

Patrycja FABIJAŃSKA

Maciej DĄBSKI

Uniwersytet Warszawski

Wydział Geografii i Studiów Regionalnych

e-mail: p.fabijanska@student.uw.edu.pl

e-mail: mfdabski@uw.edu.pl

FOTOGRAFIA LOTNICZA JAKO NARZĘDZIE DO IDENTYFIKACJI KOPALNYCH POLIGONÓW MROZOWYCH – PRZEGLĄD LITERATURY

Aerial photography as a tool in identification of fossil frost polygons - literature review

Zarys treści: Artykuł dotyczy wykorzystania fotografii lotniczej jako narzędzia pomocnego w identyfikacji kopalnych poligonów mrozowych i ma charakter przeglądu literatury. W Polsce badania dotyczące tego tematu prowadzone są od lat siedemdziesiątych XX wieku i w większości obejmowały obszar Wielkopolski (teren młodoglacjalny), gdzie kliny wytworzone zostały w glinie zwałowej zlodowacenia Wisły i wypełnione zostały osadem piaszczystym. W celu ujęcia zagadnienia w szerszym aspekcie autorzy przytaczają również przykłady i metody, które zostały zastosowane na innych obszarach poza granicami Polski. Obecność obiektów antropogenicznych (współczesnych i archeologicznych) utrudnia niekiedy wykrycie poligonów mrozowych. W sprzyjających warunkach uwilgotnienia gleby i użytkowania terenu, fotografia lotnicza oparta na rejestracji promieniowania widzialnego ułatwia kartowanie zasięgu kopalnych struktur mrozowych świadczących o występowaniu plejstocenijskiej wieloletniej zmarzliny.

Abstract: The article is a literature review concerning the use of aerial photography in identifying fossil frost polygons. In Poland, research on this topic has been conducted since the 1970s and concentrated in Wielkopolska (a young-glacial area), where sand wedges formed in the glacial till of Wisła Glaciation. In order to cover the issue in a broader sense, the authors also provide examples and methods that have been applied in other areas of outside Poland. The presence of anthropogenic objects (modern and archaeological), sometimes makes it difficult to detect frost polygons. Under favorable conditions for soil moisture and land use, aerial photography based on visible radiation facilitates the mapping of fossil frost structures that indicate the occurrence of Pleistocene permafrost.

Słowa kluczowe: permafrost, poligony mrozowe, fotointerpretacja, plejstocen

Key words: permafrost, frost polygons, photointerpretation, Pleistocene

Wpłynęło: 23.02.2019

Zaakceptowano: 30.06.2019

Zalecany sposób cytowania/ Cite as: Fabijańska P., Dąbski M., 2019, Fotografia lotnicza jako narzędzie do identyfikacji kopalnych poligonów mrozowych – przegląd literatury, *Prace i Studia Geograficzne*, 64.3, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 37-47.

WSTĘP

Możliwości identyfikacji kopalnych poligonów mrozowych z poziomu powierzchni Ziemi są utrudnione ze względu na ich duże wymiary oraz przykrycie utworami powierzchniowymi. Struktury te tworzą w planie poligony o średnicy od kilku do kilkudziesięciu metrów, a ich powierzchnia jest zależna od materiału, w którym się wykształciły (Goździk 1973) i współczesnych procesów geomorfologicznych. Techniki teledetekcyjne umożliwiają skartowanie wspomnianych struktur dzięki różnicom wilgotnościowym pomiędzy materiałem, w którym poligony się wykształciły, a materiałem wypełniającym kliny. Kontrasty te podkreśla odpowiednia roślinność (tzw. znaczniki roślinne) np.: pszenica, jęczmień czy lucerna, które szybciej dojrzewają w suchych, piaszczystych wypełnieniach klinów wytworzonych w glinie zwałowej (Bogdański, Kijowski 1990) lub lepiej zakorzeniają się w wilgotnym, drobnoziarnistym osadzie wypełniającym kliny (Christensen 1974). Rejestrowanie występowania poligonów mrozowych pokrywających się z zasięgiem wieloletniej zmarzliny, jest niezwykle istotnym tematem, ponieważ są one wyznacznikiem warunków klimatycznych, które w przeszłości panowały na danym terenie (Dąbski i in. 2008).

Celem artykułu jest przegląd literatury pod kątem przedstawienia i porównania wybranych metod teledetekcyjnych służących do identyfikacji kopalnych plejstocentrycznych poligonów mrozowych. Do porównania autorzy zdecydowali się wykorzystać następujące kryteria (Tabela 1): miejsce wykonania zdjęć, utwory, w których wykształciły się struktury, sposób użytkowania gruntu, pora roku, w której wykonano zdjęcia, rodzaj zdjęć (pionowe lub ukośne), skala, w jakiej wykonano zdjęcia oraz rodzaj użytego filmu.

