury w kilku wybranych punktach, o których mowa była wyżej, w drugim, czwartym i szóstym dniu eksperymentu wykonano jeszcze 3 profile termiczne w kierunku prostopadłym do czoła lodu (fig. 36) i jeden profil poprzeczny (fig. 37). Wystąpiło w nich bardzo jaskrawo ochłodzenie powietrza spowodowane przez lód, a następnie w miarę grubienia pokrywających go moren, stopniowe zmniejszanie się tego wpływu. Największe ochłodzenie powietrza zaznaczało się stale przed czołem lodu. Małało ono natomiast w miarę podnoszenia się nad jego górną powierzchnię, tak że różnice temperatur przed czołem lodowca i na jego kulminacjach dochodziły do  $9^{\circ}$  przy różnicach wysokości rzędu 60 cm.

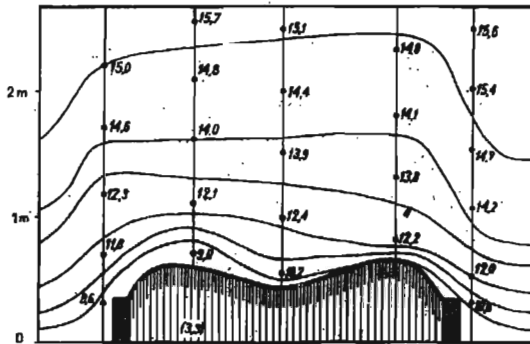


Fig. 37

Eksperyment IV (1957). Przekrój poprzeczny rozkładu temperatur powietrza nad lodem w 2-gim dniu doświadczenia. Oznaczenia jak na fig. 36

Experiment IV (1957). Cross section of air temperatures pattern over the ice during the 2nd day of the experiment. Legend as in fig. 36

Ponad czołem „lodowca“, w którym przez dłuższy czas odsłaniał się lód, utworzył się wał chłodnego powietrza. Na wysokości 0,5 m ponad dnem basenu i w odległości 1,35 m od czoła lodu temperatury powietrza na tej samej wysokości były o  $4^{\circ}$  niższe niż nad lodem. Na wysokości 1 m różnice te wynosiły ponad  $1,5^{\circ}$ , a na wysokości 1,5 m nieco poniżej  $1^{\circ}$ . Jeszcze na 2 m ponad podłogą zaznaczało się ochłodzenie rzędu  $0,5^{\circ}$  i dopiero pod samym sufitem następowało wyrównanie temperatury.

W drugim dniu eksperymentu (fig. 36-A) wyraźnie zaznaczyła się różnica między temperaturami powietrza nad powierzchnią lodu, w po-

blizu jego czoła, gdzie miejscami odsłaniał się lód, a jego dalszym zapleczem pokrytym ciągłą warstwą „moreny powierzchniowej“. Znalazło to również swoje odbicie w grubości warstwy ochłodzonej, która miała w tym ostatnim przypadku dwukrotnie mniejszą miąższość. Z chwilą pokrycia całej powierzchni lodowca morenami (4-ty dzień) różnice te zmalały i warstwa ochłodzona nad całym lodem miała mniej więcej wyrównaną grubość.

Po stopieniu się stromego czoła lodu, ochłodzenie ponad nim znacznie zmalało, a wyraźnie poprzednio zaznaczający się wał zimnego powietrza zaczął zanikać (6-ty dzień, fig. 36-C). Natomiast ponad sandrem jeszcze przez długi czas, aż do definitywnego stopienia się brył lodu, zalegała warstwa chłodnego powietrza, o temperaturze blisko o  $5^{\circ}$  niższej niż o 0,5 m ponad nim.

Przy okazji warto również zwrócić uwagę na kształtowanie się temperatur na „sandrze“, które były mierzone w dwóch punktach w odległości 10 i 110 cm od czoła lodu. W początkowej fazie różnice te były dość znaczne i w drugim dniu doświadczenia wynosiły prawie  $3^{\circ}$ . W czwartym dniu zmalały one do  $2^{\circ}$ , a w szóstym były już mniejsze niż  $1^{\circ}$ . Z zestawienia temperatur na sandrze (S) z temperaturami przed czołem lodu (B) i wody (W) na wykresie (fig. 35) widać, że w pierwszym okresie (1-y i 5-ty dzień) układały się one w zależności od temperatury przy czołe lodu, w późniejszym zaś (6-ty i 14-ty dzień) decydowała o nich temperatura wody w potokach płynących po sandrze.

#### WNIOSKI Z OBSERWACJI „KLIMATOLOGICZNYCH“

Podsumowując wyniki obserwacji temperatur w czasie eksperymentu, można zauważyć, że zaznaczają się dość wyraźnie cztery okresy w rozwoju sytuacji „klimatycznej“.

##### *Okres I (1-szy — 5-ty dzień)*

Na temperatury powietrza dominujący wpływ wywiera lód odsłaniający się w czołowej partii lodu powodując dosyć znaczne ich obniżenie (przed czołem lodu  $3-5^{\circ}$ , a w zagłębieniach na lodzie  $5,9-7,6^{\circ}$ ) w stosunku do otoczenia ( $12-15^{\circ}$ ). Ponad partią czołową lodu formuje się wał chłodnego powietrza („strefa wyżowa“), słabiej zaznaczająca się nad jego częścią pokrytą grubszą warstwą moreny powierzchniowej. Na powierzchni lodu temperatury są dość znacznie zróżnicowane z tym, że na wyniosłościach są one zdecydowanie wyższe niż w zagłębieniach (stwierdzone różnice  $4-6^{\circ}$ ). Temperatury powietrza nad sandrem są dosyć niskie i układają się przede wszystkim pod wpływem ochładzającego działania lodu

w czołowej jego partii. Temperatura wody na sandrze jest wyższa niż powietrza przy czole lodu.

#### *Okres II (6-ty — 9-ty dzień)*

Lód w czołowej jego strefie został pokryty morenami i jego wpływ termiczny zmalał. Temperatury przy czole lodu stale się podnoszą (od ok. 5° na początku okresu do ok. 10° pod jego koniec). Na lodzie temperatury na wyniosłościach i w zagłębieniach różnią się od siebie nieznacznie (na ogół różnice rzędu 3°) i układają się różnokierunkowo zależnie od sytuacji. Warstwa chłodnego powietrza nad lodem stopniowo zanika. Temperatury wody na sandrze są niższe niż temperatury powietrza przy czole lodu. Temperatury powietrza na sandrze kształtują się zgodnie ze zmianami temperatury spływającej po nim wody, która w tym okresie jest głównym czynnikiem ochładzającym.

#### *Okres III (9-ty — 12-ty dzień)*

Grubość pokrywy morenowej nad lodem wzrasta. Różnice temperatur przy czole lodu na morenach i na sandrach stopniowo maleją i obecnie nie przekraczają one 2°, gdy w okresie poprzednim wynosiły 2,5-4°, a w pierwszym 7-9°. Najniższe temperatury notowane są najczęściej w zagłębieniach śródmorenowych. Temperatury powietrza w różnych punktach na sandrze niewiele różnią się od siebie i coraz bardziej zbliżają się do temperatur płynącej po nim wody.

#### *Okres IV (od 12-go dnia wieczorem)*

Lód stopniał całkowicie. Wszystkie notowane temperatury powietrza w obrębie basenu doświadczalnego mało różnią się od siebie (w granicach 1°) i od temperatury powietrza w większej odległości od miejsca, gdzie leżał lód (różnica 1,2°). Najniższą temperaturę ma woda w istniejących jeszcze „zastoiskach“ i „jeziorach“.

Okres IV z istniejącymi zbiornikami wody i gruntem przesyconym wilgocią trwa przez kilka dni, po czym następuje okres V, w ciągu którego różnice temperatur maleją jeszcze bardziej, wszystkie zagłębienia bezodpływowe są pozbawione wody i grunt na powierzchni moren i sandrów staje się suchy.

W sumie okres pierwszy trwał ok. 100 godzin, drugi ok. 85 godzin i trzeci ok. 75 godz. Proporcje między nimi układają się więc mniej więcej jak 4 : 3,4 : 3.

Cały układ zmian „klimatu“, w czasie doświadczenia ma niewątpliwie przebieg tylko częściowo obrazujący to, co się dzieje w przyrodzie

w czasie recesji lodowca. Poza ogromną różnicą w skali zjawisk, wyeliminowana tu została rola opadów atmosferycznych, wiatrów i insolacji. Jednocześnie jednak brak wpływu wymienionych czynników pozwala zorientować się lepiej w przebiegu zmian, które są uzależnione jedynie od wpływu topniejących mas lodu pozostawionych przez lodowiec znajdujący się w recesji. Daje to możliwość przygotowania odpowiedniego programu badań w terenie oraz naszkicowania problematyki, z którą należy się liczyć w czasie ich przeprowadzania.

Wyróżnione „okresy klimatyczne“ w czasie „recesji“ niewątpliwie mają swoje miejsce również w rzeczywistości, trzeba jednak pamiętać, że nie ujmują one całości charakterystyki zmian klimatycznych, a jedynie w sposób ogólny orientują w roli, która przypada wśród nich na udział pozostawionych przez „lodowiec“ mas lodu.

Byłoby rzeczą celową, aby — nawiązując do spostrzeżeń poczynionych w czasie opisywanego doświadczenia — przeprowadzić analogiczne obserwacje na istniejących lodowcach, znajdujących się w stadium recesji, według podobnego programu.

### Ogólna ocena wyników doświadczeń

Eksperymenty prowadzone w ciągu szeregu lat, zarówno dla celów doświadczalnych, jak i dydaktycznych wzbudziły dosyć żywe zainteresowanie ich wynikami. Tworząca się w basenie rzeźba, zarówno w poszczególnych stadiach jej rozwoju, jak i w ostatecznym swoim wyglądzie, w dużym stopniu przypominała młode krajobrazy polodowcowe i polarne widziane „z lotu ptaka“.

Powstające w basenie doświadczalnym krajobrazy oddały duże usługi przy wykładach z zakresu geomorfologii i geologii czwartorzędu. Słuchacze byli pochłonięci obserwowaniem bezpośrednio na ich oczach toczącej się akcji rzeźbotwórczej terenu. Zaciekawili on również szereg osób ze świata geologicznego, które chciały się nim zainteresować. Końcowe fazy eksperymentów z 1956 i 1957 roku były demonstrowane licznemu gronu geologów zagranicznych, których zaskoczył fakt, że rzeźba w basenie tworzy się samorzutnie, a nie jest sztucznie modelowana, jak to się zwykle czyni w większości pracowni geomorfologicznych. Duże zaciekawienie wzbudziło również to, że mimo różnicy warunków i skali, w stosunku do realnych sytuacji, szereg procesów rozwija się w sposób podobny, jak przy czole zanikającego lądolodu, a szczególnie na obszarach tzw. „martwego lodu“. Zwrócono uwagę, że analogie te mogą mieć pewną wartość dla interpretacji form pozostawionych przez zlodowacenie czwartorzędowe, a przede wszystkim doskonale uzmysłowić tok zdarzeń, który odbywał się w czasie recesji. Wyrażono również pogląd, że warto byłoby powtórzyć

tego rodzaju doświadczenia na większej powierzchni. Silnie podkreślona została przekonywująca forma dydaktyczna tego rodzaju pokazu.

Z poglądami tymi zgadzam się całkowicie, gdyż eksperymentów morfologicznych nie można traktować jako „powtarzanie tego co się dzieje w przyrodzie“, ale jako metodę obserwowania niektórych procesów zbliżonych do zachodzących w rzeczywistości w warunkach bardziej złożonych i w znacznie dłuższym okresie czasu. Jestem również zdania, że eksperymenty tego rodzaju mają przede wszystkim na uwadze cele dydaktyczne dla słuchaczy, a może i nie mniejsze — dla pracowników naukowych, którzy przy ciągłej obserwacji zmian zachodzących w czasie doświadczenia mogą znaleźć wiele sytuacji analogicznych do tych, z którymi spotykają się na terenie swoich badań. Eksperyment tego rodzaju zachęca ich do szerszego stosowania metod paleogeograficznych, dla których w czwartorzędzie istnieją wyjątkowo szerokie możliwości. Jasne też się staje, że nie konstrukcja jednego obrazu paleogeograficznego, a cała ich seria, unaoczniająca możliwie wszystkie ważniejsze etapy przemian, jest właściwą drogą prowadzącą do prawidłowego wyciągania wniosków.

### Wnioski porównawcze

Wyżej opisanych eksperymentów geomorfologicznych nie można uważać za ściśle powtórzenie procesów dziejących się w rzeczywistości w czasie zanikania lodu. Istniejące różnice skali zjawisk oraz warunków panujących w przyrodzie i w czasie doświadczeń są pod tym względem dostatecznie duże i oczywiste. Jednak mimo tych wszystkich różnic, a może właśnie dzięki nim oraz możliwości wyeliminowania wpływu szeregu zmiennych czynników ubocznych, cały szereg procesów rzeźbotwórczych może być przesledzony w warunkach eksperymentalnych z dosyć dużą dokładnością, we wszystkich etapach ich rozwoju i ze wskazaniem współzależności przyczyn i skutków. Te ostatnie okoliczności są też głównym argumentem przemawiającym za powtarzaniem podobnych eksperymentów przy kolejno zmienionych założeniach.

Na tle obserwacji w czasie eksperymentów nie podobna nie zwrócić uwagi, że wiele procesów morfogenetycznych uzależnionych od obecności lodu, nawet przy całej wielkiej różnicy skali zjawisk, w całym szeregu przypadków odbywa się w sposób podobny jak obecnie na lodowcach w krajach polarnych, lub w czasie zanikania zlodowceń plejstocen-skich. Dlatego też nasuwa się szereg wniosków wiążących spostrzeżenia z doświadczeń z obserwacjami na współczesnych lodowcach polarnych i na ich pozostałościach ze zlodowceń czwartorzędowych.

Obserwacje nad przebiegiem topnienia wskazują, że nie odbywa się ono z jednakową prędkością na powierzchniach ustawionych pionowo

i poziomo. Topienie się powierzchni pionowych lodu z reguły przebiega szybciej niż poziomych (eksperymenty II i III). Jednym z wpływających na to czynników jest niewątpliwie różnica warunków odpływu chłodnych wód topnienia, które spływają szybko z powierzchni pionowych, na poziomych zaś utrzymują się przez czas dłuższy, oddzielając lód od bezpośredniego kontaktu z cieplejszym powietrzem.

