

Podłoże budynków i budowli polarnych

Dr inż. arch. Andrzej Kuryłek
JUKU Architekci, Warszawa

Przyjmując za granicę Arktyki przebieg izotermi lipcowej, a dla Antarktyki przebieg strefy konwergencji antarktycznej, terytoria tych dwóch obszarów polarnych zajmują powierzchnię ponad 73 mln km². Stanowi to przeszło 14% powierzchni Ziemi (dla porównania powierzchnia Eurazji wynosi mniej niż 11%). Stan prawny oraz własnościowy Arktyki i Antarktyki jest złożony. To pochodna chronologii odkrywania, zasiedlania oraz trudnych parametrów środowiskowych [2]. Znaczna część obszaru stale lub okresowo pokryta jest lądolodem,

lodem szelfowym, lodem morskim. Dostępne podłoże stałe ma zmienną sezonowo formę oraz zasięg. Pomimo relatywnie ubogiej aktywności biologicznej środowiska polarne są różnorodne i bardzo dynamiczne. Współcześnie podlegają zmianom wynikającym z ocieplenia klimatu [8], a konsekwencje tego procesu wpływają na kształtowanie zjawisk pogodowych w skali globalnej. Jest zatem zrozumiałe, że na obszarach powyżej kół podbiegunowych na obydwu półkulach Ziemi prowadzona jest aktywność budowlana.

Realizacje polarne przysparzają jednak pewnych trudności klasyfikacyjnych. Wynika to między innymi z faktu, że znaczna ich część realizowana jest na podłożu nietypowym w tradycyjnym rozumieniu. Z definicji budynek lub budowla muszą być *trwale połączone z gruntem* [15]. Trudno jednak uznać za spełniające ten warunek realizacje polarne, posadowione na podlegającym dryfowi lądolodzie lub lodzie (zmianie ulegają zatem współrzędne geograficzne, czasami także wysokość posadowienia), a również takie, które posadowiono na elementach konstrukcyjnych ułożonych na rzędnej terenu bez zagłębienia w nim lub bez użycia stałych elementów kotwiących. Byłoby także nieprecyzyjne uznawać za *obiekt trwały* taki, który z definicji (wymogi odnoszące się do stacji antarktycznych wynikające między innymi z zapisów Protokołu Madryckiego z 1991 roku [10]) pracować ma w ściśle założonym okresie, być możliwie łatwym do demontażu, nie pozostawiać po likwidacji śladów w środowisku naturalnym. Można powołać się na dwie przesłanki kwalifikacji obiektu jako trwale związanego z gruntem, które w rozumieniu prawa cywilnego definiowane są jako: *brak możliwości odłączenia obiektu bez jego uszkodzenia oraz brak wzniesienia obiektu do przemijającego użytku*. W przypadku obiektów antarktycznych, obie te przesłanki nie są na ogół spełnione. Bardziej precyzyjne byłoby zatem uznawanie obiektów antarktycznych (czyli przede wszystkim naukowych stacji badawczych) za tymczasowe [15]. Ale także tutaj powstaje w myśl polskiego prawa rozbieżność interpretacyjna, z uwagi na zapis o konieczności przeniesienia takiej realizacji *nie później niż przed upływem 180 dni od dnia rozpoczęcia budowy określonego w zgłoszeniu*. Zgodnie ze stanem własnościowym antarktycznych realizacji budowlanych, zagadnienia prawne komplikują się dodatkowo ze względu na konieczność pogodzenia przepisów kraju inwestora z obowiązującymi lokalnie, w tym dotyczącymi obszarów chronionych przyrodniczo.

Odsuwając na bok dywagacje prawne, można poddać przeglądowi rodzaje podłoża rejonów polarnych, określając jego najważniejsze cechy z inżynierskiego punktu widzenia. W wysokich szerokościach geograficznych właściwości lokalnego podłoża są w znacznej mierze pochodną typu, następnie kategorii lokalnego klimatu [6, 7]. Występują przy tym niejednorodności oraz lokalne anomalie. Niektóre bardzo użyteczne z budowlanego punktu widzenia, na przykład skaliste oazy lub stałe wolne od pokrywy lodowej wypiętrzenia skalne, wznoszące się powyżej lądolodu, nazywane nunatakami. Możliwości niwelacji terenu czy modyfikacji przez nawożenie są w warunkach polarnych bardzo ograniczone: ekonomicznie, technicznie i prawnie. Przede wszystkim ze względu na koszt transportu budulca oraz maszyn, wynikający z daleko idących ograniczeń logistycznych. Kolejne utrudnienia to brak infrastruktury drogowej, charakterystyka linii brzegowej i warunki klimatyczne znacząco utrudniające roboty ziemne. Istotnym ograniczeniem jest występowanie zmarzliny, która czyni podłoże twardym, ale może ulec destabilizacji, jeśli zostanie odsłonięta na okres, w którym temperatura jest dodatnia (tym samym dużo rozsądniej jest modyfikować teren przez nawożenie niż ingerencję wgłębną). Najważniejsze są jednak ograniczenia proceduralne. Znaczne obszary polarne (w tym cały kontynent antarktyczny) są prawnie chronione jako unikalne przyrodniczo, co wyklucza zaawansowane roboty ziemne. Szereg obszarów arktycznych podlega także ochronie w świetle przepisów krajowych lub międzynarodowych,

co znacząco ogranicza możliwe formy aktywności budowlanej. Nie oznacza to jednak, że modyfikacje terenowe nie były dokonywane. Racjonalnym przykładem arktycznym może być posadowienie stacji Olonkinbyen na wyspie Jan Mayen. Z uwagi na strukturę lokalnych skał wulkanicznych cały teren pod tym obiektem wyrównano żwirem, przy czym znaczną część prac przeprowadzono na długo przed zaostreniem przepisów dotyczących ochrony lokalnego środowiska. Przykład antarktyczny (dalece nieracjonalny, uznawany wręcz współcześnie za barbarzyński) to niwelacja oraz połączenie trzech wysp położonych w pobliżu francuskiej stacji Dumont d'Urville. Prace rozpoczęto w latach 90. XX wieku, pomimo protestów oraz szerokiej krytyki naukowców. Okazały się przy tym niedostatecznie przemyślane, a ich wynik na tyle nieskuteczny, że przedsięwzięcie zarzucono, niestety dewastując wcześniej znaczny obszar.