DOŚWIADCZENIA Z BADAŃ PROWADZONYCH NA TERYTORIUM POLSKI

Pierwszym badaczem, który już w latach siedemdziesiątych XX w. podjął próbę kartowania poligonów mrozowych w Polsce był H. Gawlik (1970). Swoje prace skoncentrował w środkowej Polsce, na obszarze starogłacjalnym (Gilewska 1999), w okolicach Łodzi (Nowostany, Walewice), gdzie obecność struktur wieloboków była znana od dawna (Dylik 1963, Goździk 1973) i wiązano ją z okresem plenivistuliańskim (MIS2). Wykonano czarno-białe zdjęcia panchromatyczne w postaci odbitek stykowych w skali 1:12 000 (Nowostany) oraz 1:10 000 (Walewice). Rezultat pierwszej próby wykorzystania zdjęć lotniczych okazał się negatywny, zdjęcia nie wykazały zmiany fototonu, która potwierdziłaby hipotezę o istnieniu w podłożu struktur mrozowych (Gawlik 1970). Ten sam autor przeprowadził analogiczne badania w Zapolicach (okolice Zduńskiej Woli). Czarno-białe odbitki stykowe panchromatycznych pionowych zdjęć lotniczych w skali 1:10 000 wykazały, że na tle jasnego fototonu istnieją ciemniejsze smugi tworzące siatkę podobną do poligonalnego układu szczelin mrozowych. Średnica plamek w przeliczeniu na wielkości rzeczywiste wyniosła około 3 m. Dla potwierdzenia przeprowadzono prace ziemne, które uzasadniły obecność vistuliańskich poligonów mrozowych rozwiniętych w glinie moreny dennej, stadiału Warty zlodowacenia środkowopolskiego Odry. Rozpoznane szczeliny o wymiarach 0,1–0,25 m wypełniał drobny i mułkawy piasek (Gawlik 1970).

Tabela 1. Zestawienie publikacji wykorzystanych w artykule
Table 1. List of publications used in the article

Autor <i>Author</i>	Lokalizacja obiektu badawczego <i>Wedge site location</i>	Utwory <i>Sediments</i>	Sposób użytkowania gruntu <i>Type of land use</i>	Data wykonania zdjęcia <i>Date of image acquisition</i>	Rodzaj zdjęcia <i>Type of image</i>	Skala zdjęcia <i>Scale of image</i>	Rodzaj filmu <i>Spectral characteristics of image</i>
R. B. G Williams (1964)	Anglia, Breckland	piasek	polna uprawna wzrosowska		pionowe ukośne	Ok. 1:2500	
H. Gawlik (1970)	Okolice Zduńskiej Woli - Zapolice	głina zwałowa ze złodowacenia środkowopolskiego; kliny wypełnione piaskiem	polna uprawna			1:10 000	czarno białe panchromatyczne
A. V. Morgan (1971)	Anglia, Wolverhampton	głina zwałowa z ostatniego złodowacenia; kliny wypełnione piaskiem	jęczmień, owies	28.07. 1967 04.08.1969	ukośne pionowe		
W. Coast H. Svensson (1973)	Szwecja, okolice Laholm	fluwioglacjalne z ostatniego złodowacenia	kukurydza	maj-czerwiec, sierpień 1947r.	pionowe	1:20 000 1:30 000	
L. Christensen (1974)	Południowo-zachodnia Dania	piaszczysto-żwirowy z ostatniego złodowacenia	jęczmień, owies	czerwiec-lipiec 1973r.	ukośne		kolorowy, podezwień
P. Bogdański, A. Kijowski (1990)	Okolice Poznania – Suliejewo, Grabianowo	głina zwałowa z ostatniego złodowacenia	lucerna jęczmień	lipiec-sierpień	ukośne	1:5 000 1:10 000	panchromatyczne, kolorowe, podezwień
W. H. Johnson (1990)	Stany Zjednoczone, Illinois	piaski, glina zwałowa przykryta lesem; osady ostatniego złodowacenia i wcześniejszego (MIS6-MIS2), kliny piaszczyste	polna uprawna		pionowe	1:22 000 1:25 000 1:28 000 1:35 000	
S. Kozarski (1993, 1995)	Dornowo, Grabianowo, Suliejewo, Gądkki, Pigłowiec, Włoszakowice	głina zwałowa i drobnziarniste osady fluwioglacjalne z ostatniego złodowacenia; kliny wypełnione piaskiem	polna uprawna	09.06.1976 27.06.1983 30.06.1983 09.06.1992	pionowe	1: 1000 1: 2500 1:5 000 1:10 000 1:25 000	czarno białe kolorowe
J. C. Walters (1994)	Stany Zjednoczone, Iowa	hupki trzawowe, muki piaszczyste	pszenica, lucerna		ukośne		
I. Heysse, G. Chysels (2003)	Belgia, Flandria	utwory piaszczysto gliniaste, osady czwartorzędowe	polna uprawna	późna wiosna, lato	ukośne		kolorowy
Dąbski i in. (2008)	Okolice Kruszwicy – Chelmiczki, Wielki Sławsk	głina zwałowa z ostatniego złodowacenia; kliny wypełnione piaskiem cieższym	polna uprawna (zboże)	2000-2005	ukośne		kolorowe
A. Kijowski i in. (2012)	Wielkopolska	głina zwałowa z ostatniego złodowacenia; kliny wypełnione piaskiem cieższym	polna uprawna		ukośne	1:500 1:2000	kolorowe
M. Ewertowski i in. (2017)	Okolice Poznania	głina zwałowa i osady fluwioglacjalne z ostatniego złodowacenia; kliny wypełnione piaskiem	polna uprawna	2010-2014	ukośne	1:500 1:2000	kolorowe