Pionowa płaszczyzna lodu nie topi się również z jednakową prędkością na całej swojej wysokości. W górnej jej części postęp topnienia jest szybszy niż w dolnej, tak że w miarę przebiegu tego procesu kąt pochylenia pierwotnie pionowej ściany lodu stopniowo się zmniejsza (eksp. II). Jednocześnie kształt jej z płaskiej zmienia się stopniowo na wypukły o przekroju zbliżonym do parabolicznego (eksp. I, III i IV). Jest to związane z różnicowaniem się temperatur przy ścianie lodowej i dłuższym zatrzymywaniem się ochłodzonych mas powietrza u jej podnóża (eksp. IV) oraz warunkami ściekania wód topnienia.

Pokrycie morenowe i różnice w strukturze lodu również mogą się przyczyniać do zmian szybkości topnienia i mogą przez to powodować znaczne odchylenia w kształcie topniejących brył lodu. Mogą wtedy na przykład powstawać formy zbliżone do „grzybów“ (eksp. I) lub „stołów lodowych“ (eksp. III). Są to jednak zjawiska o małej skali, nie mające większego znaczenia przy kształtowaniu się formy czoła większej masy lodu.

„Znikanie“ lodu odbywa się niemal zawsze poprzez „cofanie się“ bocznych ścian bryły lodowej i stopniowe zmniejszanie się zajmowanej przez nią powierzchni, a nie przez topienie się „od góry“.

Szybkość zmniejszania się powierzchni pokrytej lodem jednakowej grubości, przy mało zmieniających się temperaturach otoczenia, jest zależna przede wszystkim od długości obwodu powierzchni zajętej przez lód, czy też po jego rozdzieleniu się na szereg brył — od sumy ich obwodu (eksp. III).

Długość zewnętrznego obwodu przy topieniu rozpoczynającym się od zwartej masy lodu, w miarę rozwijania się tego procesu i komplikowania się zarysów lodu, stopniowo wzrasta i uzyskuje maksymalne wartości w momencie, gdy rozdziela się on na największą ilość luźno leżących płatów. Od tej chwili długość sumaryczna obwodów powierzchni zajmowanych przez lód ponownie zaczyna maleć.

Rodzaj użytego do doświadczeń lodu nie wpływa w sposób widoczny na przebieg procesów topnienia. Odbywają się one w sposób zbliżony zarówno dla lodu jednorodnego (rzecznego), jak i dla dobrze zmarzniętego lodu „zlepieńcowego“, imitującego lód lodowcowy. Jednak w przypadku, gdy zamrożenie tego ostatniego rodzaju lodu jest zbyt małe, ujawniają się dosyć znaczne różnice i topnieje on o wiele szybciej.

Bardzo istotne znaczenie ma natomiast struktura lodu dla procesów związanych z gliniastym materiałem morenowym. Przy lodzie „zlepieńcowym“ wymarzający z lodu materiał gliniasty uzyskuje konsystencję półpłynnego lub wręcz płynnego „błota morenowego“ (eksp. II). Natomiast przy topieniu się czystego lodu, który pokryty był z wierzchu warstwą gliny lub tłucznia lodowego zmieszanego z gliną i piaskiem, nie powstaje płynne „błoto“, lecz tworzy się plastyczna gęsta masa wysychająca stosunkowo szybko i tworząca na swej górnej powierzchni dosyć zwięzłą suchą skorupę.

Wymarzające z lodu zlepieńcowego płynne gliniaste błoto rozpełza się szeroką strefą przed czołem lodu. Ruch jego ma charakter soliflukcyjny, ale niezależny od zjawisk zamarzania i rozmarzania (kongeliflukcji). W miarę odpełzania od lodu, błoto stopniowo gęstnieje i w ostatecznej formie tworzy płaską równinę pochyloną na zewnątrz od czoła lodu<sup>3</sup>, na której przez pewien czas można rozpoznać ślady poszczególnych składających się na nią potoków błotnych (eksp. II).

Przy gęstym, szybko wysychającym gliniastym materiale morenowym, przy dalszym topieniu podścielającego go lodu, łamie się on na bryły splezające w dół razem z głębiej leżącą masą plastycznej gliny. W niektórych przypadkach grudki tej wysuszonej gliny porwane przez wody bieżące dostają się do osadów fluwioglacjalnych jako toczące żłowe. Czasami (eksp. I) można je potem znaleźć wśród piasków „sandrowych“ jako pojedyncze otoczaki lub nawet jako całe warstewki toczących żłowych.

Stopień nawilgocenia i rozwodnienia gliniastych moren ma istotne znaczenie przy kształtowaniu się z nich późniejszej rzeźby lodowcowej.

Rozwodnienie i spowodowana tym płynna konsystencja materiału powstającego po stopnieniu lodu zlepieńcowego, zawierającego przewagę składników ilastych, daje błotom lodowcowym dużą łatwość splezania i tworzenia powierzchni o małych kątach nachylenia. Im to rozwodnienie trwa dłużej i im bardziej jest utrudniony odpływ nadmiaru wody, tym te powierzchnie stają się bardziej wyrównane. Pozornie powstaje więc paradoks, że w miejscach gdzie wśród materiału gliniastego powierzchnia polodowcowa była najbardziej skomplikowana i odpływ z niej najbardziej utrudniony, dzięki długotrwałemu utrzymywaniu się dużego nawilgocenia gruntu, podsyconego najpierw dopływem wód topnienia, a po stopnieniu się lodu — przez wody opadowe, tam w ostatecznej konsekwencji istnieją największe szanse na powstanie płaskiej równiny zbudowanej z gliniastej moreny.

<sup>3</sup> Podobnego rodzaju powierzchnię i to dosyć znacznych wymiarów autor miał możność obserwować w 1934 r. przed czołem lodowca Finsterwaldera na Spitsbergenie Zachodnim.

Jeśli natomiast stopienie się lodu poprzedza okres klimatu suchego, z dużą zdolnością parowania i z małą ilością opadów w okresie rozmarznięcia gruntu, to wyżej położone partie tych glin wysychają stosunkowo szybko. Stają się one wtedy zwarte, a nawet „skamieniałe” i przy dalszym obniżaniu się powierzchni topniejącego lodu mogą tworzyć wznoszące się ponad nią ostro zarysowane formy rzeźby o charakterze „turni” lub „piramid” gliniastych<sup>4</sup> (eksp. IV). W niektórych szczególnych przypadkach podobne formy mogą przez pewien czas istnieć nawet w piaskach stosunkowo słabo gliniastych (eksp. I).

Obserwacje nad zachowaniem się gliniastych powierzchni morenowych nasuwają wniosek, że różnicowanie się gliniastego zaplecza moren czołowych jest związane nie tylko z ukształtowaniem lodu, ale i z klimatem, w którym formowała się odpowiednia część jego powierzchni. Sądzę, że strefy pagórkowatej gliny zwałowej leżące zwykle blisko za pasem moren czołowych, tworzyły się jeszcze w warunkach klimatów stosunkowo suchych. Natomiast powierzchnie płaskich równin z gliny zwałowej, zajmujące obszary dalej od moren, formowały się już w okresach z obfitszymi opadami letnimi, które pozwalały na dłuższe utrzymanie półpłynnej lub choćby plastycznej konsystencji glin, umożliwiając im spełzanie do obniżen i prawie pełne ich wyrównanie.

Różnicowanie się materiału morenowego na bardziej gruboziarnisty i gliniasty, niezależnie od pierwotnego składu materiału dostarczanego ze zboczy i pobieranego przez lodowiec z podłoża, zależne jest w dużym stopniu od ukształtowania powierzchni lodu i jego części czołowej. Układ tych powierzchni ma decydujące znaczenie na stopień przepłukania moren w czasie ich gromadzenia się. Odbywający się wtedy proces jest jakby pośredni w stosunku do tych zjawisk, które przy większym nasileniu doprowadzają do powstania właściwych osadów fluwioglacjalnych.

Przepłukiwanie materiału morenowego odbywa się głównie w brzeżnej części lodowca oraz przy jego czole. Gliniasty materiał morenowy przy topnieniu lodu podlega różnym rodzajom spełzania (soliflukcji) po powierzchniach stosunkowo mało pochyłonych, natomiast gruboziarnisty gromadzi się w wyniku staczania się po bardziej stromych powierzchniach lub wręcz przez spadanie z urwistych krawędzi lodu. W tym ostatnim przypadku wysegregowuje się najgrubszy materiał glazowo-zwirowy, składniki zaś ilaste moren mogą być prawie całkowicie wymyte.

Formy rzeźby polodowcowej usypane z gruboziarnistego materiału morenowego ulegają znacznie mniejszym wtórnym przekształceniom i dzięki temu są trwalsze niż te, które były utworzone z materiału gliniastego.

<sup>4</sup> Analogiczne formy obserwował autor na lodowcu Pencka i w strefie martwego lodu przed czołem lodowca Nathorsta na Spitsbergenia.



Jest rzeczą prawdopodobną, że na urozmaiconej morfologicznie powierzchni zamierającego lodowca, podobnie jak na lodzie w czasie doświadczeń, w lecie panuje dosyć znaczne zróżnicowanie mikroklimatyczne. W obniżeniach leży powietrze chłodne i wilgotne, na wyniosłościach zaś jest ono suchsze i cieplejsze oraz bardziej zależne od ogólnych zmian pogody (eksp. IV). Fakt ten ma dosyć istotne znaczenie morfologiczne dla rzeźby morenowej we wczesnych stadiach jej tworzenia się z materiału świeżo wymarzającego z lodu. Na wyżej położonych powierzchniach mogą wtedy powstawać formy bardziej ostro zarysowane, a nawet „kanciaste“ związane z materiałem wysychającym i wietrzeniem mechanicznym, w stale chłodnych zaś i wilgotnych obniżeniach tworzą się formy obłe i półpłynne kształtowane przez rozmywanie i soliflukcję (eksp. I i IV) <sup>5</sup>.

Zależność między kątami pochylenia powierzchni lodu i składem tworzących się moren najwyraźniej występuje w czasie doświadczeń przy krawędzi lodu, której kształt ulega kolejnym zmianom, analogicznym jak na martwym czole lodowca. Daje się wtedy zaobserwować cztery główne fazy przeobrażeń jego kształtu: czoło strome lub przewieszane, pochyłe, przysypane i zagrzebane (eksp. III i IV). W zależności od kształtu profilu czoła zmienia się mechanizm akumulacji czołowo-morenowej i skład moren.

W pierwszym etapie formowania się moren, gdy czoło lodu jest przewieszane lub tworzy pionową ścianę i ma przed sobą zupełnie czyste przedpole, syplący się przed nim materiał zwałowy nie daje wyraźnych wałów morenowych ani większych wzgórz. Rozsypuje się on w dosyć szerokiej strefie w postaci zupełnie płaskiego stożka z nielicznymi drobnymi nabrzmieniami. Jest to związane z dużym i jednocześnie równomiernym przemywaniem całego materiału morenowego spadającego z lodu oraz szerokim jego rozrzutem na wyrównaną powierzchnię przedpola. U podnóża lodu gromadzi się tylko najgrubszy materiał głazowy i żwirowy. Materiał drobnoziarnisty wynoszony jest poza granice tej strefy glazowo-żwirowej i tworzy przed nią przedłużenie w postaci płaskiej piaszczystej powierzchni sandrowej. Dopiero po jakimś czasie (w doświadczeniach zwykle dopiero po 2-3 dniach) procesy akumulacyjne koncentrują się bardziej przy samym czole lodu i prowadzą do powstania bardziej wydatnych form morenowych.

Przy stromym czole tworzenie się moren odbywa się głównie drogą staczania się i zsypywania z krawędzi lodu głazów i żwiru lub spadania

---

<sup>5</sup> Typowym przykładem tego rodzaju stosunków morfologicznych jest tzw. „leirhuwa“ („głowy mułowe“ — według określenia łowców norweskich) w strefie martwego lodu przed czołem lodowca Nathorsta w głębi fiordu Van Keulena na Spitsbergenie.

niewielkich partii żwirowo-gliniastych dających razem dosyć regularne, ale niezbyt wysokie wały złożone głównie z materiału gruboziarnistego.

Wzdłuż poprzecznych obniżień w stromym zboczach lodowym spełza słabiej przepłukany gliniasto-żwirowy materiał morenowy, tworzący u podnóża lodu pewnego rodzaju stożki „napływowo-zsuwowe“ o znacznym kącie pochylenia (powyżej  $30^\circ$ ), które swoją górną częścią opierają się o ścianę lodową. Po stopieniu się ściany lodowej stożki te zapadają się „wstecz“ tworząc pagórkowate nabrzmienia nadsypane ponad właściwym wałem morenowym. Wysokość tych pagórków jest o wiele mniejsza i nie wynosi więcej niż czwarta część pierwotnej wysokości stożków (eksp. III).

Przy pochylonym czole lodu moreny formują się głównie ze spływów zsuwających się co jakiś czas po lodzie. Składają się one przede wszystkim z materiału żwirowo-gliniastego. W warunkach tych nie powstaje prawidłowy wał morenowy, ale łańcuch zrastających się ze sobą nieregularnych pagórków złożonych z utworów bardziej gliniastych niż przy stromym czole (eksp. II i IV).

Czoło lodu silnie pochylone i przysypane morenami daje rzeźbę morenową jeszcze bardziej nieregularną i bezładnie rozrzuconą, a materiał budujący te formy jest słabiej rozsortowany niż w poprzednim przypadku (eksp. IV).

Czoło zagrzebane, z trudem rozpoznawalne wśród produktów nagromadzonych przez poprzednią akumulację, już nie daje form takiego typu, który mógłby być zakwalifikowany jako właściwa morena czołowa. Powstaje wtedy masa chaotycznie rozrzuconych pagórków żwirowo-gliniastych, wśród których występują liczne zagłębienia bezodpływowe po wytopionych residualnych bryłach martwego lodu. Typ tej rzeźby zbliża się do pagórkowatych powierzchni określanych ogólnie jako „strefy akumulacji czołowo-morenowej“ lub niekiedy zaliczanych do form po „martwym lodzie“.

Szczególnym, ale nie wyjątkowym przypadkiem formy tworzącej się przy „cofaniu się“ czoła lodu jest powstawanie zamiast wału morenowego — obniżenia, które chętnie nazwałbym „fosą morenową“. Związane to jest z momentami, kiedy leżąca w pobliżu czoła powierzchnia lodu uwolniła się od pokrywy morenowej, która w znacznej części zsunęła się „naprzód“ na wał już usypanej moreny czołowej. W tej sytuacji lód oczyszczony z moren „cofa się“, przez pewien czas nie sypiąc form morenowych lub dając przed swoim czołem tylko nikłą akumulację, co w wyniku prowadzi do powstania obniżenia i utworzenia się na tyłach poprzednio usypanych moren zbocza pochylonego ku frontowi lodu (eksp. II, dzień 5), a nawet w niektórych przypadkach wręcz stromej krawędzi (eksp. III, dzień 3).