Co jednak zrozumiałe i stale praktykowane, robót ziemnych wymaga budowa polarnej infrastruktury komunikacyjnej, energetycznej, drogowej, a także budowa pasów startowych i niektórych lądowisk [16]. Najbardziej zaawansowane inwestycje tego rodzaju realizowano w Arktyce, jako związane z wojskowością oraz sektorem energetycznym. Należy w tym miejscu wyjaśnić, iż wybór lokalizacji pod planowaną inwestycję polarną przebiega inaczej niż na terenach zurbanizowanych. Użytkowe obiekty powyżej 66°33'N oraz 66°33'S nie powstają bowiem w miejscach podyktowanych możliwością nabycia czy posiadania przez inwestora prawa do dysponowania nieruchomością na cele budowlane. Wybór lokalizacji determinują przede wszystkim rzeźba terenu oraz właściwości lokalnego podłoża, w następnej kolejności przepisy środowiskowe, rodzaj prowadzonych badań, długoterminowe analizy warunków pogodowych, dostępność logistyczna, względna racjonalność ekonomiczna (co do zasady realizacje polarne służące celom naukowym, militarnym, politycznym nie powstają jako typowe inwestycje budowlane, które mają się zamortyzować, względnie przynieść inwestorowi dochód) [6].

Analizując liczący łącznie kilkaset przykładów zbioru znaczących realizacji arktycznych i antarktycznych, wyodrębnić można uogólnioną listę rodzajów podłoża, na jakim funkcjonują. Na obszarach polarnych obiekty użytkowe wznoszone są na podłożu lodowym lub mineralnym. Z budowlanego punktu widzenia najważniejszą właściwością podłoża jest jego zachowanie w czasie, pod działaniem sił obciążających, a zatem nośność oraz odkształcalność. W przypadku podłoża lodowego, w celu oceny jego przydatności, należy rozważyć przede wszystkim właściwości fizyczno-mechaniczne (skład: śnieg, firn, lód, co zależne jest od sposobu tworzenia, czyli genezy powstania), tym samym stopień zagęszczenia podłoża lodowego, stopień jego plastyczności oraz uwarstwienia. Cechy te wpływają bowiem na właściwości mechaniczne (stopień spękania, prędkość poruszania się). Z kolei wytrzymałość na odkształcenia podłoża mineralnego zależeć będzie przede wszystkim od stopnia spękania i rozdrobnienia skał. Biorąc pod uwagę podane cechy, mając także na uwadze stopień przydatności rodzajów podłoża lodowego oraz mineralnego, można w uproszczeniu wyodrębnić następujące rodzaje podłoża rejonów polarnych:

- lód morski:
 - lód morski wieloletni,
 - inne rodzaje lodu morskiego (między innymi lód morski pierwszoroczny, lód morski dwuletni, lód stały);

- lód kontynentalny:
 - lody szelfowe,
 - niespękany lód nieruchomy,
 - niespękany lód wolno poruszających się kopuł lodowych i lądolodów,
 - spękany lód brzeżnych części kopuł lodowych i lądolodów,
 - szybko (szybciej niż 2 m/rok) poruszający się lód lodowców wyprowadzających (ang. *ice stream*, ros. *vyvodnyje ledniki*) oraz brzeżnych partii kopuł lodowych i lądolodów);
- podłoże mineralne:
 - skały lite niespękane lub spękane wielkoblokowo,
 - skały lite spękane drobnoblokowo (< 10 m),
 - skały okruchowe w postaci wielkookruchowego rumoszu skalnego (> 0,1 m),
 - skały okruchowe w postaci drobnookruchowego rumoszu skalnego (< 0,1 m),
 - osady o frakcji od żwirów grubych do piasków drobnoziarnistych,
 - osady o frakcjach pylastych i ilastych.

Powyższy (uproszczony) podział daje pewien pogląd na typologię podłoża, ale z czysto budowlanego punktu widzenia jest mało praktyczny. Dlatego warto dokonać podziału wtórnego, w odniesieniu do przydatności poszczególnych rodzajów podłoża jako miejsca lokalizacji obiektu polarnego. Pamiętając o wymogu spełnienia również innych warunków (na przykład nachylenia, izolacji termicznej od podłoża), można ocenić przydatność wymienionych rodzajów podłoża lodowego oraz mineralnego. Przydatne do lokalizacji obiektów o wieloletnim czasie pracy są:

- skały lite niespękane lub spękane wielkoblokowo,
- skały okruchowe w postaci drobnookruchowego rumoszu skalnego,
- osady o frakcji od żwirów grubych do piasków drobnoziarnistych.

Przydatne z zastrzeżeniami (tonięcie w błocie, problemy z utrzymaniem drożności w okresie ciepłym, problemy ze spływem wód roztopowych i opadowych w okresie ciepłym) są:

- osady o frakcjach pylastych i ilastych.

Przydatny z zastrzeżeniami (tonięcie w lodzie) jest:

- niespękany lód nieruchomy,
- niespękany lód wolno poruszających się kopuł lodowych i lądolodów.