Źródło: opracowanie własne
Source: author's elaboration

Badania kopalnych struktur mrozowych w Polsce podejmowano głównie na obszarach młodoglacjalnych. Najczęściej wybieranym obszarem była Wielkopolska, gdzie wytworzone w glinach kliny miały wypełnienie piaszczyste. Do fotografowania poligonów naukowcy wykorzystywali w przeważającej części kamery rejestrujące obraz w zakresie promieniowania widzialnego. Prace związane z identyfikacją struktur peryglacjalnych przeprowadzono w ośrodku poznańskim (Bogdański, Kijowski 1990). Struktury wykształciły się w glinie zwałowej fazy leszczyńskiej stadiału głównego ostatniego zlodowacenia. W okolicach Poznania (Sulejewo, Grabianowo), w strefie fazy leszczyńskiej ostatniego zlodowacenia, wykonano pionowe zdjęcia lotnicze w skalach 1:5 000 oraz 1:10 000 na terenach pól uprawnych lucerny i jęczmienia. Skartowano sieci poligonów należących do dwóch generacji spękań. Pierwsza z nich to duże poligony o długości boków dochodzących do około 15 m, druga to mniejsze poligony o średnicy boków około 4 m. Dzięki pracom ziemnym stwierdzono, że około 60 cm pod powierzchnią znajdują się górne części klinów mrozowych wypełnione drobnym piaskiem. Prace te kontynuował S. Kozarski (1993, 1995) w okolicach stolicy Wielkopolski, wybierając miejscowości Sulejewo i Grabianowo, ale również m.in. Dormowo, Gądki, Dobczyn, Pigłowice i Włoszakowice. Wykonano zdjęcia czarno-białe i kolorowe w skalach 1:1 000, 1:2 500, 1:5 000. Długości boków poligonów, które zidentyfikowano były zróżnicowane i wynosiły od 3,3 do 17,2 m, natomiast ich wielkość uzależniona była od generacji spękań. Górne części klinów znajdowały się około 0,5 m pod powierzchnią terenu, pod piaszczystą pokrywą ablacyjną, czasami również warstwą gliny zwałowej i osiągały szerokości do 0,8 m (Kozarski 1995).

Poligony mrozowe na zdjęciach lotniczych często są rejestrowane podczas prac prowadzonych przez archeologów. Niekiedy utrudniają interpretację obiektów antropogenicznych, a więc stanowią zbędne tło do badań archeologicznych (Nowakowski i in. 2005). M. Dąbski i in. (2008), na podstawie ukośnych zdjęć lotniczych uzyskanych dzięki uprzejmości archeologa, prof. W. Rączkowskiego (Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu), prowadzili badania na terenach młodoglacjalnych w miejscowości Chełmiczki i Wielki Sławsk (okolice Kruszwicy, Pojezierze Kujawskie). Na kolorowych zdjęciach wykonanych w latach 2000–2005 widoczne są fragmenty sieci poligonów (Ryc. 1). Dla potwierdzenia peryglacjalnego pochodzenia struktur, przeprowadzono prace ziemne. Poligony wykształciły się w glinie zwałowej fazy poznańskiej i były wypełnione piaskiem pochodzenia eolicznego. W miejscowości Chełmiczki kliny mrozowe znajdowały się na głębokości 1,1 m i miały szerokość 0,15–0,35 m. W Wielkim Sławsku stropy klinów uwidaczniały się tuż pod poziomem próchnicznym i osiągały szerokość 0,3–0,6 m. Struktury wykształciły się w glinie morenowej. Ich obecność potwierdza istnienie wieloletniej zmarzliny oraz dosyć długi okres utrzymywania się warunków peryglacjalnych na obszarze Pojezierza Wielkopolskiego (Kozarski 1995, Dąbski i in. 2008, Dąbski 2011).