Po stopieniu się ogołoconej z moren powierzchniowych części lodu i zbliżenia się czoła do części przysypanej materiałem morenowym, proces akumulacji czołowo-morenowej wzmagą się ponownie i zaczyna powstawać nowy wał (lub szereg pagórków morenowych), oddzielonych od poprzedniego nieregularnym podłużnym obniżeniem przypominającym fosę między dwoma wałami fortecznymi. Przy obserwacji pełnego procesu tworzenia się „moren czołowych“ w czasie doświadczeń widać wyraźnie, że powstają one w wyniku wielokrotnych i różnorodnych w swoim charakterze aktów sypania i spełzania materiału morenowego. Formy morenowe w ich ostatecznym kształcie widocznym po stopieniu lodu są silnie zmienione w stosunku do tych, które powstały wtedy, gdy istniało ich lodowe zaplecze. Zmieniają się nie tylko kąty pochylenia stoków, lecz nawet i ich kierunki. Znaczna część materiału, szczególnie w górnej części wyniosłości, ulega jeszcze później licznym i dosyć znacznym przemieszczeniom. Między innymi powstają duże zsuwy, często bardzo zmieniające wcześniej uformowaną rzeźbę polodowcową. Duże znaczenie na kształtowanie się powierzchni przy tych końcowych procesach ma skład granulometryczny materiału, z którego były one pierwotnie usypane i stopień jego podatności do udziału w późniejszych przeobrażeniach i ostatecznych procesach soliflukcyjnych. Nagromadzenia żwirowo-głazowe, które w ostatecznym wyniku tworzą większość kulminacji, znalazły się tam głównie na skutek swej odporności na te procesy, a bynajmniej nie dlatego, że pierwotnie zajmowały takie położenie.

Obserwacje nad ruchami głazów umieszczonych na lodzie wykazują, że nawet wtedy, gdy masa lodu jest nieruchoma, ulegają one dużym przemieszczeniom. Są to kolejno ruchy zsuwania się i ześlizgiwania po powierzchni lodu, staczania się czy wręcz spadania z jego krawędzi, ruchy w obrębie usypanej przed czołem moreny i wreszcie transport wodny, o ile dochodzi do przemycia materiału morenowego i porwania jego składników przez wody bieżące.

Nie wszystkie rodzaje wymienionych ruchów musi przejść każdy głaz. Jednak kolejność następujących po sobie ruchów w ogromnej większości przypadków będzie zachowana taka, jak wymieniona wyżej, chociaż poszczególne ich etapy mogą być opuszczone lub głaz może być wcześniej unieruchomiony.

Przesuwanie się głazów nie zawsze jest zgodne z kierunkiem ruchu lodu. Konfiguracja powierzchni lodu może spowodować ruchy materiału morenowego również i w kierunkach przeciwnych. Występują one szczególnie wyraźnie w okresie rozdzielania się lodu na pojedyncze bryły. Jest to jednocześnie moment, kiedy rozpoczynają się tworzyć najliczniejsze zagłębienia bezodpływowe.

Powstawanie tych zagłębień w strefie morenowej nie zawsze musi być związane z wytapianiem się zagrzebanych brył lodu. W większości przypadków jest ono wynikiem zsuwania się na boki wyniosłości, którą tworzy lód, wymarzającego z niego materiału i usypywania go na zewnątrz od miejsca, gdzie leży topniejąca bryła. Przeważająca część tego materiału zsuwa się z lodu w początkowych fazach jego topnienia, dając jego nadmiar na jej peryferiach i stwarzając niedobór tam, gdzie jeszcze leży lód. Przy dalszym topnieniu i zmniejszaniu się wymiarów bryły lodowej ilość gromadzącego się u jej podnóża piasku i żwiru coraz bardziej maleje i ostatecznie w miejscu, gdzie najdłużej leżał lód, pozostaje wklęsłe zagłębienie bezodpływowe wysłane cienką warstwą drobnoziarnistą (eksp. I, III, IV). W zakłębłości tego rodzaju często tworzy się jezioro dające na dnie obniżenia osad ilasty lub mułkowaty. W niektórych szczególnych przypadkach może nawet dojść do utworzenia się zagłębień podwójnie wklęsłych (eksp. III, fig. 19, 20).

Zagłębienia bezodpływowe utworzone w sposób wyżej opisany są specjalnie liczne wśród moren piaszczysto-żwirowych, występują one jednak i w materiale gliniastym, w którym oprócz tego często są obniżenia powstałe po stopnieniu zagrzebanych wśród moren brył lodu, mające kształt lejkowatych zakłębnięć. Istnieje również cały szereg form pośrednich między zagłębieniami obu wymienionych wyżej rodzajów.

W sumie wśród zagłębień bezodpływowych na powierzchni akumulacji morenowej trzeba wyróżnić trzy główne typy genetyczne: misy po bryłach martwego lodu uwalnianych z pokrywy morenowej drogą zsypania jej na zewnątrz, zakłębnięcia po wytopionych zagrzebanych bryłach lodu oraz zagłębienia powstałe między nasypami wałów i pagórków morenowych tworzących się drogą „zsypania” z czoła lodu.

„Zagłębienia międzysypowe” występują głównie w strefach dobrze wyrażonych moren czołowych; „misy po bryłach lodu” uwalniających się z pokrywy morenowej są najliczniejsze w szerokim pasie zaplecza czołowo-morenowego, „zakłębnięcia wytopiskowe” zaś dominują na obszarach równin morenowych.

Formy pierwszego i trzeciego z wymienionych wyżej rodzajów są na ogół niezbyt dużych wymiarów; natomiast misy po odsłaniających się bryłach lodu dają często rozległe płaskie niecki predysponujące miejsca na przyszłe jeziora. Długość czasu istnienia tych jezior jest jednak zwykle niezbyt wielka, gdyż prawie z reguły są to zbiorniki płytkie, szybko wypełniane przez akumulację i dosyć wczesnie włączane w obszary objęte siecią uregulowanego odpływu powierzchniowego. Cykl rozwoju pojezierzy polodowcowych na tle obserwacji w czasie doświadczeń (eksp. III i IV) można rozdzielić na sześć głównych faz przemian: pojezierza „topnienio-

wego", „zamkniętego", „przelewowego", „przelewowo-przepływowego", „przepływowego" i spłynięcia jezior.

W pierwszej z tych faz, jeziora tworzą się jeszcze w okresie istnienia lodu i ściśle są związane z procesami topnienia i formowania się powierzchni polodowcowej, które decydują o powstaniu mis jeziornych, zasilaniu ich w wodę i drogach jej odpływu. Są to przeważnie jeziora bezodpływowe lub ze słabym odpływem powierzchniowym, które występują zwykle w strefie morenowej w niezbyt dużej odległości od czoła lodu. Czas istnienia ich jest stosunkowo krótki, gdyż z chwilą zmiany dróg dopływu wód topnienia wysychają one szybko, zostawiając suche puste misy wysłane drobnopłynnym osadem. Po całkowitym zniknięciu lodu jeziora te istnieją jeszcze przez pewien czas w pobliżu miejsc, gdzie najdłużej leżał lód, po czym spotyka je ten sam los, co inne zbiorniki, które powstały we wcześniejszych fazach recesji i zostawiły po sobie osuszone misy.

Ponownie odżywają jeziora z chwilą wzrostu ilości opadów i wypełnienia się mis bezodpływowych wodą deszczową. Jeśli taki okres przychodzi dostatecznie wcześnie, to zbiorniki nie wysychają całkowicie i w istnieniu jeziora zachowana jest ciągłość, a w jego historii zaznacza się tylko okres podniesienia poziomu wody.

Rozkład jezior jest teraz zupełnie odmienny niż poprzednio. Nie tworzą one w tej fazie aureoli przesuwej się za cofającym się lodem, ale są rozrzucone w obrębie całej strefy morenowej. O ich utworzeniu się decyduje ukształtowanie terenu i stopień uszczelnienia dna zakleszczenia, które one wypełniają. Zagłębienia, które nie spełniają tego ostatniego warunku, pozostają nadal suche.

Zlewnie jezior tej fazy są słabo rozwinięte, wypełnienie zagłębień niepełne, przelewy między jeziorami rzadkie, erozja słaba, lepiej rozwiniętych dolin rzek lub potoków brak. Zasadniczych zmian w krajobrazie, poza pojawieniem się jezior, nie ma.

Dopiero znaczne wzmocnienie się ilości opadów daje inicjatywę do tworzenia się liczniejszych przelewów i energiczniejszego rozwoju erozji. Najaktywniej zmiany wprowadza dopływ wód z zaplecza, który szybko powoduje przepelnienie się napotkanych na swojej drodze mis jeziornych i szerokie wykorzystanie wszystkich możliwych dróg przelewów. Nierzadko w tym okresie odpływ z jednego jeziora idzie różnymi drogami i w różnych kierunkach. Jest to okres największej „inicjatywy" wód w szukaniu sobie dróg odpływu. Ostateczny wybór głównej drogi odpływu nie jest dla wód tak łatwy, jakby się mogło wydawać patrząc tylko na ukształtowanie powierzchni. Poziomy wód w poszczególnych jeziorach są w tym czasie bardzo różne. W związku z tym położenie lokalnych baz erozji

również jest zróżnicowane. Długości dróg, którymi idą przelewy do sąsiednich jezior, są niejednakowe. Spadki w poszczególnych dolinach mają różne wartości i często są bardzo zróżnicowane. Na jednych drogach strumienie tracą część swoich wód przez wsiąkanie, na innych — straty te są znikome. Skład brzegów i dna łóżysk potoków, a tym samym i szybkość ich rozmywania są różne. O wyniku współzawodnictwa między poszczególnymi strumieniami przelewu decyduje ostatecznie postęp erozji wgłębnej, zależnej przede wszystkim od składu podłoża, wielkości spadku dna dolin i położenia lokalnych baz erozyjnych. Decydujące znaczenie wśród tych czynników ma skład podłoża i stopień jego podatności na rozmywanie. Szczególnie ważne jest rozmieszczenie progów i ławic gładzowych, które wśród moren stanowią dla erozji jedną z najtrudniejszych do pokonania przeszkód. Zwycięstwo ostateczne w przekładaniu sobie drogi wśród moren odnosi ten kierunek przelewu, wzdłuż którego podłoża jest piaszczyste i na którym najmniej jest gładzów, a nie ten, który ma większy spadek. Pewne znaczenie w tym wyborze dróg odpływu ma również poprzedni układ sieci odwodnienia sprzed czoła lodu. Rola jego jest większa w strefie brzeżnej moren, a mniejsza w ich głębi, gdzie układ powierzchni jest bardziej złożony, spadki wzdłuż odpływów fluwioglacjalnych mniejsze i gdzie czynnikiem decydującym staje się skład podłoża na linii nowoformującej się doliny.

Całe opisane wyżej stadium pojezierza „przelewowego“ charakteryzują duże różnice poziomu wód w jeziorach, oddzielonych od siebie wysokimi progami, z odpływami skierowanymi w różne strony. Zupełnie jeszcze brak wyraźnie zarysowującego się przyszłego układu sieci rzecznej i lepiej wypracowanych dolin z tarasami na ich stokach.

Po pogłębieniu łóżysk strumieni na najłatwiej dających się przeciąć ryglach dzielących jeziora, niektóre kierunki przelewów uzyskują zdecydowaną przewagę nad innymi, na których proces ten rozwijał się powolniej. Różnice wysokości poziomu wód w jeziorach maleją, łączące je drogi przepływów uzyskują cechy dolin przełomowych. Istnieją jeszcze przelewy przez progi morenowe, ale zarysowuje się już kierunek definitywnego stałego przepływu. W miejscach, gdzie do jezior wpadają dopływy, zaczynają narastać stożki napływowe delt (eksp. III, fig. 23).

Stadium to nazywam „przelewowo-przepływowym“, aby podkreślić jego wybitnie przejściowy charakter. Trwa ono względnie krótko i prowadzi do rozwoju następnego, w którym zanika poprzedni przelewowy charakter odpływu wód z jezior, a zaczyna się ustalać konsekwentny jednokierunkowy przepływ. Rygle dzielące jeziora, które znalazły się na drodze formującego się przepływu, są już w znacznym stopniu przepięłowane i stały się odcinkami wyraźnie zarysowującej się rzeki. Znikł „schodowy“ charakter układu odpływu. Profile podłużne wyrównały się nieco i nie

mają już gwałtownych zwiększeń spadku jak w poprzednich stadiach, choć wyraźnie jeszcze występuje na nich szereg załamań i nierówności. Jeziora, przez które idzie teraz przepływ, mają charakter przegłębień na linii odpływu, a ich powierzchnie odpowiadają spłaszczeniom w profilu podłużnym przepływających przez nie rzek (eksp. III, fig. 25).

W sąsiedztwie jezior widać stare porzucone łożyska dawnych przelewów, nierzadko w formie zawieszonych dolinek skierowanych ku innym jeziorom. Na brzegach nowoformującej się głównej doliny pojawiają się pierwsze tarasy znaczące poprzedni wyższy poziom jezior oraz etapy przecinania dzielących je rygli.

Poza strefą objętą formującą się doliną przeplywową istnieje szereg suchych zagłębień bezodpływowych i izolowanych jezior. Poziom wody w jeziorach, które znalazły się teraz w tej sytuacji, a poprzednio otrzymywały dopływ z przelewu z sąsiednich jezior, wyraźnie się obniżył. Rozwój procesów rzeźbotwórczych w całej tej strefie, która znalazła się teraz na „wyżynie“, wyniesiony ponad dno szybko pogłębiających się dolin, wyraźnie osłabł i stał się bardzo powolny. W dolinach natomiast wartko płynie proces dalszych przemian prowadzących do wyrównania profilu podłużnego. Odbywa się on w wyniku dwóch procesów idących w przeciwnych do siebie kierunkach. Przy wypływach z jezior w górę rzeki postępuje erozja wsteczna rozcinająca progi zamykające niecki przegłębień jeziornych, a przy ujściu rzeki do jezior zasypują je stożki napływowe, których strome podwodne czoła nieustannie posuwają się w dół z biegiem rzek.

Oba te procesy łącznie prowadzą do zupełnej likwidacji jezior przepływowych, czy to przez przepiłowanie rygli poniżej poziomu dna jezior i ich spłynięcie, czy też przez stopniowe zaakumulowanie górnych części niecek jeziornych i spotkanie się czoła stożków napływowych z erozją idącą od dołu.

Zbliżywszy się do świeżo usypanych stożków napływowych złożonych z drobnoziarnistych piasków, których górne powierzchnie były bliskie do poprzedniego poziomu jezior, posuwająca się od strony rygla erozja wsteczna przecina je w szybkim tempie. Ostatecznie formuje się w pełni rozwinięta dolina normalnej rzeki o spadku rozłożonym na całą jej długość, bez „spłaszczeń“, które dawały jeziora.