Warunkowo przydatne do lokalizacji obiektów mających pracować od kilku do kilkunastu lat są:

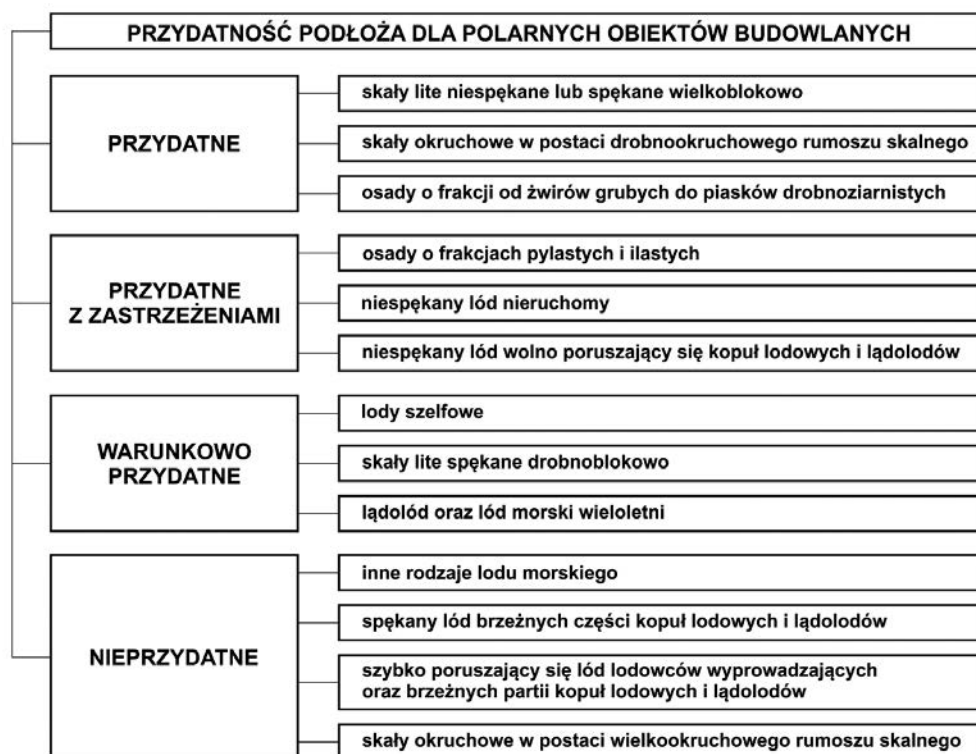
- lody szelfowe,
- skały lite spękane drobnoblokowo.

Warunkowo przydatny do lokalizacji stacji mającej pracować przez okres rzędu kilku miesięcy (choć znane są przykłady historyczne działające dłużej, na przykład w ramach programu Siewiernyj Polus) jest:

- lód morski wieloletni.

Całkowicie nieprzydatne do lokalizacji obiektów budowlanych są:

- inne rodzaje lodu morskiego,
- spękany lód brzeżnych części kopuł lodowych i lądolodów,
- szybko poruszający się lód lodowców wyprowadzających oraz brzeżnych partii kopuł lodowych i lądolodów,
- skały okruchowe w postaci wielkookruchowego rumoszu skalnego.



Rys. 1. Klasyfikacja przydatności podłoża dla polarnych obiektów budowlanych.(źródło: opracowanie własne)

Wymienione grupy podłoży znacznie różnią się podstawowymi nawet cechami, które określają ich przydatność w budownictwie polarnym (rys. 1). Jednocześnie determinują możliwe do zastosowania rozwiązania techniczne, które wymagają omówienia.

PODŁOŻE LODOWE

Powierzchnia lodu to skrajnie nietypowe oraz nieprzyjazne podłoże do prowadzenia aktywności budowlanej. Jego cechy są zróżnicowane oraz wysoce zmienne w czasie. Każdy rodzaj lodu ulega transformacjom sezonowym oraz/lub sekularnym. Takie zachowanie trudno jednoznacznie i precyzyjnie przewidzieć, co niesie niemożliwe do wyeliminowania ryzyko budowlane. Analizując historyczne oraz funkcjonujące realizacje polarne (całoroczne oraz sezonowe) posadowione na podłożu lodowym, można stwierdzić, że wznoszono je na: **ładolodzie, lodowcu (lodzie) szelfowym, lodzie morskim wieloletnim**. Przy czym są to obiekty naukowe i związane z turystyką polarną, których kubatury mogą być częściowo ułożone w lodowcu (przykładem jest stacja NEEM / EGRIP ułożona w północno-wschodniej części ładolodu grenlandzkiego). Nie istnieją (stan na 2021 rok) arktyczne bazy militarne usytuowane na podłożu lodowym lub w nim zagłębione (ale istniały historycznie, np. bazy wojskowe Camp Century, Camp Fistclench zamknięte w 1966 roku).