Ryc. 1. Poligony mrozowe w okolicy Kruszwicy (Wielki Sławsk)

Fig. 1. Ice-wedge polygons in the Kruszwica vicinity (Wielki Sławsk)

Źródło: fot. prof. W. Rączkowskiego (UAM).

Source: photo by Prof. W. Rączkowski (UAM).

Kolejne badania nad problematyką wykrywania kopalnych poligonów mrozowych na zdjęciach lotniczych podjęli A. Kijowski wraz zespołem (Kijowski i in. 2012). Na terenach Wielkopolski wykonano serie zdjęć w różnych porach roku w celu zweryfikowania optymalnej fazy okresu wegetacyjnego oraz warunków wilgotnościowych do rozpoznania poligonów mrozowych. Zdjęcia w skalach 1: 500 oraz 1: 2 000 wykonano z różnych wysokości (200–400 m) za pomocą kamery rejestrującej w zakresie promieniowania widzialnego. Wykorzystując kolor i kształt ukazany na zdjęciach, zidentyfikowano trzy typy poligonów:

- regularne z 4–8 krawędziami, w niektórych z nich znajdowały się mniejsze poligony,
- nieregularne z nieregularnymi krawędziami, zidentyfikowane głównie na stokach o niewielkim nachyleniu,
- inne struktury bez wyraźnego kształtu poligonów.

Kolor poligonów był ciemniejszy lub jaśniejszy od otaczających osadów i zależał od warunków wilgotnościowych panujących w glebie. Struktury były łatwo dostrzegalne, kiedy pokrywa roślinna była dosyć niska (w pierwszej fazie wzrostu rośliny) lub po żniwach i po pierwszej orce, wówczas ziemia była świeża i bez pokrywy roślinnej. Warto wspomnieć, że oprócz zdjęć lotniczych, w dwóch obszarach badawczych autorzy (Kijowski i in. 2012) wykorzystali też georadar (GPR – ang. *ground-penetrating radar*), który jest wrażliwy na małe zmiany wilgotności osadów. Z tego powodu powinno się przeprowadzać pomiary tego samego dnia, aby zachowane były identyczne warunki panujące w glebie. Zastosowano również analizy przestrzenne oparte o Systemy Informacji Geograficznej (GIS): przeprowadzono digitalizację zdjęć, a także opracowano bazę danych zawierającą informację na temat nachylenia oraz ekspozycji stoku. Kończącym etapem analiz było zbadanie zależności pomiędzy typami struktur a właściwościami terenu.

Ostatnie prace na obszarze Wielkopolski (okolice Poznania) przeprowadzili M. Ewertowski z zespołem (Ewertowski i in. 2017). W latach 2010–2014 wykonano ponad 4 000 zdjęć lotniczych

z wysokości 200–400 m, z czego większość była ukośna. Skala zdjęć to 1:500 oraz 1:2 000 w zależności od wysokości fotografowania. Zdjęcia zrobiono podczas różnych momentów okresu wegetacyjnego. Badaczom zależało na znalezieniu możliwie jak najbardziej odpowiednich warunków wegetacyjnych i wilgotnościowych gruntu do identyfikacji poligonów. Zidentyfikowano ponad 400 miejsc z poligonami. Bazując na geometrii i topologii, wyróżniono siedem głównych typów poligonów mrozowych różniących się wielkością oraz kształtem. Najwięcej poligonów zarejestrowano na równinach przykrytych gliną zwałową, w której wykształciły się szczeliny z pierwotnym wypełnieniem piaszczystym. M. Ewertowski i in. (2017) podkreślają rolę kontrastu w uwilgotnieniu gliny i piasku oraz użytkowaniu rolniczym (zboża) jako kluczowych warunków umożliwiających wykrycie poligonów. Niestety nie podają oni dokładniejszej informacji o rodzaju upraw, miesiącu ani warunkach atmosferycznych poprzedzających wykonanie zdjęć na których widoczne były kopalne poligony mrozowe.

DOŚWIADCZENIA Z BADAŃ PROWADZONYCH POZA TERYTORIUM POLSKI

Jedną z pierwszych prób identyfikacji kopalnych poligonów mrozowych na zdjęciach lotniczych poza Polską podjął R.B.G Williams (1964). Prowadząc badania we wschodniej Anglii zidentyfikował trzy rodzaje gruntów strukturalnych: poligony, labirynty i pasy. Na obszarach pól uprawnych oraz wrzosowisk wykonano ukośne i pionowe zdjęcia w skali około 1:2500 (Williams 1964).

Niespełna siedem lat później, w okolicy angielskiego miasta Wolverhpton, na polach uprawnych jęczmienia i owsa A. V. Morgan (1971) zaobserwował poligony z wypełnieniem piaszczystym wytworzone w glinie zwałowej. Wykonano zdjęcia ukośne oraz pionowe na następujących wysokościach: 154 m i 1609 m (Morgan 1971).