Cykl jeziorny na linii głównego przepływu został zakończony. Pozostaje teraz likwidacja jezior znajdujących się na „wyżynie“, którą w podobny sposób przeprowadzają boczne dopływy lub które znikają na skutek wypełnienia ich zagłębień przez osady znoszone z otoczenia, gromadzenia się osadów organogenicznych i przez zarastanie.

Dalsza historia rozwoju rzeźby polodowcowej związana jest z pogłębianiem się doliny, tworzeniem się tarasów zależnie od zmian prze-

plywu i położenia bazy erozyjnej oraz z rozbudową sieci odpływu powierzchniowego na całą powierzchnię terenu.

Wpływ lodowców na kształtowanie się stosunków klimatycznych rozważany był w wielu pracach specjalnie poświęconych temu zagadnieniu. Na ogół przypisuje się mu dosyć duże znaczenie.

„Klimatyczny“ wpływ lodu na otoczenie zaznaczył się również zdumiewająco wyraźnie na profilach termicznych z pierwszych dni ostatniego z wyżej opisanych eksperymentów. Sądę jednak, że mimo wszystko roli tego wpływu nie należy zbyt przeceniać i podnosić zbyt wysoko w randze zjawisk klimatycznych, gdyż dotyczy on stosunkowo cienkiej, przyziemnej warstwy powietrza.

Lodowce są objawem określonych właściwości „klimatu wielkiego“, przez swoje zaś istnienie wnoszą one z kolei szereg dalszych zmian, ale już zmian o znaczeniu lokalnym. Tym samym rola ich jest wtórna i już chociażby przez to samo ma bardziej ograniczone rozmiary. Formowanie się właściwych opinii pod tym względem jest doskonale widoczne, między innymi, na rozwoju poglądów na „peryglacjał“, który zrodził się w koncepcji Łozińskiego jako skutek wpływów klimatycznych lodowca na jego przedpole, a dziś już powszechnie jest rozumiany jako objaw istnienia klimatów chłodnych, związanych z głębokim przemarzaniem, ale bynajmniej nie koniecznie z obecnością lodowców.

Na tle obserwacji w czasie eksperymentów trudno nie spostrzec, że niezależnie od warunków termicznych otoczenia, topniejący lód nawet w niewielkiej ilości stwarza dookoła siebie specyficznie lokalne warunki klimatyczne (ochłodzenie się i wzrost wilgotności), w zasadzie niewiele różniące się od lata polarnego. Zjawisko to trzeba przypisać konsekwencjom dużego ciepła utajonego zużywanego na stopienie lodu.

W związku z tym nasuwa się wniosek, że przy postępie ocieplenia, które powoduje zanikanie zlodowacenia, masy pozostawionego przez nie „martwego lodu“ w swoim bezpośrednim sąsiedztwie jeszcze przez dosyć długi okres czasu zachowują „własny“ klimat. Równocześnie jednak tam, gdzie lodu już nie ma czy też gdzie został on przykryty dostatecznie grubą warstwą moren, wpływ jego wydatnie maleje lub wręcz znika, a lokalne warunki termiczne i wilgotnościowe kształtują się odmiennie.

W konsekwencji w otoczeniu topniejących brył lodu istnieje dosyć znaczne zróżnicowanie klimatyczne. Charakteryzuje się ono istnieniem licznych plam chłodnych i bardziej wilgotnych w pobliżu lodu, częstymi zastoiskami zimnego powietrza w zagłębieniach i obniżeniach zarówno wśród moren jak i na sandrze oraz ociepleniami i osuszeniami tam, gdzie nie sięga już bezpośrednio ochładzające działanie lodu, a woda pochodząca z jego topnienia nie zwilża powierzchni gruntu. Wpływ lodu sprowadza się



więc w tym okresie do roli czynnika wzmagającego lokalne zróżnicowania klimatyczne.

W miarę topnienia lodu zróżnicowanie to stopniowo maleje i jego zmiany są jedną z charakterystycznych cech przeobrażeń klimatycznych w czasie tzw. „recesji“.

Pewien pogląd na przebieg tych zmian dały obserwacje w czasie doświadczeń. Sądzę, że dające się wyróżnić w czasie eksperymentów cztery fazy zmian klimatycznych w dużym stopniu będą analogiczne do tego, co się dzieje w czasie szybkiej recesji zlodowacenia.

W pierwszym okresie zaznacza się dominujący wpływ bezpośredniego ochładzającego działania lodu, wyrażający się istnieniem ponad jego odsłoniętymi ścianami względnie grubej warstwy zimnego powietrza oraz dużym zróżnicowaniem mikroklimatycznym i występowaniem wielu lokalnych inwersji temperatur w obniżeniach.

W drugim okresie przeważa ochładzające działanie wód topnienia. Bezpośrednia ozębniąca rola lodu maleje. Układ różnic mikroklimatycznych ulega zmianie. Grubość warstwy zimnego powietrza znacznie zmniejsza się. Na sandrze pod wpływem wód topnienia występują większe ochłodzenia niż na lodzie, już w dużym stopniu pokrytym warstwą moren.

W trzecim okresie lokalnie różnice mikroklimatyczne, spowodowane ochładzającym działaniem lodu i wód topnienia, wydatnie maleją. W czwartym okresie występuje prawie zupełne ich wyrównanie, jednak jeszcze z zachowaniem dosyć znacznych różnic w stopniu nawilgocenia gruntu.

Dalsze zmiany cechuje ogólne osuszenie i zanik różnic wilgotności gruntu powodowanych topnieniem martwego lodu i zmarzliny. Zakłócenia wynikające z istnienia retencji, w jakiegokolwiek postaci lodu, znikają całkowicie. Ustala się nowy, normalny dla strefy umiarkowanej, układ stosunków z jego zwykłym zróżnicowaniem mikroklimatycznym i różnicami wilgotności gruntu zależnymi od reżimu deszczowego, parowania i stopnia rozwoju sieci odpływu powierzchniowego.

Z obserwacji w czasie eksperymentów nasuwają się jeszcze wnioski co do długości trwania poszczególnych okresów zmian klimatu lokalnego w czasie topnienia lodu. Można przypuszczać, że najdłuższy jest okres pierwszy, następne zaś okresy są kolejno coraz krótsze. Wydaje się to logiczne, bo ilość lodu, głównego czynnika powodującego zakłócenia termiczne i wilgotnościowe, stopniowo się zmniejsza, a tym samym zakres i czas działania jego wpływu powinny stopniowo maleć.

Z zagadnień klimatycznych wiążących się z wynikami doświadczeń, warto może jeszcze zwrócić uwagę, że były one robione przy różnych temperaturach otoczenia. W pierwszych dwóch przypadkach temperatura powietrza w pomieszczeniu doświadczalnym wynosiła 4-6°C, w obu na-

stępnych natomiast wahała się ona między 12-15°C. W pierwszym przypadku była więc ona zbliżona do lata polarnego, w drugim zaś do temperatur panujących w strefie umiarkowanej. Jednak różnice te nie wpłynęły w sposób dający się zauważyć na przebieg obserwowanych procesów rzeźbotwórczych. Jest to zdaje się wynikiem wspomnianego wyżej faktu, że lód w swoim otoczeniu stwarza dookoła siebie swój „własny” klimat lokalny, który w tych przedziałach temperatur nie wykazuje jeszcze zbyt dużych różnic. Możliwe, że przy wyższych temperaturach pomieszczenia zaczęły się one akcentować wyraźniej. W każdym razie zdaje się nie ulegać wątpliwości że same temperatury powietrza, które w czasie recesji zlodowaceń na Niżu Środkowo-Europejskim może mogły już zbliżać się w czasie lata do temperatur zanotowanych w drugiej grupie doświadczeń, nie wpływały w sposób istotny na przebieg procesów rzeźbotwórczych. Z tego punktu widzenia możliwość stosowania metody porównawczej z lodowcami w krajach polarnych, jak się zdaje, nie powinna nastrożać zbyt wielu wątpliwości. Natomiast jeśli różnice w przebiegu tych procesów istnieją, to są one przede wszystkim rezultatem różnic w stosunkach solarnych i wynikających z nich różnic charakteru rytmu, w którym przebiegają: długiego rocznego rytmu poza kołem podbiegunowym (dzień i noc polarna) i krótkookresowych zmian dobowych w średnich szerokościach geograficznych.

Praca niniejsza miała głównie na celu zaprezentowanie wyników dotyczących prób eksperymentalnego powtórzenia procesów zbliżonych do formujących rzeźbę polodowcową.

Wyniki doświadczeń wyszły jednak dalej, niż się tego pierwotnie spodziewałem i nasuwają szereg uwag natury ogólnej, wiążących się z poglądami na mechanizm tworzenia się niektórych form rzeźby poglacialnej oraz historią końcowych faz zlodowaceń.

W pracy tej nie chcę szeroko rozwijać tych poglądów ani podejmować dyskusji z innymi wypowiedziami na te tematy. Przekroczyłoby to znacznie ramy zakreślone dla tego artykułu. Mam to zresztą zamiar zrobić przy innej okazji nawiązując ściślej do spostrzeżeń poczynionych bezpośrednio na lodowcach. Obecnie jednak, podsumowując wyniki opisywanych wyżej doświadczeń, trudno zostawić szereg kwestii niedopowiedzianych. Dlatego przynajmniej na pewnych odcinkach wyprzedzam pracę wyżej wspomnianą i wstępnie formułuję niektóre poglądy, jakie nasuwają się w związku z obserwacjami poczynionymi w czasie eksperymentów, nawiązując do problematyki geologii czwartorzędu.

С. В. РУЖИЦКИ

**ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ КАК ПОПЫТКА  
ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ  
ЛЕДНИКОВОГО РЕЛЬЕФА**

(Резюме)

Выяснение механизма возникновения ледникового рельефа сопряжено с большими трудностями, вытекающими из того, что наблюдения над краем ледников можно вести только изредка, а существующие уже формы приходится объяснять по прошествии долгого периода после таяния льда.

Во время работ, проведенных автором в полярных странах, возникнул замысел воспроизведения некоторых процессов в лабораторных условиях таким образом, чтобы можно было следить их непрерывно в течение сравнительно короткого времени.

Эксперимент, проведенный в погребе в температуре 4-6 и 12-16°C, был повторен автором несколько раз.

Из глыб льда и материала, аналогического с моренным, был построен участок „края ледника”, перед которым было оставлено плоское пространство непокрытое льдом. По мере таяния ледника начали появляться истоки талых вод из под льда и формироваться „сандры” и „конечные морены”. Наблюдались также явления эвросии. В дальнейших фазах возник ряд конечных морен очередных фаз отступления ледника и холмистый моренный рельеф с небольшими застойными и межморенными озёрами. Во время одного из экспериментов перед „ледником” возникли большие застойные озера, в которых образовались отложения по типу схожие с ленточными глинами.

В конечной фазе эксперимента извне была пущена струя воды, мощность которой регулировалась. Сначала образовались бессточные озера, затем начала формироваться сеть стока с главной долиной в которой образовался ряд террас.

Весь эксперимент продолжался 2-3 месяца, в течение которых был сделан ряд планов и фотоснимков иллюстрирующих очередные этапы изменений возникающего рельефа (фиг. 1-37, пл. I-XX).

После окончания эксперимента, во время раскапывания „территории” в „обнажениях” была видна слоистость и изменчивость отложений, которые можно было связать с наблюдавшимися раньше на поверхности этапами перемен.

Проведенные до настоящего времени эксперименты были пробными, однако полученные благодаря им данные позволяют высказать ряд взглядов на процессы, происходившие во время таяния льда.

Этим путем накапливается материал, который позволяет объяснить ряд аналогичных процессов образования гляциального рельефа, условий возникновения морен и хода гидрологических и климатических явлений.

До сих пор проводились эксперименты над „мертвым” льдом. В настоящее время ведутся приготовления к эксперименту с „ледником” находящимся в движении.

S. Z. RÓŻYCKI

AN EXPERIMENT IN GEOMORPHOLOGY RECONSTRUCTING  
THE FORMATION OF GLACIAL RELIEF

(Summary)

**ABSTRACT:** Attempts have been undertaken and are here reported of artificial reconstruction of glacial morphology. During the experiment, specially prepared ice-blocks were subjected to melting in a cellar. The relief forms obtained as a result are comparable with forms of glacial morphology recently noted in Spitsbergen and in Northern Poland. The reported experiments provide interpretations for many relief details whose formation *in statu nascendi*, it has not, thus far, been possible to observe.

An interpretation of the mechanism acting in the formation of glacial relief presents difficulties owing to the cursory observations that are feasible at the terminus of glaciers, while observations of the existing sculpture forms are usually made long after the melting of ice.

During his field work in polar regions the present writer has reached certain conclusions as to the necessity for greater continuity and promptness of observation in respect to these processes which would enable the field worker to draw more immediate inferences.

The tradition of experimental geology, handed down from the time of Daubrée, suggests to fill up gaps in the knowledge of the above mentioned problem by way of laboratory experiments. The present writer was moreover prompted to this experimenting by observations made during his research work in polar regions on the melting of gravel covered blocks on the shores of the Van Keulen and Belsud Fiords (Spitsbergen). These observations have confirmed that the process of melting there shows many analogies with the events taking place on the neighbouring glaciers.

Experiments of this kind have been undertaken during the years 1950, 1951, 1956 and 1957 and it is the writer's intention here to report some of the obtained results.

Photographs (pl. I—XX) taken in the course of that work will give a general insight into the landscape formed in the experimental reservoir. It is thought that their resemblance to glacial landscape is sufficient to justify the names of "glacier" and "moraines" used in the present paper, while the annexed sketch maps may be considered as illustrations of the development of glacial relief.

The following is an interpretation of a series of these sketch maps plotted during the 1956 experimenting.

Map 1 (fig. 9) shows the glacier as seen in the first day of the experiment. We can note there an ice block with a local culmination, already cut off from the bulk of the glacier but still displaying a conspicuously steep ice-face and with detached boulders starting to roll down piling up the initial moraine, while streamlets of melt water are flowing out.

After a lapse of three days (fig. 10) the terminus of the glacier has retreated about 10 cm. It displays a number of transverse cuts by which the moraine material flows down the ice surface to produce a kind of "talus cone" heaped up above the moraine ridge. At the outlet of water from beneath the ice a depression — "the moraine gate" — has formed in the here well washed moraine. The stream overflowing the low moraine ridge has its outlet here. A small marginal lake has formed in the western part of the outwash plain (Sandar).