Lód morski jest najrzadziej wykorzystywanym podłożem do budowy schronień. Powstaje w wyniku zamarzania wody morskiej. Jego grubość przyrasta od spodu, w mniejszym stopniu w wyniku zasilania śniegiem. Zasolenie zależne jest od tempa przyrostu, największe ma lód młody. Gęstość zależy od zasolenia, temperatury i porowatości. Gęstość lodu morskiego pozbawionego pęcherzyków powietrza mieści się w przedziale od 0,920 (małe zasolenie) do 0,977 (duże zasolenie) g/cm³, zależąc także od wieku (porowatości). Z tego względu lód morski wieloletni i lód szelfowy charakteryzują się mniejszą gęstością, rzędu 0,86 ÷ 0,89 g/cm³. Lód morski unosi 10 ÷ 14% swojej grubości nad powierzchnią wody, podlega dryfowi w wyniku działania wiatrów oraz prądów morskich. Zmienne warunki otoczenia oraz relokacja wpływają na zmiany grubości, ostatecznie prowadząc do dezintegracji. Lód pierwszoroczny osiąga grubość od 0,3 do 2 m, a jego powierzchnia jest nierówna. Podczas letniego topnienia powstają na nim liczne oraz regularnie rozmieszczone kałuże wody roztopowej. Organizatorzy periodycznego, wznoszonego na lodzie morskim na około miesiąc obozu Barneo Camp wymagają od lokalizacji wybranej na ładowisko jednolitej tafli lodu morskiego o długości co najmniej 2 km oraz grubości nie mniejszej niż 1,6 ÷ 1,8 m. Najbardziej przydatny do takich celów jest lód określany jako stary, czyli co najmniej dwuletni (grubość nie mniejsza niż 2,5 m, w przypadku postaci wieloletnich znacznie ponad 3 m). Lód stary ma także bardziej wygładzoną powierzchnię oraz większe rozmiary poszczególnych tafli lodu, często przekraczające 2, a czasem nawet 10 km średnicy [9].

Lód morski z definicji ma ograniczoną żywotność, niezależnie od swoich parametrów. Nawet ogromne fragmenty lodów szelfowych (na przykład lodowa wyspa Fletchera na Morzu Beauforta w Arktyce, powierzchnia 90 km², grubość

lodu do 50 m, na której w latach 1952-1978 umieszczano dryfujące stacje pogodowe oraz naukowe) ulegają ostatecznie stopnieniu. Tym samym, każda aktywność obozowa na lodzie morskim jest z definicji czasowa. Współcześnie, w wyniku zmian klimatu, który znacząco wpływa na zasięg oraz grubość lodu morskiego (przede wszystkim w Arktyce [13]), nie organizuje się już obozów dłuższych niż kilkutygodniowe. W 2015 roku ewakuowano oraz zamknięto obóz programu Siewiernyj Polus, który był ostatnią formą habitatu utrzymywaną na lodzie morskim Arktyki przez co najmniej kilka miesięcy (ostatni z obozów programu Siewiernyj Polus, znany jako NP-2015 funkcjonował od 18.04.2015 do 09.08.2015; został ewakuowany po 114 dniach od uruchomienia z powodu wyjątkowo ciepłego lata, powodującego znacznie szybsze odprzewidywane powstawanie rozlewisk na powierzchni lodu).

Ładolód oraz stabilne lodowce szelfowe stanowią bardziej sprzyjające podłoże dla użytkowanych przez wiele lat stacji. Za ładolód uznaje się grubą (maksymalnie 4 091 m n.p.m., Dome A, Antarktyda), licząc tysiące kilometrów kwadratowych powierzchnię pokrywą lodową, zalegającą na Antarktydzie oraz Grenlandii (w ograniczonym zakresie także w Andach). Ładolód w wyniku przyrostu masy, pod własnym ciężarem podlega płynięciu w kierunku swoich krawędzi (promieniście lub bocznie). Pomimo, że jest najbardziej stabilnym podłożem lodowym, niesie poważne zagrożenie dla budynków i budowli: stale przyrasta wskutek akumulacji śniegu, przez co poziom rzędnej terenu dookoła obiektów systematycznie rośnie. W konsekwencji ruchu lodu mogą pojawiać się pęknięcia, a nawet głębokie szczeliny zagrażające integralności budynków i bezpieczeństwu załóg. Budynki niewyposażone w systemy lewarujące ulegają z czasem pogrążeniu, następnie, w wyniku wysokiego ciśnienia wywieranego przez przyrastający poziom lodu, zniszczeniu [17]. **Lodowcami (lodami) szelfowymi** nazywane są brzeżne części ładolodu, które spłynęły na płytsze obszary przyległych mórz. W części odlądowej lód jest osadzony na dnie, a w części odmorskiej jest pływający. Krawędziowa część lodów szelfowych podlega fragmentacji (odłamywaniu się różnej wielkości gór lodowych). Lód szelfowy narasta w wyniku spływu lodowca ładowego oraz całorocznej akumulacji śniegu, który z czasem przekształca się w firn. Prowadzi to do wykształcenia trójwarstwowej struktury lodów szelfowych. Na powierzchni zalega śnieg o gęstości 0,30 ÷ 0,35 g/cm³, niżej znajduje się warstwa firnu o gęstości 0,45 ÷ 0,55 g/cm³ i najniżej lód lodowcowy o gęstości 0,86 ÷ 0,89 g/cm³. Lody szelfowe mogą charakteryzować się znaczną grubością, wystają ponad powierzchnię wody na od 2 do 50 m i więcej. Powierzchnia lodów szelfowych jest rozległa, płaska lub czasami lekko pofalowana, z małymi kątami nachylenia. Jest to zatem dobra baza do organizacji ładowisk oraz wznoszenia obiektów, które jednak nie są bezpieczne w dłuższej perspektywie czasowej. Przede wszystkim ze względu na powstawanie pęknięć podłoża, systematyczny dryf lodu i postępującą jego fragmentację, a także przyrost warstwy wierzchniej, analogiczny do ładolodu.

Stacje bez systemów lewarujących ulegają z czasem pogrążeniu, a pozostawione na odłamanym fragmencie lodu (górze lodowej) skazane są na zatopienie wraz z topiącym się podłożem. Aby temu zapobiegać, opracowano projekty stacji mobilnych (jedyna czynna w 2021 roku realizacja to brytyjski obiekt Halley VI), które można ewakuować z lodowca szelfowego

mającego odłączyć się od macierzystego lądolodu. Jak pokazuje praktyka, nawet takie rozwiązania nie gwarantują pełnego, w ujęciu długoterminowym, bezpieczeństwa.