W. Coast i H. Svensson (1973) przeprowadzili prace terenowe na południu Szwecji, w okolicach Laholm. Obszar ten pokrywają osady fluwiogłacialne, występują tam również niewielkie jeziora polodowcowe. Wykonano pionowe zdjęcia lotnicze w skalach 1: 20 000 oraz 1: 30 000. Początkowo zaobserwowano poligony na zdjęciach pochodzących z okresu suszy w czasie od maja do czerwca 1947 r., jednak podczas nalotów w późniejszych latach poligony nie były widoczne – udało się zidentyfikować jedynie siatkę nieregularnych linii. Ponowiono badania w sierpniu tego samego roku. Na niektórych polach kukurydzy uwidoczniły się różnice w dojrzewaniu wspomnianej rośliny, jednak znowu nie zidentyfikowano wyraźnych linii świadczących o poligonach. W 1973 r. podczas wyjątkowo suchego lata, w okresie czerwiec-lipiec, przeprowadzono dwa loty na wysokości 150–200 m. Tym razem wykonano ukośne zdjęcia pól uprawnych. Stosowano kamerę rejestrującą obraz w zakresie promieniowania widzialnego oraz w podczerwieni. Zdjęcia kolorowe dostarczyły bardziej szczegółowego materiału do dalszych analiz. We wschodniej i środkowej części Równiny Laholm na zdjęciach lotniczych wykonanych w promieniowaniu widzialnym dały się zaobserwować wyraźnie rozwinięte wzory wielokątów. W zachodniej części regionu wyraźne struktury były słabiej zachowane. Przeprowadzono badania terenowe, z których wynika, że wypełnienia po klinach lodowych składają się głównie z bardziej drobnoziarnistego materiału niż osady, w których się wykształciły. Materiał wypełnień klinów posiada większe własności kapilarne niż otoczenie, dzięki temu zapewnia roślinom większą wilgotność, a co za tym idzie lepsze warunki wzrostu w okresach suszy. Nie wszędzie na terenie Równiny Laholm dało się zaobserwować poligony. W niektórych obszarach środkowej i wschodniej części równiny pojawiała się duża nieregularność linii i brak wielokątów, co

wynika głównie z cech topograficznych: doliny, niskie wzniesienia (w północnej części) (Coast, Svensson 1973).

W 1974 r. L. Christensen skupił swoje badania na terenie południowo-zachodniej Danii. W okresie lipiec–sierpień wykonano ukośne zdjęcia lotnicze z zastosowaniem filmu panchromatycznego, kolorowego oraz podczerwieni. Na polach uprawnych jęczmienia i owsa sfotografowano poligony wykształcone w utworach piaszczysto-żwirowych, będące pseudomorfozami po klinach lodowych (Christensen 1974).

Badania na temat identyfikacji poligonów mrozowych prowadzono także w Stanach Zjednoczonych. W 1990 r. W. H Johnson wykrył wspomniane struktury w stanie Illinois. Wykonano serie zdjęć pionowych w skalach 1: 22 000, 1: 25 000, 1: 28 000 oraz 1:35 000. Poligony wytworzyły się w podłożu piaszczystym lub gliniastym (głina zwałowa przykryta lessem) na obszarach młodo- i starogłacialnych. Kliny miały wypełnienie piaszczyste.

J. C Walters (1994), prowadził badania w hrabstwie Black Hawk (Iowa, Stany Zjednoczone), gdzie na 12 stanowiskach badawczych zaobserwował 183 kliny wypełnione osadami bardzo drobnymi. Do dokładniejszych badań wybrano 80 klinów. Sfotografowane na zdjęciach ukośnych poligony dało się zauważyć dzięki zróżnicowanej fazie wzrostu roślinności. Często w środku dużych poligonów znajdowały się mniejsze. Średnice struktur wynosiły od 10 do 50 metrów. Głębokość klinów wynosiła od około 0,9 m do około 3 m (średnio 1,84 m), natomiast ich szerokość znajdowała się w przedziale 0,52–1,8 m. Wykształcone w łupkach triasowych kliny wypełnione mułkami piaszczystymi zachowywały wilgoć lepiej niż otoczenie. Z tego powodu wzrost upraw takich jak pszenica czy lucerna, jest bardziej intensywny, a uprawy rosnące nad nimi na zdjęciach pojawiają się w ciemniejszych fototonach niż sąsiednie uprawy poza klinami (Walters 1994).