After five days (fig. 11) the ice has retreated still farther. A lake has formed before the outlet with subglacial water pouring in under pressure and overflowing the moraine ridge — now considerably higher. The "talus cones" noted previously have dispersed after ice retreat and are now mere swellings on the slanting moraine slope. The configuration of the ice has become more complex and displays marked unevenness responsible for lack of uniformity in the distribution of moraine material. An ice block has formed in the glacier's forefield, detached from its bulk and starting an independent morphological existence by throwing off the moraine cover. In the south-western corner we note a now readily discernible ridge. In front of it, from the very first days of the experiment, considerable quantities of material carried down the glacier have accumulated, relieving the ice surface from excessive moraine cover. At that moment the ice recedes without heaping up moraines and its former range is not indicated by the moraine but by the above mentioned ridge

along whose eastern extension lies a typically expressed "terminal moraine".

During the following days (fig. 12) the ice-edge retreats still farther. The moraine, previously heaped up in the central part of the reservoir, grows into a distinctly large ridge, separated from the newly formed moraine by a deep ditch. The detached, isolated blocks of ice gradually grow more numerous. They melt giving rise to small lakes whose number also increases. The area adjacent to the glacier well is now in complete ruin. Outside water had flown down that well into the interior of the ice. The original subglacial outlet is still active but gradually disappears. Another outlet is being formed in the southern portion of the glacier. The area occupied by ice has contracted to one third of its original size. Its culmination point has subsided from 148 to 68 cm. Concavities are showing on the surface. After ten days the bulk of the ice has broken up into several detached blocks with a meagre cover of moraine material. The melting process continues removing the blocks from the earlier moraines and leaving large shallow depressions where water collects. Fine-grained argillaceous deposits sediment on the floor of previously formed lakes, enveloping their bottom with a mantle of uniform thickness.

By the 13th day all the ice has melted leaving a sculpture (fig. 13) markedly reminding us of glacial landscapes (fig. 14) by a conspicuous ridge of the terminal moraine and by undulating morainic configuration. We note numerous undrained deepenings behind the end-moraine and Sandar valleys in the forefield. Being familiar with the earlier configuration of this area from direct observations, we now may well attempt an analysis of the forms which have developed. This analysis is expressed in a morphological map (fig. 15) showing the position of the ice-edge under several characteristic circumstances on the 1st, 3rd, 5th and 9th days respectively. Moreover, the map shows how the extensive moraine ridge, in the centre of the terrain, gathers up all the material derived from several recessional stages. Externally they are indicated by the course of few moraine belts.

The pattern adopted by waters outflowing from the glacier well was studied as the experiment progressed. It is arranged into a network of canals branching off in several directions. The main canal has an eastward trend towards the main outlet of subglacial waters. Several troughs have formed along this route in consequence of evorsion caused by waters under pressure making their way beneath the ice (as ascertained in the experiment). It is a noteworthy fact that these troughs "Rinntäler", have formed at some distance from the site where water

made its way into the ice fissure, whereas nearer to the glacier well its route is clearly indicated by a narrow and elongate ridge built of well washed coarse gravel. The site of the well, copiously fed by moraine material flowing down the ice surface, is a prominent and steep gravel hill. Edges connected with the direction of the water-flow in ice are more sharply indicated on the slopes of the gravel hill. Similar signs of evorsion are discernible along the other route followed by subglacial water, starting in the north-eastern corner. This is the direction along which water was also introduced from outside, but, in this case, directly under the ice. The contours of the isolated ice blocks distinctly show the sites of the shallow undrained deepenings. The undrained depressions, formed in the vicinity of the well where moraine material accumulated more plentifully, are with steeper slopes. Stronger landslide movements have occurred there after the melting of ice. The depressions may be differentiated into those stretching conformably with the trend of the terminal ridges, inter-moraine depressions, evorsion troughs, depressions left by melted ice-blocks and finally shallow concave deepenings left by marginal lakes in the glacier's forefield (on the Sandar).

Some of the depressions left by melted ice-blocks, which display a bi-concave shape, are particularly interesting. Another sharply outlined depression, centrally placed in the shallow basin, makes its appearance there. It is the relic of an ice-block persisting at the bottom of the depression but with its upper surface already relieved from the moraine cover and thus protecting this part against downflows from the slopes and sedimentation taking place around it (figs. 19, 20). Within the moraine belt we may observe beautiful relics of the former sites of the outlets of subglacial water, expressed as subsidences in the moraine ridges. The configuration forms carved by the melting ice were subject to further evolution in the course of the next few days. A number of very small forms which it was not possible to show in a hypsometric drawing in the mentioned map gradually disappeared. This process was expressed by so to say, "generalisation" of relief details, its evolution resembling that described by Jenssen and Milthers from Denmark in respect to the gradual creeping in ditch slopes. The "generalisation" process of sculpture details gained in intensity after the surface had been sprinkled by "rain" artificially sprayed. This did not, however, produce the formation of streams or erosion sculpture since the experimental ground proved highly permeable, soaking in all the water.

Upon completion of the "glacial" part of the experiment, its next stage was undertaken, devoted to observation of the formation of surface runoff. It was started with longlasting rain. At first the water continued

to be soaked in, accumulating only in undrained basins which are lined by argillaceous material. Gradually, however, the ground became impermeable and small lakes appeared in other depressions too (fig. 21). The supply of rain-water was, however, insufficient to produce the desired phenomena within a relatively short time. Therefore, it was decided to provide water from an outside source, namely that of "a stream flowing down from the upper part of the water basin" not within the experimental area. The stream of water coming from the north-western corner gradually filled up the three first depressions, giving rise to two smaller lakes marked A and B, and a larger one marked C (fig. 22). The discharge of water from the last named lake proved rather complicated since it could follow four different outlet routes. It first took an easterly course producing a large lake, marked EF, from which water escaped to the old stream channels on the Sandar by seepages in the moraine at the former site of outflow. Conditions took on a different turn when the supply of water was increased from 1.5 l/min. to 3 l/min. (fig. 23). The existing outlets could not carry off the excess of water so that the water level in the lake was slightly raised, providing a new outlet into the valley stretching southwards directly to the Sandar. The considerably lower water base led to intensified erosion, soon resulting in a broad valley being cut in that direction, with a rapid stream flowing along it (fig. 24). Upon the lowering of the river bed, water ceased overflowing into the other lakes so that water-flow lakes only remained along the water course, persisting in the deeper portions of their basins.

Water flowing along a new direction, contributed, by seepages and direct overflowing, to the formation of a number of new lakes. Their existence, however, was but very brief, since their water supply was stopped by the growing incision of the waterbed. Conditions here described altered so rapidly that within a few hours they had stabilised. During the next stage evolution was distinctly slower. Three days were needed for the river to saw its way through the steps holding up the lake-water. At the same time the lacustrine basins were being filled up by subaqueous alluvial fans encroaching from above. After cutting through the steps the stream commenced its incision work and built the first river "terrace". Further incision of the river together with the diminished volume of the passing water and changes introduced into the erosional base brought about the formation of three additional terraces. At this stage the experiment was terminated, a topographic (fig. 25) map and morphological (fig. 26) sketch being plotted to show the prevailing conditions. Both these plates illustrate relief details carved during the second phase of the experiment.



Upon completion of experimental work "geological studies" of the obtained model were undertaken by means of excavations made in different directions. The moraines did not reveal any signs of bedding, one of the experiments, however, within whose forefield large marginal lakes formed, subsequently filled in by Sandar sands, provided a fine example of bedding, even displaying deposits approaching varved clays (fig. 5).

Comparative studies of results obtained through the several experiments stress differences of character in the formation process of moraines dependent on the type of moraine material covering the ice. In the case of sands and gravels the shifted material shows great ability for movement (strong mobility). In many cases marked cubes were carried over a distance of more than one meter (figs. 17, 18). If, however, the ice has a clay cover which had the chance of drying up, then the ability for movement is much smaller and moraine material does not advance but "settles" down. The situation is quite different when clay material has thawed directly out of ice. Nearly liquid moraine mud is then produced which overflows every unevenness, long retaining its ability for motion.

The mechanism responsible for the formation of terminal moraines differs too, being controlled by moraine material and the shape of the moraine end. In some cases they will be "block moraines" built up of coarse material mainly, in others "creep" and "flow" moraines consisting of semi-liquid clay material.

During the 1957 experiment many temperature records were made in addition to geomorphological observations (fig. 35).

Within ice fissures the temperature is maintained nearly to the very end of the experiment at 0.2—0.4°C. At the ice-edge a marked decline of temperature is felt (3-5°C) which is nearly 10°C below the temperature level of the other parts of the cellar used for experimenting. On the glacier's surface marked differentiation of temperatures was observable even over small distances. On elevated ground, in spite of the proximity of ice, the temperatures are 4 to 6 degrees higher than in depressions with a thicker moraine cover. These differences are not obliterated until the larger ice-blocks, constituting major culminations, have melted. During the first stage, temperatures on the Sandar are clearly under the cooling influence of ice as long as it is a steep wall. During the second stage, however, when the terminus of the glacier has been buried in the moraines, and water temperature is lower than that of the air near the ice-edge, it is water that exercises a decisive influence on air temperature on the Sandar. In what the distribution of temperature is concerned, the disappearance of ice is associated with gradual obliteration of local tem-

perature differences, originally quite important. Thus, towards the close of the experiment all the measured temperatures vary but little.

Besides records of surface temperatures, some thermal profiles (figs. 36, 37) were plotted of the total height of the used cellar. The cooling of temperature caused by ice was thus quite striking. A front of cooled air formed over the ice-face, still observable at a height of 1.5 m. Together with the melting of ice and the covering of the ice-edge by moraines this front gradually diminished and finally disappeared.

Several "climatic periods" may be differentiated during the experiment. During the first period (1st to 5th day) the outcropping of ice is the predominant factor in determining temperatures. The range between local temperatures on the glacier and those in its vicinity is quite important. During the second period (5th to 9th day), temperatures at the ice-face gradually rise, showing the diminution of its cooling influence. Differences between local temperatures also decrease. Sub-glacial water now becomes the chief factor in the cooling of air temperatures. During the 3rd period (9th to 12th day) temperature differences at the ice-face, on the moraines and the Sandar, grow markedly smaller. The lowest temperatures are most frequently noted in inter-moraine depressions. During the fourth period (after the 12th day) local temperature differences nearly disappear so that their range does not exceed that of one degree.

The complete scheme of temperature differences observed during experimenting is, naturally, safeguarded against the effects of many agents which have been eliminated (insolation, winds, etc). At the same time, however, their absence permits a clearer insight into the differences caused by the influence of the melting bulk of ice.

One only of the experiments has been reported in this paper, and in a very cursory manner, so that hardly any results of the more detailed observations are mentioned. The author thinks that the knowledge thus gained is an encouragement to further experimenting which will involve ice of "conglomeratic" structure approaching nearer to glacier ice. Attempts to obtain this quality of ice have met with some success. The use of this kind of ice is particularly important in experiments on argillaceous material since it is this type only that produces watery clay showing a consistency closer to that of "glacial mud". Experiments with ice "in motion" are under preparation.

It seems to the author that experimenting of this kind may not only be of didactic value but that it may also, in a number of cases, be helpful for field researches thanks to the "life" paleogeographic picture they provide through the maintained continuity of events.

Of special interest may be thought the detailed observations noted during the completed experiments in respect to the formation of the various types of undrained deepenings, differences in sculpture details within the zone of subglacial outflow, and certain moments bearing on the differentiation of terminal moraines in the course of their formation ("block-", "slide-" and "creep" moraines). Perhaps not quite insignificant may also be analogies implied by the observation of the changes taking place in the lake district (the "melt-", "close-", "overflow-", "flow-" and "fluvial" phases), and of the climatic changes during the disappearance of ice (changes of the type consisting in the change of local temperature differences from the period of their strong differentiation and subsequent gradual passage to uniformity). When evaluating the results of the experiments it is, however, necessary to remember that they were carried out under "stabilised" conditions and isolated from many factors of important bearing on the development of glacial relief.

*Institute of Geological Sciences  
of the Polish Academy of Sciences  
and  
Department of Quaternary Geology  
at the Warsaw University  
Warszawa, December 1957*

---

## TREŚĆ

	Str.
Wstęp . . . . .	1
<b>Eksperyment I (1951) . . . . .</b>	<b>3</b>
Założenia i warunki przeprowadzenia eksperymentu . . . . .	3
Obserwacje w czasie doświadczenia . . . . .	6
Ocena wyników . . . . .	11
<b>Eksperyment II (1952) . . . . .</b>	<b>11</b>
<b>Eksperyment III (1956) . . . . .</b>	<b>14</b>
Założenia i warunki przeprowadzenia eksperymentu . . . . .	14
Część „glacjalna“ (tworzenie się rzeźby po stopnieniu „martwego lodu“)	16
Obserwacje w czasie przebiegu doświadczenia . . . . .	16
Przebieg topnienia lodu . . . . .	31
Ruchy materiału morenowego . . . . .	35
Procesy morfogenetyczne w czasie topnienia lodu . . . . .	39
Część „wodna“ (formowanie się odpływu powierzchniowego) . . . . .	45
Rozwój i przemiany pojezierzy . . . . .	47
Rozwój dolin rzecznych i tarasów . . . . .	55
Próbna transgresja . . . . .	60
Ogólna ocena eksperymentu z 1956 r. . . . .	61
<b>Eksperyment IV (1957) . . . . .</b>	<b>62</b>
Założenia i warunki przeprowadzenia eksperymentu . . . . .	62
Przebieg doświadczenia . . . . .	64
Odpływ wód topnienia . . . . .	70
Obserwacje „klimatologiczne“ . . . . .	73
Pomiary temperatur na powierzchni „terenu“ . . . . .	73
Profile termiczne . . . . .	77
Wnioski z obserwacji „klimatologicznych“ . . . . .	78
Ogólna ocena wyników doświadczeń . . . . .	80
Wnioski porównawcze . . . . .	81
Геоморфологический эксперимент как попытка воспроизведения процесса возникновения ледникового рельефа . . . . .	95
An experiment in geomorphology reconstructing the formation of glacial relief	96

## OBJAŚNIENIA DO PLANSZ I—XX

## DESCRIPTION OF PLATES I—XX

## PL. I

## Fig. 1

Eksperyment I (1951) — 16-ty dzień. Widok ze wzgórz morenowych powstałych po stopnieniu wschodniej grupy lodu (na pierwszym planie) na wał żwirowy, który utworzył się przed jego czołem (środek zdjęcia) i na przedpolu. Wał żwirowy w głębi po prawej stronie usypany został sztucznie dla ograniczenia odpływu wód topnienia

Experiment I (1951) — 16th day. Gravel mound formed in front of the ice face (centre) and forefield viewed from moraine hills left by the melting of the eastern ice-group (front). Gravel ridge (right background) artificially heaped up to reduce the runoff of melt waters