Przykłady stacji oraz obozów funkcjonujących na podłożu lodowym, ze wskazaniem jego rodzaju:

- Barneo Camp (arktyczny periodyczny obóz terenowy) – lód morski,
- NEEM / EGRIP (arktyczna naukowa stacja sezonowa mobilna) – lądolód,
- Summit Camp (arktyczna naukowa stacja całoroczna) – lądolód,
- Concordia (antarktyczna naukowa stacja całoroczna) – lądolód,
- Halley VI (antarktyczna naukowa stacja mobilna) – lodowiec szelfowy,
- Neumayer III (antarktyczna naukowa stacja całoroczna) – lodowiec szelfowy.

Łączna liczba stacji o statusie całorocznym lub sezonowym (a zatem pomijając obozy terenowe) użytkowanych na lądolodzie oraz lodzie szelfowym jest bardzo mała [6]. Wskazać można zaledwie kilkanaście istotnych przykładów (łącznie na Antarktydzie oraz Grenlandii). Wynika to przede wszystkim z kosztów budowy oraz utrzymania, złożoności logistycznej i obsługowej systemów lewarujących lub wspomagających mobilność. Problemem jest także kształt linii brzegowej (skrajnie ograniczającej możliwości przeładunkowe), wysokość klifów, obciążenie wiatrami katabatycznymi, struktura lodu, jego przyrost oraz trudna do przewidzenia dynamika zachowania. Wyzwaniem jest również rozległość lądolodu grenlandzkiego oraz antarktycznego, przez co ich centralne części dostępne są tylko dla samolotów (śmigłowce transportowe mają zbyt krótki zasięg lotu) lub/oraz długotrwałych konwojów lądowych.

PODŁOŻE SKALNE

Obiekty budowlane rejonów polarnych kojarzone są w powszechnej świadomości społecznej jako stale funkcjonujące w warunkach permanentnego śniegu oraz lodu. Takie podejście nie ma potwierdzenia w stanie faktycznym. Zdecydowaną większość stacji oraz baz użytkowanych w Arktyce oraz Antarktyce zbudowano w lokalizacjach wolnych okresowo od pokrywy śnieżnej. Tym samym podstawowy rodzaj podłoża to skały, produkty ich wietrzenia oraz długoletniej akumulacji. Rozpatrując zbiór 76 aktywnych stacji antarktycznych, wyszczególnionych w katalogu COMNAP (*Council of Managers of National Antarctic Programs*) z 2017 roku (ostatnim dostępnym) [1], okazuje się, że tylko 9 z nich funkcjonuje na podłożu lodowym, co stanowi 12% zbioru. Proporcje te dla całego zbioru arktycznego są niemal o rząd wielkości mniejsze, wynosząc około 2%. Taki stan rzeczy trudno uznać za przypadek i należy założyć, że dobór lokalizacji podyktowany jest racjonalną oceną możliwych do uzyskania parametrów użytkowych, kosztów budowy i utrzymania obiektów. Wskazuje także na wyraźną różnicę w budowie wybrzeży Antarktydy oraz poddawanych długoterminowej erozji oraz akumulacji osadów wybrzeży lub wysp arktycznych. Za przykłady stałego podłoża skalnego można podać:

- nunataki wynoszące się ponad poziom lądolodu antarktycznego,
- oazy stanowiące skaliste obszary wolne od lodów wśród pokrywy lodowej kontynentu lub między lądolodem a lodowcem szelfowym,
- przybrzeżne urwiska lub skaliste półwyspy i wyspy.

Analiza stacji antarktycznych wyszczególnionych w katalogu COMNAP [1] wskazuje, że na Antarktydzie dominują realizacje oparte na stabilnym podłożu skalnym, wolnym sezonowo od śniegu oraz lodu. Występujące w takich miejscach skały to na ogół metamorficzne gnejsy (czasami miejscowo przykryte łupkiem), granity lub bazalty. Są to najczęściej skały lite, pokryte na powierzchni zwietrzeliną wieloblokową i drobnoblokową. Przykłady realizacji antarktycznych posadowionych na takim podłożu to:

- Troll (naukowa stacja całoroczna) – nunatak Jutulssessen,
- Princess Elisabeth (naukowa stacja sezonowa) – nunatak Utsteinen,
- SANAE IV (naukowa stacja całoroczna) – nunatak Vesleskarvet,
- Nowożarijewska (naukowa stacja całoroczna) – Oaza Schirmachera,
- Maitri (naukowa stacja całoroczna) – Oaza Schirmachera,
- Progress (naukowa stacja całoroczna) – Oaza Wzgórza Larsemanna.

Z kolei w Arktyce jednoznacznie przeważają obiekty budowlane, których podłoże określić można jako sedymentacyjne, tylko sezonowo pokryte śniegiem lub lodem.

STABILNE PODŁOŻE OSADOWE

Znaczna liczba stacji arktycznych, ale także niektóre antarktyczne, posadowione są na podłożu osadowym, które jest stabilne w okresie ich użytkowania. Najczęściej są to grunty rozdrobnione powstające w wyniku naturalnych procesów geologicznych (wietrzenie oraz rozdrobnienie mechaniczne skał pierwotnych). Przykładami takiego podłoża są związane wieczną zmarzliną i nie wykazujące zmian objętości: osady polodowcowe, kamienista glina morenowa, grunty sedymentacyjne z mułu morskiego (czwartorzędowego), rankery (słabo ukształtowane gleby kamieniste), piaski i żwiry oraz pospółka o różnym stopniu uziarnienia czy gleby wulkaniczne. Przydatność budowlana tych gruntów jest zróżnicowana, na ogół dobra. Do najlepszych należą być zagęszczone piaski różnoziarniste i żwiry oraz zwarte gliny. Do tej kategorii podłoża należy również zaliczyć spękaną w różnym stopniu lite skały osadowe, których jakość, jako podłoża budowlanego, ulega z czasem pogorszeniu. Żywotność budynków polarnych (poza utrzymywanyymi w dobrej kondycji, unikalnymi historycznie, które wpisano na listę Historycznych Miejsc i Pomników Antarktyki (ang. *HSM – Historic Sites and Monuments in Antarctica*)) zrealizowanych na stabilnym podłożu osadowym nie przekracza kilkudziesięciu lat. Przykłady:

- Jang Bogo (antarktyczna naukowa stacja całoroczna) – osady lodowcowe,
- Arctowski (antarktyczna naukowa stacja całoroczna) – pospółka, cząsteczki ilaste,

- Orcadas (antarktyczna naukowa stacja całoroczna) – skały osadowe,
- Alert (arktyczna całoroczna baza wojskowa / stacja naukowa) – łupki, kamienista glina.

NIESTABILNE PODŁOŻE SKALNE I OSADOWE

W przypadku jedynie okresowego występowania temperatury powietrza poniżej 0°C w skałach luźnych dochodzi do przemarzania wody w gruncie i wzrostu jego objętości. Głębokość i prędkość przemarzania zależy od struktury, tekstury, składu granulometrycznego gruntu oraz stopnia jego uwilgotnienia i okresowego zamoczenia. Wielkość niestabilności takiego podłoża zależy będzie również od okresu utrzymywania się ujemnej temperatury powietrza. Głębokość przemarzania determinuje głębokość fundamentowania budynków i budowli, a także potrzebę stosowania izolacji termicznych. Zachodzić może również potrzeba stosowania różnego rodzaju podbudów z gruntów stabilizowanych cementem lub bituminami. Określając grunty podatne na procesy wysadzinowe, przydatna była norma PN-86/B-02480 (została wycofana w 2011 r., a jako aktualną i zbieżną zakresem można podać PN-EN ISO 14688-1 oraz -2), a także nadal obowiązująca PN-S-02205. Do gruntów bardzo wysadzinowych, występujących w rejonie niektórych stacji arktycznych i antarktycznych, zalicza się: grunty pylasto-piaszczyste (często z kłami mrozowymi), różnego rodzaju depozyty polodowcowe, gliny i piaski bagniste w okresie letnim (piaski gliniaste, gliny piaszczyste, gliny pylaste, gliny zwięzłe pylaste i piaszczyste, pyły oraz ły). Do tego rodzaju gruntów należeć mogą również niektóre młode osady sedimentacji morskiej (lagunowe, plażowe, mierzejowe) i niektóre aluwia. W Stanach Zjednoczonych (bazując na publikacjach udostępnianych przez *US Army Corps of Engineers*) za najbardziej narażone na procesy wysadzinowe uznaje się wszystkie pyły (łącznie z pyłem piaszczystym), bardzo drobne piaski pylaste oraz zwięzłe gliny i ły [4]. Innego rodzaju niestabilnością charakteryzować się będą grunty zwietrzelinowe tworzące powierzchnie terenu o dużych nachyleniach. Na takich obszarach występować będą przemieszczenia w obrębie zboczy (stoków) gruntów, skał (w tym zwietrzelin) wskutek działania siły ciężkości, czyli ruchy masowe. Charakteryzując przydatność tego rodzaju gruntów jako podłoża budowlanego, można posłużyć się normą PN-EN 1997-1:2008, obejmującą zasady ogólne i metody projektowania geotechnicznego zgodnie z regułami podanymi w Eurokodzie 7. O ile w Antarktyce (na mocy Układu Antarktycznego [14]) nie istnieje przynależność terytorialna, to kraje mające swoje terytoria w Arktyce uregulowały szczegółowo wytyczne i normy dotyczące prac inżynierskich w warunkach gruntów wysadzinowych, ruchów masowych lub wiecznej zmarzliny. Przykłady realizacji posadowionych na omawianym podłożu:

- Ward Hunt Island (arktyczna stacja naukowa sezonowa) – łupki, kamienista glina,
- Thule Air Base (arktyczna baza wojskowa całoroczna) – skały, łupkowe, bitumiczne,
- Siewiernyj Klewier (arktyczna baza wojskowa całoroczna) – skały z warstwą osadową,
- Juan Carlos I (antarktyczna stacja naukowa sezonowa) – łupek ilasty, szarogłaz.

WIECZNA ZMARZLINA

Problematyka wiecznej zmarzliny (*permafrost*) jest bardzo szeroka, dotyczy ogromnych obszarów, a jej badaniu poświęcono stulecia obserwacji. Jednocześnie (co należy uznać za zrozumiałe) dla polskich projektantów budowlanych jest na ogół pojęciem enigmatycznym. Wieczna zmarzlina występuje na znacznej części półkuli północnej oraz wszystkich obszarach Antarktydy, na których grunty nie są stale pokryte lodowcami lub łądolodem. Zmarzlina zajmuje około 23 mln km² półkuli północnej, co stanowi blisko 24% całej powierzchni jej łądów. Między innymi 80% Alaski, 65% Syberii, przeważającą część północnej Kanady, a nawet północną Mongolię. Występuje także w rejonie Alp, Gór Skandynawskich, łańcucha Tien-szan, a nawet na Suwalszczyźnie (na głębokości 357 m).