Badania nad poligonami mrozowymi prowadzono również w Belgii. I. Heyse oraz G. Ghysels (2003) wykonali ukośne zdjęcia lotnicze oraz przeprowadzili prace terenowe pomiędzy Niziną Coastal a Doliną Flemish. Obszar pokryty jest utworami piaszczysto-gliniastymi oraz osadami czwartorzędowymi (Heyse, Ghysels 2003). Struktury peryglacialne były okresowo widoczne na polach uprawnych. Najkorzystniejsze do obserwacji okazały się późna wiosna oraz lato. Wyróżniono sześć typów poligonów różniących się wielkością, kształtem oraz wzorem, jaki uwidaczniał się podczas nalotów. Średnica zaobserwowanych poligonów wahała się od 3 do 10 m. Górna część klina znajdowała się na głębokości 0,4–0,7 m, natomiast dolna od 1,2 m do 1,8 m. Wszystkie zbadane struktury wypełnione były materiałem piaszczystym (Heyse, Ghysels 2003).

Badania dotyczące rejestracji kopalnych struktur peryglacialnych na zdjęciach lotniczych na półkuli północnej prowadzone były zazwyczaj w okresie maj–sierpień. Do fotografowania poligonów stosuje się najczęściej kamery rejestrujące obraz w zakresie promieniowania widzialnego oraz podczerwieni. Oprócz zdjęć pionowych, często wykonywano też zdjęcia ukośne. Kliny mrozowe najczęściej wypełnione były materiałem piaszczystym.

WYKORZYSTANIE OBRAZÓW Z SERWISÓW INTERNETOWYCH

Poligony mrozowe dają się zauważyć również na wysokorozdzielczych obrazach z Google Maps, Google Earth, Apple Maps i innych powszechnie dostępnych serwisów, portali czy programów internetowych, które łączą ze sobą obrazy satelitarne z lotniczymi. Kopalne poligony mrozowe widoczne są przy dużych zbliżeniach (Ryc. 2 i 3), na obrazach pochodzących najczęściej z fotografii lotniczej.

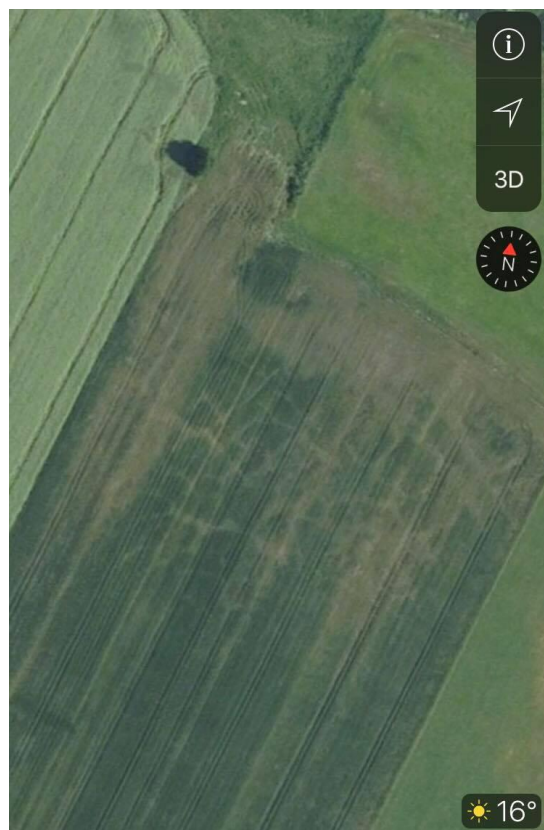


Ryc. 2. Poligony mrozowe w okolicy wsi Kobylniki (woj. świętokrzyskie)

Fig. 2. Ice Wedge polygons near the Kobylniki (świętokrzyskie voivodeship)

Źródło: Google Maps (dostęp 17.04.2019).

Source: Google Maps (17.04.2019).



Ryc. 3. Poligony mrozowe w okolicy wsi Boćki (woj. podlaskie)

Fig. 3. Ice Wedge polygons near the Boćki (podlaskie voivodeship)

Źródło: Apple Maps (dostęp 17.04.2019).

Source: Apple Maps (17.04.2019).

Przykładem wykorzystania obrazów z Google Earth do wykrywania kopalnych poligonów mrozowych jest praca C. Gao (2014), który badał rejon środkowej części Niziny Atlantyckiej (Stany Zjednoczone). Obszar ten pokryty jest piaskami i żwirami rzecznyymi, piaskiem oraz mułem pochodzenia eolicznego. Wielokąty zostały zidentyfikowane poprzez znaczniki roślinne (różnica wilgotności pomiędzy granicami poligonów i obszarów do nich przyległych), na polach uprawnych w okresie od czerwca do września.

DYSKUSJA - PROBLEMY W INTERPRETACJI POLIGONÓW MROZOWYCH

Stosowanie metod fotointerpretacyjnych nie zawsze może doprowadzić do wykrycia kopalnych struktur poligonalnych. Negatywny wynik próby zidentyfikowania na zdjęciach lotniczych śladów wieloboków szczelin mrozowych w Nowostawach i Walewicach jest wymownym tego przykładem (Gawlik 1970). Zasadnicze znaczenie ma odpowiedni kontrast wilgotnościowy między wypełnieniem klina i jego mineralnym otoczeniem oraz odpowiednia faza wzrostu roślin.