## Fig. 2

Eksperyment I (1951) — 16-ty dzień. Widok na wzgórza morenowe powstałe po stopnieniu wschodniej grupy lodu (w głębi), z dwoma dobrze widocznymi zagłębieniami bezodpływowymi (por. fig. 2 w tekście). Na pierwszym planie z lewej strony zbocze wzgórz po stopnieniu zachodniej grupy lodu, który był pokryty materiałem gliniastym i piaszczystym. W środku — narastające stożki napływowe sandru przed zachodnią grupą i płaska powierzchnia zastolska wysłana osadem ilastym

Experiment I (1951) — 16th day. View of morainic hills formed after melting of the eastern ice-group (background) with two readily discernible undrained deepenings (see text fig. 2). At the left front, hill slope due to melting of the western ice-group previously covered by clayey and arenaceous material. Centrally, the spreading Sandar alluvial fans in front of the western ice-group, also the flat bottom of the marginal lake mantled with argillaceous sediment

## PL. II

## Fig. 1

Eksperyment I (1951) — 14-ty dzień. Tworzenie się zagłębienia bezodpływowego po stopnieniu lodu. W środku jest jeszcze widoczny lód pokryty piaskiem (szara plama); dookoła moreny zsypane z lodu, gdy miał on wysokość 90 cm (por. fig. 1). Na zboczach widoczny początek wtórnych ruchów żwiru ku tworzącemu się zagłębieniu

Experiment I (1951) — 14th day. Formation of undrained deepening due to ice melting. In the middle we can still see sand-covered ice (grey patch); and surrounding moraines carried down the glacier when its height was 90 cm. (comp. text fig. 1). Secondary movements of gravel in the direction of the forming depression visible on the slopes

Fig. 2

**Eksperyment I (1951) — 16-ty dzień.** To samo zagłębienie co na fig. 1 po całkowitym stopnieniu lodu, którego ostatni szczątek znajdował się w miejscu zaznaczającym się spękaną płaszczystą plamą. Na zboczach widoczne ślady wzmożonych ruchów ku zagłębieniu po stopionym lodzie. Po lewej ostro zarysowane świeże formy morenowe z piasku gliniastego, w postaci „piramidki ziemnych”. W głębi po lewej drugie zagłębienie bezodpływowe

**Experiment I (1951) — 16th day.** The same depression as that in fig. 1 after all the ice had melted. Last ice relic persisting on a spot showing a cracked arenaceous patch. On the slopes, signs of intensified movements towards the depression after melted ice. To the left, sharply outlined morainic forms recently carved from argillaceous sand in the form of “rock pinnacles”. In the left background another undrained deepening

## PL. III

Fig. 1

**Eksperyment I (1951) — 14-ty dzień.** Inne zagłębienie bezodpływowe po stopnieniu lodu (107 na fig. 1 w tekście) widziane od „południa”. Na pierwszym planie po lewej żwirowy wał moreny czołowej; za nim nabrzmienie, które jeszcze tworzy lód. Po prawej i w głębi piaszczyste nasypy otaczające lód na początku doświadczenia, z objawami wtórnych ruchów ku niecce zagłębienia

**Experiment I (1951) — 14th day.** Southern view of another undrained deepening formed by melting ice (107 in text fig. 1). At the left front terminal moraine gravel ridge; behind it a bulge still consisting of ice. To the right and at the back, sand cover surrounding the ice at the beginning of the experiment, with secondary movements towards the depressed trough

Fig. 2

**Eksperyment I (1951) — 22-gi dzień.** To samo zagłębienie co na fig. 1; po całkowitym stopnieniu lodu widziane od „północy”. Po prawej ostro zarysowane „piramidki ziemne” widziane od innej strony niż na pl. II, fig. 2

**Experiment I (1951) — 22nd day.** Northern view of same depression as in fig. 1, after complete ice melting. To the right, sharply outlined “rock pinnacles” viewed from another site than in fig. 2 pl. II

## PL. IV

Fig. 1

**Eksperyment I (1951) — 1-szy dzień.** Widok na czoło zachodniej grupy lodu, pokrytej gliniastą moreną powierzchniową. Przed czołem rozpoczęło się zasypanie materiału morenowego. Na przedpolu lodu utworzyło się rozległe zastoisko

Experiment I (1951) — 1st day. View of ice-face in the western ice-group, covered by clayey surface moraine. In front of the ice-face the heaping up of moraine material has commenced. In the forefield of the glacier a large marginal lake has formed

Fig. 2

Eksperyment I (1951) — 120-ty dzień. Wykop w stożku napływowym (sandrze) przed czołem lodu widocznym na fig. 1, po jego stopnieniu. Po prawej zbocze „starszej moreny“, po lewej znajdował się lód. W wykopie dobrze widoczny profil piasków warstwowych (jasne) z przewarstwieniami łów „warwowych“ (ciemne) po zastoiach na przedpolu lodu. Widoczne trzy serie ilaste, z których każda młodsza przesunięta jest bardziej w prawo

Experiment I (1951) — 120th day. Ditch in the alluvial fan (Sandar) in front of the ice-face shown in fig. 1, after melting. To the right, slope of “older moraine”; to the left, area formerly occupied by ice. In the ditch, distinct section of bedded sands (light) with interbeddings of “varved” clays (dark) left by marginal lakes in the glacier's forefield. Three clay series are discernible, each younger one shifted more to the right

PL. V

Fig. 1

Eksperyment III (1956) — 2-gi dzień. Strone czoło lodu z pierwszymi zsypanymi morenowymi u jego podnóża i śladami odpływu wód topnienia na piaszczystej powierzchni sandru. Wzgórze po prawej ukształtowane sztucznie

Experiment III (1956) — 2nd day. Steep ice-face with first moraine heaps at its foot and with signs of melt water runoff on the arenaceous Sandar surface. The hill on the right artificially formed

Fig. 2

Eksperyment III (1956) — 18-ty dzień. Krajobraz morenowy po stopnieniu lodu. W środkowej części dolina po dawnym odpływie wód topnienia spod lodu. Po lewej moreny usypane między 1—5-tym dniem doświadczenia

Experiment III (1956) — 18th day. Morainic landscape after ice melting. In the middle, valley of the old subglacial melt water outflow. To the left, moraines built from 1st to 5th day of experiment

PL. VI

Fig. 1

Eksperyment III (1956) — 5-ty dzień. Wypływ spod lodu przysypany częściowo przez materiał morenowy zsuwający się z lodu. Na piaszczystym przedpolu dolina „sandrowa“ ze śladami przepływów. W głębi widoczny odsłonięty lód, spod którego wypływa woda

Experiment III (1956) — 5th day. Subglacial outflow partially choked by terminal-moraine material sliding off the ice. In the sandy forefield, a "Sandar" valley with signs of water flow. At the back, uncovered ice with subglacial water flow

Fig. 2

Eksperyment III (1956) — 21-szy dzień. Widok z tego samego miejsca co na fig. 1, po całkowitym stopnieniu lodu. Poza morenami w głębi widoczne jezioro, z którego woda przelewa się poprzez morenę czołową w miejscu dawnego wypływu spod lodu. Na pierwszym planie dolina dawnego odpływu sandrowego, obecnie wypełniona wodą odpływającą z jezior

Experiment III (1956) — 21st day. View from the same site as in fig. 1, after complete ice melting. At the back, behind the moraines, a lake is seen whose waters overflow the terminal moraine at the site of the old subglacial outflow. At the front, valley of the old Sandar outflow, now filled up by waters discharged by the lakes

## PL. VII

Fig. 1

Eksperyment III (1956) — 1-szy dzień. Strome czoło lodu pokryte częściowo zsypującym się po nim materiałem morenowym. U podnóża lodu usypany żwir i głaziki stanowiące zaczątek moreny czołowej. W trzech miejscach widoczne wypływy wody spod lodu i idące od nich ślady łożysk potoków łączących się ze sobą na sandrze

Experiment III (1956) — 1st day. Steep ice-face partially covered up with falling down moraine material. At the ice-foot, heaped up gravel and boulders are beginning to build up the terminal moraine. Three subglacial water outlets are visible together with traces of stream channels, starting from the outlets and converging on the Sandar

Fig. 2

Eksperyment III (1956) — 3-ci dzień. Widok z tego samego miejsca co fig. 1. Czoło lodu nieznacznie cofnęło się. Materiał morenowy zsypujący się z lodu przysypał częściowo prawy wypływ tworząc przed nim niższy niż w sąsiedztwie i lepiej przemyty wałek. Wypływ środkowy zasypany całkowicie. Lewy wypływ funkcjonuje prawie bez zmian

Experiment III (1956) — 3rd day. View from the same site as in fig. 1. The ice-face slightly retreated. Moraine material falling down the ice has partly choked the right outlet, thus building up in front of the ice-edge a small ridge, lower than in the neighbouring area and better outwashed. The central outlet altogether choked. The left one practically unaltered

## PL. VIII

Fig. 1

Eksperyment III (1956) — 5-ty dzień. Widok z tego samego miejsca co fig. 1 na pl. VII. Widoczne dalsze stopnienie się i cofnięcie czoła lodu. Z góry wzdłuż szczyberby



w lodzie zsunęły się nowe partie materiału morenowego. Morena czołowa znacznie nadbudowana. Lewy i środkowy wypływ zasypane całkowicie. Prawy wypływ funkcjonuje w dalszym ciągu, przepłukując zwał morenowy, który w tym miejscu jest znacznie niższy niż w sąsiedztwie. Za rygłem morenowym przy tym wypływie zaczyna się tworzyć jezioro (nie widoczne na zdjęciu — patrz fig. 12 w tekście)

Experiment III (1956) — 5th day. View from same site as in fig. 1, pl. VII, showing further melting and retreat of ice-edge. New heaps of moraine material have been carried down along the ice fissure. Height of terminal moraine considerably raised. The left and middle outlets completely choked. Right outlet continues to function, outwashing the moraine ridge which is here markedly lower than in the adjacent area. A small lake is forming behind the moraine ridge near this outflow (here not shown, but see text fig. 12)

Fig. 2

Eksperyment III (1956) — 21-szy dzień. Widok z tego samego miejsca co fig. 1 na pl. VII. Lód stopniał całkowicie. Miejsce poprzedniego prawego wypływu, który był czynny do końca istnienia lodu, zaznacza się obniżeniem w wale morenowym. W miejscu, gdzie poprzednio zanotowano zsuw z lodu, powstało wzniesienie. Materiał gwałtowno-żwirowy moren jest lepiej przemyty i opłukany z domieszek gliniastych. Na sandrze płynie woda pochodząca z dopływu po lewej stronie zdjęcia

Experiment III (1956) — 21st day. View from the same site as in fig. 1, pl. VII. The ice has melted completely. The position of the former right outlet, active as long as the ice persisted, is indicated by a depression in the moraine ridge. A hill has formed where sliding down the ice has formerly been observed. The boulder gravelly moraine material is better outwashed and freed from clay admixtures. Water supplied by the tributary (at the left of the photo) flows on the Sandar

## PL. IX

Fig. 1

Eksperyment III (1956) — 20-ty dzień. Widok prawie z tego samego miejsca co fig. 1 na pl. VII (nieco dalej). Morena czołowa z obniżeniem w miejscu dawnego wypływu wód spod lodu, przez które przelewają się obecnie wody z jeziora „F” leżącego na zapleczu moreny czołowej. W głębi po lewej widać jeziora „G” i „C”, po prawej — jezioro „F”. Sytuacja jezior zbliżona do przedstawionej na fig. 22 w tekście. Na pierwszym planie mało zmieniona dolina sandrowa, którą w dalszym ciągu odbywa się odpływ wody z jezior

Experiment III (1956) — 20th day. View from approximately the same site as that in fig. 1 of plate VII, slightly removed. Terminal moraine showing depression at the place of the former subglacial outflow, now overflowed by waters from lake „F” situated behind the terminal moraine. Lakes „G” and „C” (left background), lake „F” (to the right). The lake pattern resembles that shown in text fig. 22. At the front we have a Sandar valley, without important changes, along which water continues to run off from the lakes

Fig. 2

Eksperyment III (1956) — 21-szy dzień. Widok z tego samego miejsca co fig. 1 na pl. IX. Poziom jezior na zapleczu moren obniżył się znacznie na skutek kaptażu, który nastąpił w zachodniej (lewej) części basenu. Odpiływ przez rygiel morenowy w miejscu dawnego wypływu odbywa się drogą przesączania się wody między głazami. Lewy dopływ, poprzednio nieczynny, odżył dzięki kaptażowi i usypuje stożek napływowy, który zmienia zupełnie rzeźbę poprzedniej doliny sandrowej. Sytuacja jak na fig. 23 w tekście

Experiment III (1956) — 21st day. View from the same site as that in fig. 1, pl. IX. Water level of lakes behind the moraines has declined considerably owing to capture which has occurred within the western (left) portion of the reservoir. Runoff through the moraine ridge at the site of the old outlet takes place by means of seepages between the boulders. The left tributary, formerly not active, has now been revived by capture and is building up an alluvial fan which completely changes the relief of the former Sandar valley. The general relief as in text fig. 23

## PL. X

Fig. 1

Eksperyment III (1956) — 22-gi dzień. Widok z tego samego miejsca co fig. 1 na pl. IX. Jeziora na zapleczu moren bardzo zredukowane lub znikły całkowicie. Rzeka „wschodnia” przecięła sobie przełom na prawo od moren czołowych i usypała na przedpołu duży stożek napływowy, na którym widoczne są dwa poziomy ( $V^a$  i  $V^b$ ). Przesięki przez rygiel morenowy z jeziora „F” bardzo słabe. Zaczyna zarysowywać się powierzchnia tarasu IV, widoczna również w lewym górnym rogu zdjęcia w dolinie rzeki „zachodniej”. Sytuacja nieco wcześniejsza niż przedstawiona na fig. 24 w tekście

Experiment III (1956) — 22nd day. View from the same site as in fig. 1, pl. IX. Lakes behind the moraines are strongly reduced or have disappeared completely. The “eastern” stream has broken through to the right of terminal moraines and built a large alluvial fan in the forefield, showing two levels ( $V^a$  and  $V^b$ ). Seepages from lake through the moraine ridge, very slight. Surface outlines of terrace IV are beginning to show; also seen (left upper corner) in the “western” stream. Configuration pattern somewhat earlier than that shown in text fig. 24

Fig. 2

Eksperyment III (1956) — 30-ty dzień. Widok z tego samego miejsca co fig. 1 na pl. IX. Stożki napływowe utworzone poprzednio ( $V^a$  i  $V^b$ ) rozcięte przez dolinę erozyjną z dwoma tarasami (taras IV i III). Misy jeziorne na zapleczu moren suche i zasypane płaskami aluwialnymi. Przecina je dolina rzeki „wschodniej”, omijająca moreny widoczne na zdjęciu po prawej stronie. W lewym górnym rogu zdjęcia widoczny fragment doliny „zachodniej” rzeki z trzema tarasami (taras IV, III i II) podciętymi z boku przez erozję, której jeszcze nie było widać na poprzedniej fotografii. Sytuacja zbliżona do przedstawionej na fig. 25 w tekście

Experiment III (1956) — 30th day. View from the same site as in fig. 1, pl. IX. Alluvial fans previously formed, (V<sup>a</sup> and V<sup>b</sup>) dissected by the erosional valley with its two terraces (terrace IV and III). Lacustrine basins behind the moraines dry and filled up by alluvial sands. They are traversed by the "eastern" stream valley which avoids moraines shown to the right. In the left upper corner we see a fragment of the "western" stream valley with its three terraces (terraces IV, III and II) undercut by lateral erosion not yet observable in the preceding photograph.