Za zmarzlinę wieloletnią uważa się grunt będący konglomeratem skał, osadów i lodu, który pozostaje w stanie przemarznięcia co najmniej dwa lata [11]. Występuje w postaci ciągłej, nieciągłej oraz sporadycznej. O ciągłości decyduje średnia temperatura roczna, która nie może być wyższa od -5°C w przypadku zmarzliny ciągłej oraz mieścić się w zakresie od -1°C do -5°C w przypadku nieciągłej. Zmarzlina powstaje w chłodnym oraz suchym klimacie, co oznacza, że nie następuje stała penetracja gruntu wodami opadowymi. Miąższość zmarzliny wynosi na Syberii nawet 1450 m (rejon miasta Ojmiakon, Republika Sacha), odpowiednio w Kanadzie 1000 m (Wyspa Ellesmere'a). Zmarzlina o tak znacznej grubości jest pozostałością kontynentalnego zlodowacenia czwartorzędowego, nazywanego potocznie epoką lodowcową. Najczęściej jednak jej miąższość nie przekracza kilkudziesięciu metrów. Temperatura zmarzliny jest zróżnicowana, rzadko jednak niższa niż -6°C. To jednak wystarcza, by znacząco utrudniać aktywność budowlaną, w tym podziemną oraz związaną z pracami górniczymi. Z budowlanego punktu widzenia bardzo istotne jest, że na znacznych obszarach występowania zmarzliny rozmarza powierzchniowo w okresie lata. Nawet do 2 m, co generuje problemy użytkowe w przypadku wzniesionych na niej budynków, budowli, infrastruktury, wszelkich metod transportu. W wyniku powierzchniowego rozmarznięcia powstaje warstwa błota, w której dodatkowo kumuluje się opad atmosferyczny. Woda nie jest w stanie wsiąkać, ponieważ jest blokowana zamrożoną głębiej warstwą podłoża objętą zmarzliną. Transport kołowy staje się utrudniony, w wielu sytuacjach wręcz niemożliwy. Obiekty wznoszone na okresowo rozmarzającej warstwie wierzchniej muszą być oparte na głębszych, stale stabilnych warstwach zmarzliny. Sposób posadowienia musi przy tym w możliwie największym stopniu zabezpieczać grunt przed przyjmowaniem ciepła wytwarzanego przez budynki oraz aktywność w ich otoczeniu. Dotyczy to także placów manewrowych pojazdów, płyt postojowych samolotów, sieci przesyłowych.

Na znacznych obszarach objętych wieczną zmarzliną (Rosja, Alaska, północna Kanada) występuje *termokras*. Jest to obszar pokryty licznymi jeziorami wypełnionymi wodą pochodzącą z wytapiania lodu, która nie może odpłynąć ani wsiąkać, bardzo słabo (z uwagi na warunki klimatyczne) odparowuje. W konsekwencji ogromne połacie terenu są trudnodostępne nawet dla śmigłowców. Aktywność budowlana w takich warunkach jest praktycznie niemożliwa, rzadko powstają tam obiekty inne niż sieci przesyłowe (elektryczne, transportujące węgl-

wodory). Pomimo tak licznych problemów, analiza podłoży na jakich wzniesiono obiekty polarne wskazuje, że jeśli nie znajdują się na zwartych skałach, lądolodzie, lodowcu szelfowym lub lodzie morskim, funkcjonują na gruntach objętych wieczną zmarzliną. W zasięgu *permafrost* znajduje się także wiele ośrodków zurbanizowanych. W tym niektóre osady skandynawskie, kanadyjskie, alaskańskie, ale przede wszystkim znaczna liczba miast rosyjskich (wieczna zmarzlina występuje na obszarze około 11 mln km² Rosji, co stanowi ponad 60% jej terytorium), na przykład Workuta, Norylsk, Pewek. Problemy użytkowe, wynikające z występowania wiecznej zmarzliny, dotyczą ośrodków miejskich położonych nawet daleko na południe od Kręgu Polarnego, w tym Nowosybirsk (55°02'N), Irkucka (52°17'N), Ułan Ude (51°50'N). Wznoszenie budynków oraz budowlę wymaga w tych warunkach zastosowania dedykowanych technologii, które doskonalone były przez dekady. Jednocześnie harmonogramy prowadzenia robót ziemnych muszą zapobiegać odkrywaniu zmarzliny w miesiącach letnich, co prowadzić może do jej trwałej destabilizacji. W Arktyce standardem jest posadowienie budynków na palach, zabezpieczanie gruntu warstwami izolacji termicznej w celu redukcji pochłaniania ciepła oddawanego przez budynki. Stosowano nawet wielkoskalowe kanały pod posadzkami oraz płytami manewrowymi, którymi tłoczono zimne powietrze schładzające grunt (*Thule Air Base* na Grenlandii). W omawianym kontekście na szczególną uwagę zasługuje sieć kanalizacyjna oraz wodociągowa obsługująca miasto Utqiagvik (Alaska, USA; do 2016 roku znane jako Barrow), będąca unikalnym przykładem złożonej infrastruktury funkcjonującej w warunkach *permafrost*. Przykłady realizacji arktycznych, przy budowie których zastosowano wydajne metody wznoszenia budynków na wiecznej zmarzlinie, to:

- Nagurskoje (rosyjska baza wojskowa),
- Arktyczeskij Trilistnik (rosyjska baza wojskowa),
- Thule Air Base (amerykańska baza wojskowa usytuowana na Grenlandii),
- Siewiernyj Klewier (rosyjska baza wojskowa),
- Ostrow Samojłowski (rosyjska stacja naukowa),
- Utqiagvik (amerykańskie miasto na Alasce).