W latach 80. XX w. ukazała się praca H. Svenssona (1982), w której kompleksowo opisano użyteczność technik teledetekcyjnych w identyfikacji struktur peryglacjalnych. Na podstawie 37 odpowiedzi z kwestionariusza skierowanego do naukowców oraz instytucji naukowych autor publikacji wnioskuje, że poligony są najlepiej widoczne, gdy znacznikiem roślinnym jest zboże o głębokim systemie korzeniowym, a od strony technicznej zdjęcia pionowe pozwalają na pomiary morfometryczne oraz na dokładne kartowanie zasięgu struktur. Najczęściej wykonuje się zdjęcia czarno-białe, panchromatyczne, rzadziej kolorowe; a sporadycznie - w zakresie bliskiej podczerwieni.

Poligony często są fotografowane podczas badań prowadzonych przez archeologów, a przez zmiany powierzchni spowodowane przez zjawiska archeologiczne są mylone z innymi obiektami (Ryc. 4) (Agapiou 2013). Kolejnym utrudnieniem jest obecność sączków drenarskich, które zwykle są zakopane na głębokości około 0,5 m lub głębiej i dają na zdjęciach podobnie linie jak boki poligonów. Sączki można jednak odróżnić ze względu na ich typowy prostoliniowy lub jodełkowy przebieg (Dąbski 2011).

PODSUMOWANIE

Wykorzystanie zdjęć lotniczych do identyfikacji kopalnych poligonów mrozowych odbywa się od prawie 50 lat. Jest to temat ciekawy dla geografów i geologów, ponieważ pozwala na wyciągnięcie wniosków paleośrodowiskowych dotyczących zwłaszcza obecności wieloletniej zmarzliny i warunkowanych przez nią procesów.

W artykule przedstawiono i porównano koncepcje wybranych naukowców polskich i zagranicznych na temat zastosowania teledetekcji do identyfikacji poligonów mrozowych. W Polsce badania te prowadzi się od lat 70. XX w. Koncentrowano się głównie na obszarach młodoglacjalnych (okolice Poznania, Wielkopolska) i miejscowo na staroglacjalnych równinach peryglacjalnych. Do wykonania zdjęć najczęściej wykorzystywano kamery rejestrujące obraz w zakresie promieniowania widzialnego. Badania poza granicami Polski prowadzone są od lat 60. XX w. Naukowcy wykonywali zdjęcia pionowe i ukośne w zakresie promieniowania widzialnego, rzadziej w podczerwieni. Zarówno w przypadku badań prowadzonych w Polsce jak i za granicą fotografowane poligony znajdowały się na polach uprawnych, najczęściej pod wschodzącym zbożem.



Ryc. 4. Przykład obiektu antropogenicznego (zakopana rura perforowana z XIX w. o średnicy około 15cm), który może być mylony z kopalną szczeliną mrozową

Fig. 4. Case of the anthropogenic object (buried perforated pipe from 19th c.) which can be mistaken for a fossil frost fissure

Źródło: fot. prof. W. Rączkowskiego (UAM).

Source: photo by Prof. W. Rączkowski (UAM).

Metody fotointerpretacyjne nie zawsze dają pozytywny wynik identyfikacji poligonów mrozowych. Struktury te bywają mylone z obiektami antropogenicznymi (instalacjami melioracyjnymi lub obiektami archeologicznymi). Należy pamiętać, że do pełnego wnioskowania paleośrodowiskowego badaniom teledetekcyjnym powinny towarzyszyć analizy struktur sedimentologicznych stwierdzone w odsłonięciach.

Obecnie dzięki łatwemu dostępowi do awionetek (możliwość wykupienia lotu turystycznego), popularyzacji bezzałogowych statków powietrznych oraz łatwości w dostępie do gotowych obrazów w serwisach internetowych, zdalne wykrywanie kopalnych poligonów mrozowych staje się o wiele prostsze w zastosowaniu. Dalsza analiza otrzymanych obrazów w środowisku oprogramowania GIS usprawnia wnioskowanie dotyczące sprzyjającej rzeźby terenu i morfometrii struktur mrozowych (Ewertowski i in. 2017). Końcowym etapem takich badań jest weryfikacja zasięgu występowania wieloletniej zmarzliny, co może prowadzić do wyciągnięcia istotnych wniosków paleośrodowiskowych.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować Profesorowi Włodzimierzowi Rączkowskiemu z Instytutu Archeologii Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu za udostępnienie zdjęć lotniczych oraz trzem recenzentom za krytyczne uwagi.