Configuration pattern approaching that in text — fig. 26

## PL. XI

Fig. 1

Eksperyment III (1956) — 22-gi dzień. Ogólny widok na dolinę rzeki zachodniej (głównej) w chwili tworzenia się tarasu III. W środkowej górnej części zdjęcia widać wystaną płaskim powierzchnię dawnego przepływu w kierunku wschodnim i fragmenty powierzchni pojeziornej (po jeziorze „C”) podciętą przez krawędź tarasu. Po prawej jezioro „F”, w którym zwierciadło wody leży niżej niż poziom wody w rzece powyżej przełomu przez moreny. Jezioro „G” niewidoczne (zakryte przez moreny na pierwszym planie), położenie jego wskazuje piaszczysta plama w miejscu dawnego przelewu z jeziora „C” do „G”. Sytuacja ta jest przedstawiona na fig. 25 w tekście

Experiment III (1956) — 22nd day. General view of the main "western" stream valley during the formation of terrace III. In the upper centre we see the sand-covered surface of the old waterflow channel with an eastern trend, also fragments of the old lake floor (left by lake "C") undercut by the edge of the terrace. To the right, lake "F", whose water level lies below that of the stream above its break through the moraines. Lake "G" is not visible being screened by the moraines shown at the front. Its position is indicated by a sandy patch at the site of the old water discharge from lake "C" to lake "G". Configuration pattern as that represented in text — fig. 25

Fig. 2

Eksperyment III (1956) — 12-ty dzień. Pd.-zachodnie naroże basenu doświadczalnego z niewielkim wałem moreny czołowej z 1-3 dnia eksperymentu. Na jej zapleczu — krawędź cofającego się lodu pozbawionego pokrycia moreny powierzchniowej i powstałe po jego stopnieniu w 7-ym dniu zagłębienie bezodpływowe, w którym przez jakiś czas istniało jezioro wypełnione wodami topnienia (jezioro „N”). Powierzchnia zagłębienia wystana płaskim z nielicznymi głazikami. Na prawo — misa jeziora „M”, również pokryta przez płaski (por. mapki fig. 16 i 25 w tekście)

Experiment III (1956) — 12th day. The south-western corner of the experimental reservoir with a small terminal moraine ridge built up during the first three days of experimenting. Behind the moraine, edge of the retreating ice without surface moraine cover, also an undrained depression formed during the 7th day, after ice melting. The depression once contained a lake (marked "N") fed by melt waters. The bottom of the depression is sand-covered with few boulders. To the right, basin of lake "M" likewise sand-covered (comp. text figs. 16 and 25)

## PL. XII

Fig. 1

**Eksperyment IV (1957) — 3-ci dzień.** Widok na strome czoło lodu na początku doświadczenia. Widoczne pierwsze fazy sypania moren czołowych u podnóża stromej krawędzi lodu. Górna powierzchnia lodu pokryta moreną powierzchniową i przecięta podłużną szczeliną. Sytuacja przedstawiona na fig. 30 w tekście

**Experiment IV (1957) — 3rd day.** View of the steep ice-face at the beginning of the experiment: showing the initial stages of the heaping up of terminal moraines at the foot of the steep ice-face. Upper ice surface mantled by surface moraine and dissected by a longitudinal fissure. Configuration pattern that in text — fig. 30

Fig. 2

**Eksperyment IV (1957) — 7-y dzień.** Widok prawie z tego samego miejsca co fig. 1 na pl. XII. Czoło lodu znacznie cofnięte i zagrzebane wśród moren. Fragment jego widać w górnym lewym rogu zdjęcia. Moreny czołowe złożone z materiału gliniastego, silnie rozpełnione. U dołu po lewej widoczny jezor zsuwu wchodzący na sandr. W środku w głębi — zagłębienie bezodpływowe otoczone walikiem morenowym, wyraźnie nasuniętym na sandr. Jest to morena zepchnięta naprzód przez dużą bryłę lodu, która zsunęła się z jego czoła w 5-tym dniu doświadczenia. Wspomniane zagłębienie powstało po stopnieniu tej bryły. Środkową część zdjęcia zajmuje duży stożek napływowy (sandrowy) usypany przez wody spływające doliną leżącą w środkowej części masy lodu. Po prawej — zastoisko na przedpolu sandru, do którego wpadają strumienie płynące po sandrze, tworzące przy ujściach palczaste delty

**Experiment IV (1957) — 7th day.** View approximately the same as that in fig. 1, pl. XII. Ice-face has retreated considerably and is buried in the moraines. Its fragment is seen in the upper left corner. Terminal moraines, strongly dispersed, built up of argillaceous material. In the lower left corner, tongue of landslide invading the Sandar. At back of centre, an undrained depression rimmed by a moraine ridge, distinctly pushed onto the Sandar. This is a moraine shifted forward by a large ice-block which had fallen off the ice-edge during the 5th day of the experiment. The mentioned depression has formed after the melting of that ice-block. The centre is occupied by a large Sandar alluvial fan built up by waters flowing down the valley situated in the central part of the main ice-bulk. To the right, a marginal lake in the forefield of the Sandar, into which are drained the Sandar streams building up digitate deltas at their mouths

## PL. XIII

Fig. 1

**Eksperyment IV (1957) — 5-ty dzień.** Stromo pochylone czoło lodu częściowo pokryte moreną, która spadając rozsypuje się u jego podnóża. W głębi widać stożki nasypowe i nasypowo-napływowe powstające w pobliżu czoła lodu. Powierzchnia moren pokrywających lód bardzo niespokojna

Experiment IV (1957) — 5th day. Steeply inclined ice-face, partly covered up by moraine which falls over the ice-edge and is spread at its foot. At the back, talus cones and talus-alluvial fans being built near the ice-face. Surface of ice-covering-moraines greatly disturbed

Fig. 2

Eksperyment IV (1957) — 6-ty dzień. Rzeźba morenowa pochylego czoła lodu przysypanego morenami gliniastymi. Widoczne ślady zsuwów i licznych spływów. U góry w środku odsłania się fragment lodu, przed którym tworzy się niewielka fosa morenowa

Experiment IV (1957) — 9th day. Morainic relief of the inclined ice-face covered up by argillaceous moraines. Traces of slides and numerous flows. In the upper centre, an ice fragment makes its appearance, in front of which a small moraine trench is formed

## PL. XIV

Fig. 1

Eksperyment IV (1957) — 3 ci dzień. Strome czoło lodu w zachodniej części basenu z morenami „zsyłowymi“ u podnóża. W środkowej części i nieco w głębi widoczny stożek „nasypowo-zsuwowy“. Akumulacja na przedpolu lodu bardzo słaba.

Experiment IV (1957) — 3rd day. Steep ice-face in the western part of the reservoir, with "block" moraines at its foot. In the centre back, a talus-slide cone. Accumulation in the ice forefield very slight

Fig. 2

Eksperyment IV (1957) — 26-ty dzień. Widok na tę samą część basenu doświadczalnego, po całkowitym stopnieniu lodu, po okresie „deszczów“ i erozyjnej działalności wód bieżących. Formy lodowcowe złagodzone i zaokrąglone w wyniku późniejszej ich modyfikacji

Experiment IV (1957) — 26th day. View of the same part of the experimental reservoir, after complete ice melting and after the "rain" stage and erosional activities of running waters. Glacial relief forms more gentle and rounded due to subsequent modification

## PL. XV

Fig. 1

Eksperyment IV (1957) — 5-ty dzień. Ten sam odcinek czoła lodu, co na fig 1 na pl. XIV, widziany z nieco innego miejsca, po znacznym „cofnięciu się“ czoła lodu, które już jest przysypane morenami. W głębi widać dwa recesyjne waliki morenowe. Na pierwszym planie — spelzająca półpłynna morena gliniasta. Na przedpolu rozpoczęło się narastanie stożków sandrowych

Experiment IV (1957). — 5th day. Same view as that in fig. 1, pl. XIV, but from a slightly different site, after considerable retreat of the ice-edge which is now moraine-covered. At the back we see two recessional moraine ridges. At the front, a semi-liquid, "creep" clay moraine. Sandar fans have begun to form in the forefield

Fig. 2

Eksperyment IV (1957) — 30-ty dzień. Widok z tego samego punktu, co fig. 1 na pl. XV, po całkowitym stopnieniu lodu i przemychu moren przez deszcze. Formy morenowe znacznie obniżone i zmodyfikowane. Na przedpolu — dobrze rozwinięta rzeźba sandrowa. Materiał gruboziarnisty rozwleczony znacznie szerzej niż poprzednio

Experiment IV (1957) — 30th day. View from the same site as in fig. 1, pl. XV, after the ice had completely melted and the moraines had been outwashed by rains. Morainic relief considerably reduced and modified. In the forefield, strongly expressed Sandar sculpture. Coarse-grained material dispersed over greater distance than previously

## PL. XVI

Fig. 1

Eksperyment IV (1957) — 4-ty dzień. Czoło lodu połamane na bryły i pokryte częściowo gliniastą moreną; z jej zsuwających się partii zaczyna się tworzyć niezbyt regularny wał moreny czołowej

Experiment IV (1957) — 4th day. Ice-face broken up into ice-blocks and partly covered up by clay moraine; its falling off fractions have started to build up a somewhat irregular terminal moraine ridge

Fig. 2

Eksperyment IV (1957) — 4-ty dzień. Czoło lodu pokryte moreną gliniastą, z którego zsunęła się bryła lodu, spychając przed sobą materiał morenowy, który utworzył wysunięty naprzód wałek z zagłębieniem bezodpływowym na jego zapleczu

Experiment IV (1957) — 4th day. Ice-face covered up by clay moraine; ice-block fallen off the ice-edge has carried moraine material which has built up an advanced ridge with an undrained depression behind it

## PL. XVII

Fig. 1

Eksperyment IV (1957) — 12-ty dzień. Powierzchnia gliniasta moreny powierzchniowej na lodzie w miejscu pozwalającym na odpływ wód topnienia. Nieregularne pagórki gliniaste, częściowo osuszone, między którymi w obniżeniach leży dobrze przemyty żwir

Experiment IV (1957) — 12th day. The face of the clay surface moraine on ice at a place where the runoff of melt waters is possible. Irregular clay hills, partly dried up, with well washed gravel in the intervening depressions

Fig. 2

Eksperyment IV (1957) — 3-ci dzień. Powierzchnia morenowa na lodzie w okolicy środkowej studni na lodzie (ob. fig. 30 w tekście). Morena gliniasto-żwirowa dobrze zwilżana przez wody topnienia. Widoczne liczne ślady spływania soliflukcyjnego pokrywmy morenowej po lodzie

Experiment IV (1957) — 3rd day. Moraine surface on ice near the central glacier well (see text-fig. 30). A clay-gravel moraine well watered by melt waters. Many traces of solifluction flowage of morainic cover over the ice

## PL. XVIII

Eksperyment IV (1957) — 7-my dzień. Widok z „lotu ptaka“ na sandry i brzeg zastolska na ich przedpolu. Ujścia potoków sandrowych do zastolska mają dobrze rozwinięte delty palczaste

Experiment IV (1957) — 7th day. Aerial view of the Sandars and the border of the marginal lake in the Sandar forefield. Strongly outlined digitate deltas where Sandar streams discharge into marginal lakes

## PL. XIX

Fig. 1

Eksperyment IV (1957) — 7-my dzień. Stożki sandrowe we wcześniejszej fazie narastania z widocznymi pokrywającymi je spływami z moren czołowych i z potokami błota lodowcowego. W głębi — moreny czołowe

Experiment IV (1957) — 7th day. Sandar fans during the early stage of formation with terminal moraine flows covering them, also glacial mudflows. Terminal moraines at the back

Fig. 2

Eksperyment IV (1957) — 16-ty dzień. Widok na ten sam fragment, co na fig. 1 na pl. XIX, w dalszym etapie nadbudowywania się stożków sandrowych. Rzeźba sandrowa z licznymi zmiennymi łożyskami potoków dobrze wyrażona. Ślady spływów z moren zatarte lub przysypane przez późniejszą akumulację. Materiał morenowy, który się dostał na sandr, przemyty

Experiment IV (1957) — 16th day. View of the same fragment as in fig. 1, pl. XIX, during further growth of Sandar fans. Well indicated Sandar relief with numerous intermittent stream channels. Traces of moraine flows obliterated or covered up by later accumulation. Moraine material, brought onto the Sandar, well outwashed

## PL. XX

## Fig. 1

**Eksperyment IV (1957) — 13-ty dzień.** Charakter rzeźby morenowej po zakończeniu glacialnej części doświadczenia, nie zmodyfikowany przez erozję i działalność wód deszczowych

**Experiment IV (1957) — 13th day.** Character of morainic relief, after completion of the „glacial“ part of experiment, not modified by erosion or rain waters

## Fig. 2

**Eksperyment IV (1957) — 26-ty dzień.** Ta sama powierzchnia, co na fig. 1 na pl. XX, po skropieniu jej przez deszcze, w początkowych stadiach rozwoju erozji wód płynących

**Experiment IV (1957) — 26th day.** Area as in fig. 1, pl. XX, sprinkled by rains, during the initial stages of the erosional activities of current water