W wyniku transformacji klimatycznych zasięg występowania wiecznej zmarzliny, a także jej charakter zmieniają się dynamicznie w ostatnich dekadach. Zmarzlina jako pochodna klimatu jest wrażliwa na jego zmiany [11], co dotyczy także torfowisk pokrywających znaczne jej obszary. Przez tysiąclecia gromadziły się w nich ogromne ilości materii organicznej oraz gazów, w tym cieplarnianych [12]. Topnienie zmarzliny powoduje ich uwalnianie, a beztlenowe przemiany materii organicznej powodują wydzielanie metanu, który jest gazem silnie cieplarnianym od CO₂. Wyplukiwana materia organiczna trafia także do Oceanu Arktycznego, zmieniając jego skład chemiczny. Jednocześnie zmienia się bilans wodny, co wpływa na temperaturę oraz zasolenie, w konsekwencji zmianie ulega tempo oraz zakres cyrkulacji. Destabilizacja wiecznej zmarzliny jest jednym z czynników modyfikujących charakterystykę akwenu, który jest ważnym czynnikiem kształtującym pogodę na całej półkuli północnej. Nie pozostaje to bez wpływu na globalną gospodarkę, której budownictwo jest integralną częścią. Z badań wynika, że w rejonie Utqiagvik, na przełomie jesieni i zimy w latach 2012-2014 tundra emitowała do atmosfery około 73% CO₂ więcej niż w latach 70. XX wieku [3].

Procesy projektowania, budowy oraz eksploatacji budynków oraz budowli sytuowanych w wysokich szerokościach geograficznych komplikują zagadnienia prawne, ekonomiczne i techniczne. Podstawowe ograniczenia dla projektantów, administratorów oraz użytkowników są jednak pochodną właściwości lokalnego środowiska. Jedną z ważnych jego cech, jednocześnie słabo rozpoznaną w piśmiennictwie krajowym, jest przydatność z budowlanego punktu widzenia podłoża występującego w Arktyce oraz Antarktyce. Rejony te, odległe geograficznie oraz mentalnie w przypadku inżynierów pracujących na co dzień w strefie klimatów umiarkowanych, nabierają coraz większego znaczenia politycznego i gospodarczego [5]. Jedną z konsekwencji zachodzących zmian środowiskowych jest wzrost dostępności arktycznych szlaków morskich. Jednocześnie rośnie zainteresowanie kontynentem antarktycznym, do badań nad którym dołączają kolejne kraje. Przekłada się to na wzrost aktywności budowlanej obszarów polarnych. W konsekwencji niezbędne staje się angażowanie specjalistów świadomych problematyki polarnej z zakresu logistyki, energetyki, nauk przyrodniczych, ochrony środowiska, inżynierii morskiej, inżynierii lądowej, a nawet architektury. W tym kontekście, ramowe omówienie rodzajów podłoża występującego w warunkach polarnych, które jest nietypowe w tradycyjnym rozumieniu, a którego parametry bezpośrednio determinują zestaw cech ogólnobudowlanych realizacji obiektów polarnych, może okazać się przydatne. Między innymi dla inżynierów, których zakres aktywności lub zainteresowań dotyczy także wysokich szerokości geograficznych Ziemi.

LITERATURA

1. Antarctic Station Catalogue. COMNAP, Nowa Zelandia, sierpień 2017.
2. Arktyka na początku XXI wieku. Red. Łuszczuk M., Lublin 2013.
3. Carbon dioxide sources from Alaska driven by increasing early winter respiration from Arctic tundra. PNAS, National Academy of Sciences, 2017.
4. Kaczyński R. R.: Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze Polski. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2017.
5. Kubiak K.: Interesy i spory państw w Arktyce w pierwszych dekadach XXI wieku. Wydawnictwo TRIO, Warszawa 2012.
6. Kuryłek A.: Architektura w środowisku ekstremalnym. Stacje polarne. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2020.
7. Marsz A. A., Styszyńska A.: Klimat rejonu polskiej stacji polarnej w Hornsundzie. Gdynia 2007.
8. Marsz A. A.: Zmiany pokrywy lodów morskich Arktyki na przełomie XX i XXI wieku i ich związek z cyrkulacją atmosferyczną. W: Problemy Klimatologii Polarnej 18, Polska Akademia Nauk, Warszawa 2008.
9. Materiały zebrane na potrzeby Uniwersytetu Morskiego w Gdyni (Akademii Morskiej w Gdyni) przez Panią prof. Annę Styszyńską. Materiał oparto na międzynarodowej terminologii lodowej, wydanej przez WMO (WMO Sea-ice Nomenclature — WMO/OMM/BMO — Nr 259, 1970 r.; Suplement Nr 5, 1989).
10. Protokół o ochronie środowiska do Układu w sprawie Antarktyki, sporządzony w Madrycie 4 października 1991 r., tzw. Protokół Madrycki (ang. *The Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty*), obowiązujący od roku 1998.

11. Replewska-Pękalowa J., Pękała K.: Zmiany klimatu w Antarktyce. W: Zmiany klimatyczne w Arktyce i Antarktyce w ostatnim pięćdziesięcioleciu XX wieku i ich implikacje środowiskowe, Red. Styszyńska A., Marsz A.A., Gdynia 2007.
12. Schuur T.: Prognoza dla wiecznej zmarzliny; Świat Nauki, styczeń 2017.
13. Styszyńska A., Marsz A., Góry lodowe Arktyki. W: Zmiany klimatyczne w Arktyce i Antarktyce w ostatnim pięćdziesięcioleciu XX wieku i ich implikacje środowiskowe. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Morskiej, Gdynia 2007.
14. Układ Antarktyczny podpisany w Waszyngtonie 1 grudnia 1959 r. (ang. *Antarctic Treaty*).
15. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz.U. 1994 Nr.89, poz. 414 z późniejszymi zmianami).
16. Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. Prawo lotnicze (Dz. U. 2020.1970 t.j.).
17. Weale J., Barna L., Tobiasson W., Mercer J.: Elevated Building Lift Systems on Permanent Snowfields, US Army Corps of Engineers, September 2014.