Literatura

- Agapiou A., Hadjimitsis D.G., Sarris A., Georgopoulos A., Alexakis D.D., 2013, Optimum temporal and spectral window for monitoring crop marks over archeological remains in the Mediterranean region, *Journal of Archeological Science*, 40, 1479-1492.
- Bogdański P., Kijowski A., 1990, Photointerpretation of geometry of Vistulian ice-wedge polygons; the Grabianowo and the Sulejewo sites, south of Poznań, *Quaestiones Geographicae*, 11/12, 39-52.
- Christensen L., 1974, Crop-marks revealing large-scale patterned ground structures in cultivated areas, south-western Jutland, Denmark, *Boreas*, 3, 153-180.
- Coast W., Svensson H., 1973, Distribution and chronology of relict polygon patterns on the Laholm Plain, the Swedish West Coast, *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 55, 3/4, 159-175.
- Dąbski M., 2011, Grunty strukturalne w Polsce, *Przegląd Geograficzny*, 83, 3, 307-321.
- Dąbski M., Łapaj K., Pudłowski M., 2008, Fotografia lotnicza jako narzędzie do identyfikacji kopalnych poligonów mrozowych, *Zeszyty Naukowe Szkoły Wyższej Przymierza Rodzin w Warszawie, Seria geograficzno-turystyczna*, 1, 59-66.
- Dylik J., 1963, Nowe problemy wiecznej zmarzliny plejstoceńskiej, *Acta Geographica Lodziensia*, 17.
- Gao C., 2014, Relict Thermal-contraction-crack Polygons and Past Permafrost South of the Late Wisconsinan Glacial Limit in the Mid-Atlantic Coastal Plain, USA, *Permafrost and Periglacial Processes*, 25, 144-149.
- Gawlik H., 1970, Wieloboki peryglacialnych szczelin mrozowych na obszarze Polski środkowej w świetle interpretacji zdjęć lotniczych, *Fotointerpretacja w geografii*, 8, 71-79.
- Gilewska S. 1999, Rzeźba. [W:] L. Starkel, (red.) *Geografia Polski: Środowisko przyrodnicze*, PWN, Warszawa, 243-287.
- Goździk J., 1973, Geneza i pozycja stratygraficzna struktur peryglacialnych w środkowej Polsce, *Acta Geographica Lodziensia*, 31.
- Heyse, I., Ghysels, G., 2003, *Fossil polygonal periglacial structures in Flanders (Belgium)*, Proceedings of the 8th International Conference of Permafrost, 21-25.
- Ewertowski M., Kijowski, A., Szuman, I., Tomczyk, A.M., Kasprzak, L. 2017, Low-altitude remote sensing and GIS-based analysis of cropmarks: classification of past thermal-contraction-crack polygons in central western Poland, *Geomorphology*, 293 B, 418-432.
- Johnson W. H., 1990, Ice-wedge Cast and Relict Patterned Ground in Central Illinois and Their Environmental Significance, *Quaternary Research*, 33, 51-72.
- Kijowski A., Ewertowski M., Słowik M., 2012, *Remote Sensing as a Non-Invasive Method for the Study of the Permafrost Features; the Case Study of Wielkopolska, Poland*, Konstantinos Perakis & Athanasios Moysiadis, Editors, EARSEL.
- Kozarski S., 1995, Deglacjacja północno-zachodniej Polski: warunki środowiska i transformacja geosystemu (20 KA - 10 KA BP), *Dokumentacja Geograficzna 1*, IGiPZ PAN, Wrocław.
- Kozarski S., 1993, Late Plenivistulian deglaciation and the expansion of the periglacial zone in NW Poland, *Geologie en Mijnbouw*, 72, 143-157.
- Morgan A.V., 1971, Polygonal Patterned Ground of Late Weichselian Age in the Area North and West of Wolverhampton, England, *Geografiska Annaler*, 53 A (3-4), 146-156.
- Nowakowski J., Prinke A., Rączkowski W., 2005, *Biskupin... i co dalej? Zdjęcia lotnicze w polskiej archeologii*, Instytut Prahistorii UAM, Ośrodek Dziedzictwa Archeologicznego, Muzeum Archeologiczne w Biskupinie, Poznańskie Towarzystwo Prehistoryczne, Poznań.
- Svensson H., 1982, The use of aerial photographs and remote sensing techniques in research on fossil periglacial features, *Biuletyn Peryglacialny*, 29, 129-138.
- Walters J.C., 1994, Ice-Wedge Cast and Relict Polygonal Patterned Ground in the North-East Iowa, USA, *Permafrost and Periglacial Processes*, 5, 269-282.
- Williams R.B.G., 1964, Fossil patterned ground in eastern England, *Biuletyn Peryglacialny*, 14, 337-349.