---





Fig. 1



Fig. 2



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 1



Fig. 2

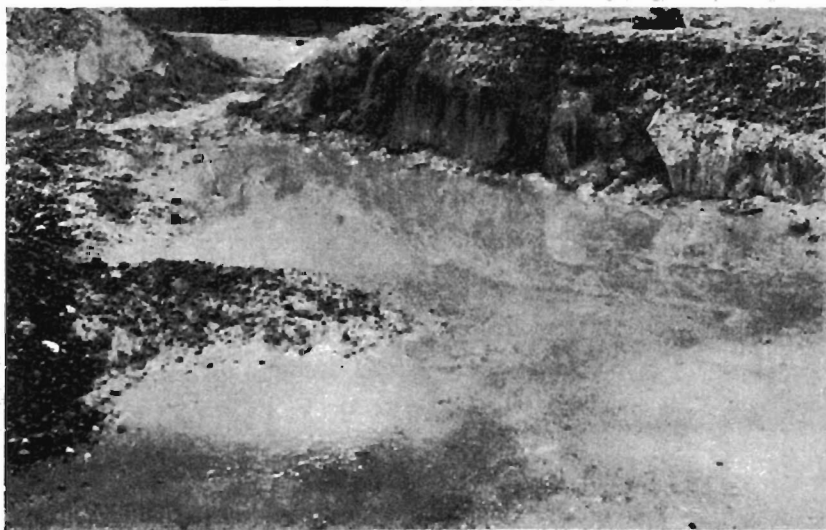


Fig. 1

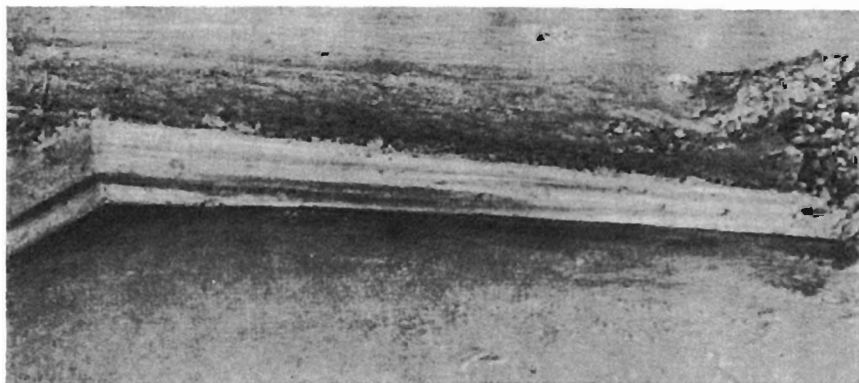


Fig. 2



Fig. 1



Fig. 2

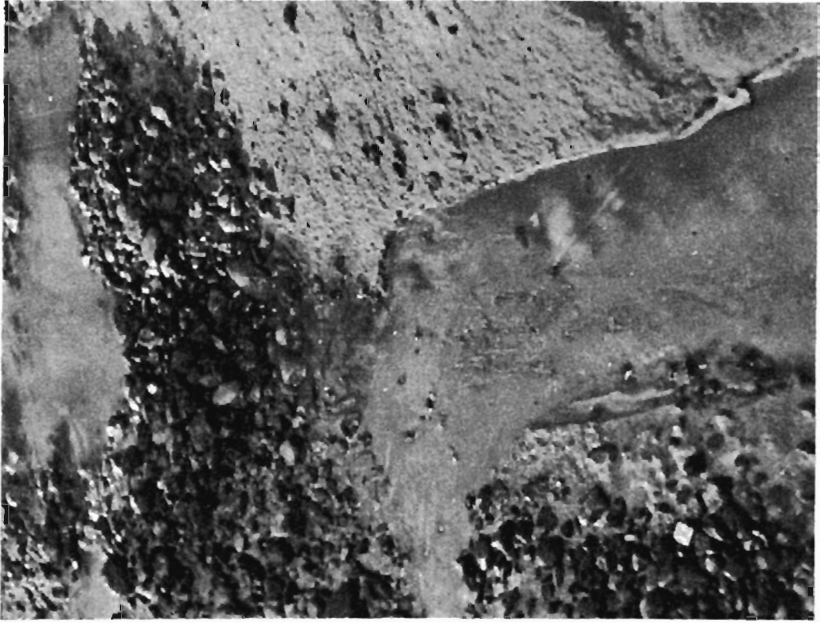


Fig. 2

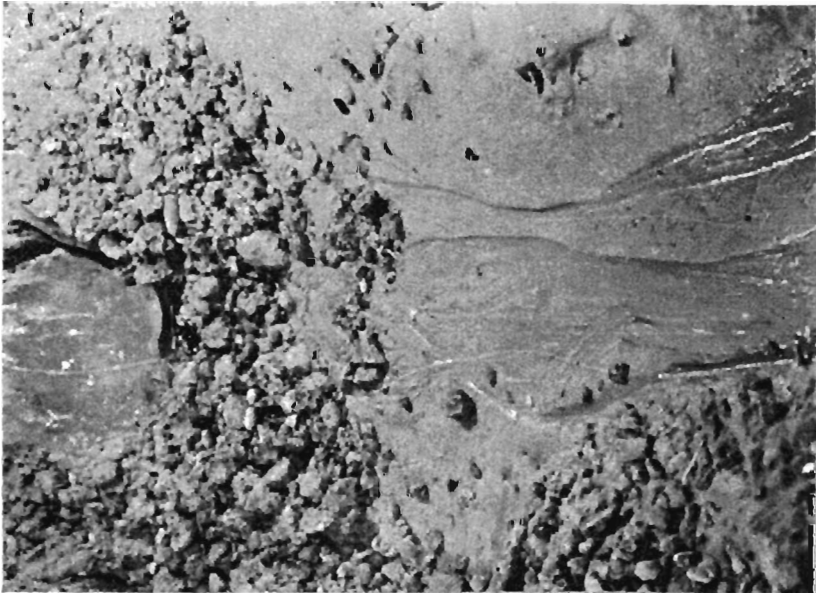


Fig. 1



Fig. 1



Fig. 2



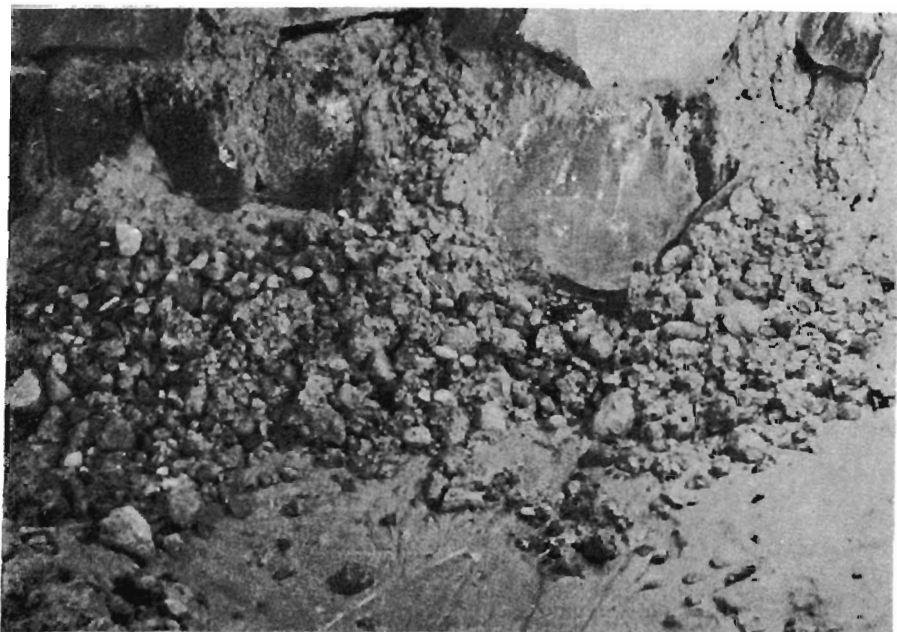


Fig. 1



Fig. 2





Fig. 1



Fig. 2



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 1

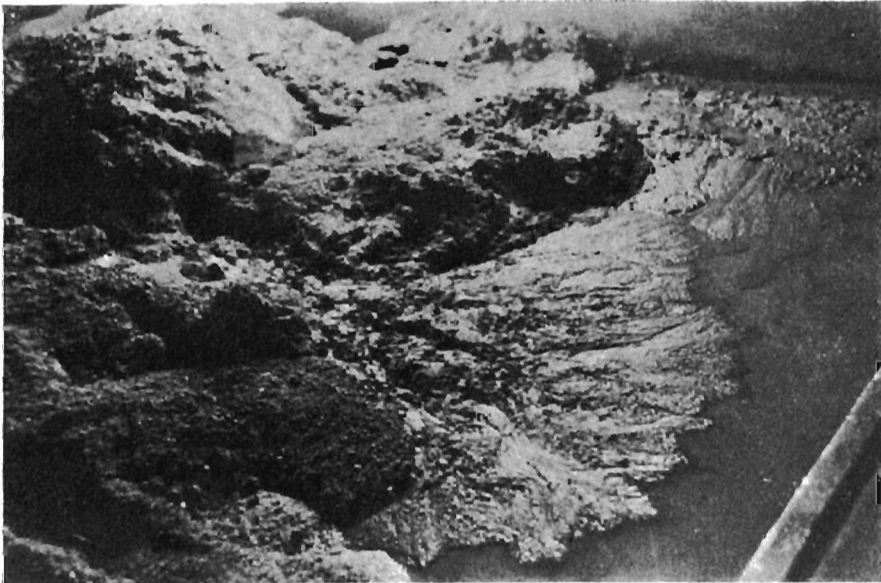


Fig. 2



Fig. 1



Fig. 2

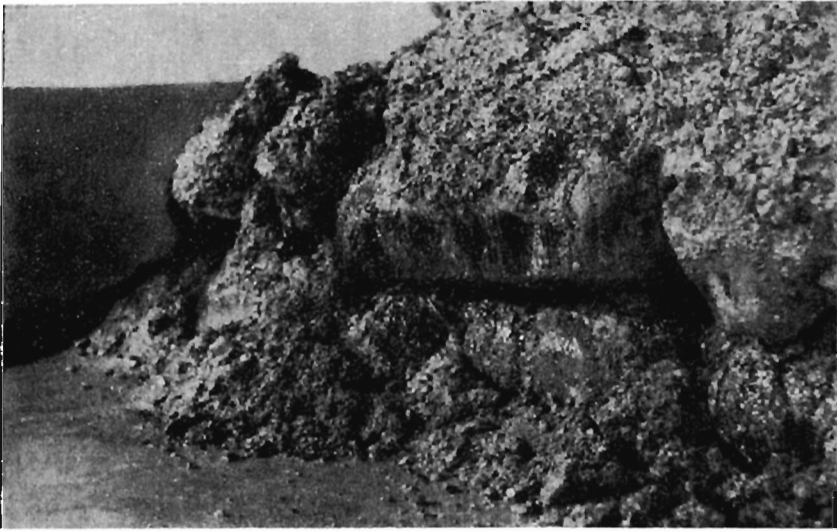


Fig. 1



Fig. 2



Fig. 1



Fig. 2





Fig. 1



Fig. 2





Fig. 1

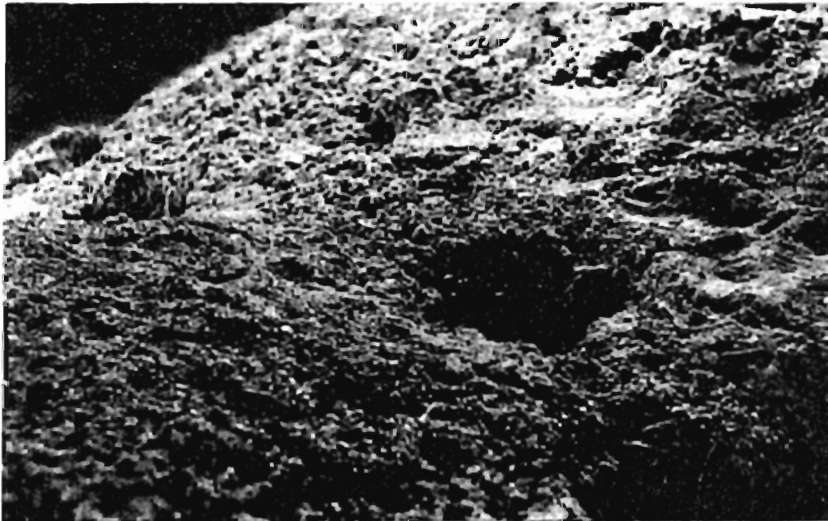


Fig. 2



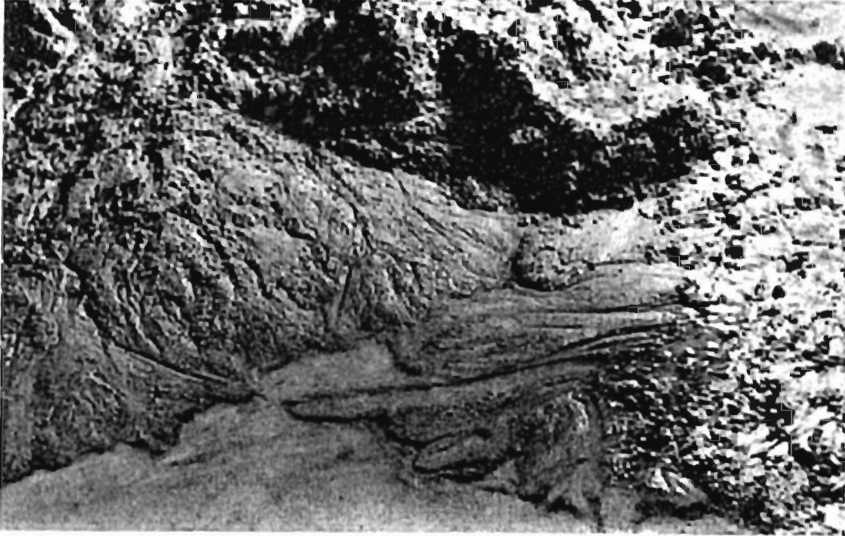


Fig. 1



Fig. 2

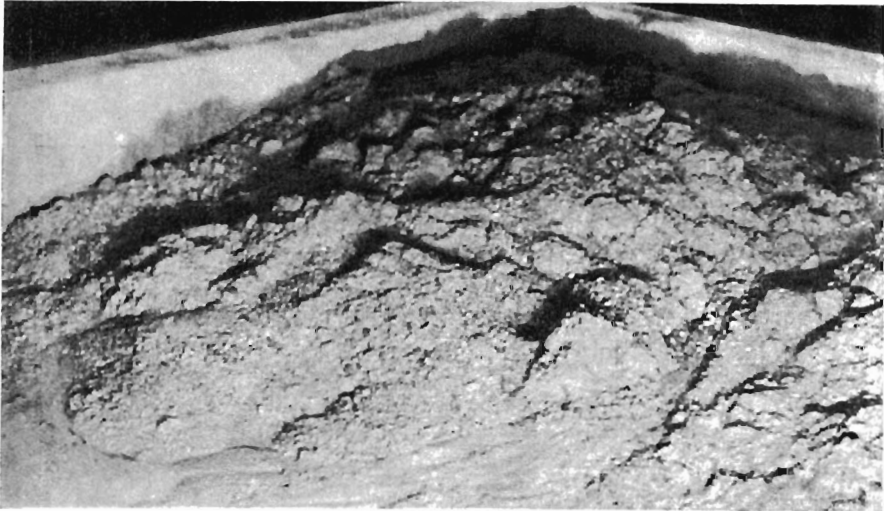


Fig. 1



Fig. 2