

SUFOZJA A EFEKT GEOTERMICZNY W OSUWISKOWYCH UTWORACH FLISZOWYCH

UKD 624.131.542:550.836

Sufozja jest zjawiskiem stosunkowo często występującym. Staje się ona przedmiotem badań geologii inżynierskiej jedynie w przypadkach, w których stwarza realne zagrożenie dla obiektów budowlanych. Terminem „sufozja” określa się chemiczne ługowanie, względnie mechaniczne wymywanie drobnych cząstek gruntów spoistych przez wodę opadową i podskórną (1, 3).

Procesy sufozyjne prowadzą do powstawania zapadlisk powierzchni terenu w formie lejów o przekrojach eliptyczno-kołowych. Mogą one w istotny sposób wpływać na warunki posadowienia obiektów mieszkalnych lub przemysłowych. Mogą również stwarzać poważne zagrożenia dla istniejących obiektów przemysłowych, jak to było na terenie Zakładów Papierniczych w Kluczach w 1979 r. Powodem tworzących się tam zapadlisk powierzchni terenu jest sufozyjne wymywanie (mechaniczne), jak również chemiczne ługowanie drobnych frakcji z gruntów czwartorzędowych, zalegających na nieciągłej warstwie ilów kajprowych (5). Sufozja na terenach górskich i podgórskich może być pochodną procesów osuwiskowych.

Z geofizycznego punktu widzenia zjawiska sufozyjne są trudne do detekcji. Brak również publikowanych opracowań z zakresu tej tematyki. Wydaje się, że najbardziej odpowiednią metodą do badania tych zjawisk może być metoda geotermiczna. Przykłady zastosowań tej metody na południowych zboczach Kotliny Wieliczki wydają się obiecujące. W artykule przedstawiono teoretyczne podstawy badań zjawisk sufozyjnych metodą geotermiczną oraz przykłady jej zastosowań praktycznych.

MECHANIZM SUFOZJI W UTWORACH FLISZOWYCH

Model fizyczny do opisu zjawisk sufozyjnych jest przedstawiony na ryc. 1. Podstawą jego konstrukcji były warunki geologiczne istniejące w południowych zboczach Kotliny Wieliczki. Pokrywą utworów fliszowych stanowią tam gliny pylaste o różnej miąższości (max. 15 m). Flisz jest wykształcony głównie w postaci łupków i iłołupków z niewielkim udziałem piaskowców. W rejonie kotliny przebiega granica nasunięcia karpackiego na utwory miocenu, co jest powodem urozmaiconej tektoniki tego obszaru. Łupki i iłołupki kontaktują się z utworami mioceńskimi wykształconymi w formie ilów. Woda, będąca głównym czynnikiem zjawisk sufozyjnych, pochodzi z opadów atmosferycznych oraz z wpływów z przepuszczalnych warstw fliszowych.

Wody opadowe spływają powierzchniowo po zboczu względnie filtrują w gruntach czwartorzędowych i gruntach wietrzelinowych starszego podłoża. Poziom wód gruntowych jest zasilany również wpływami wód z piaskowców fliszowych. Udział poszczególnych typów wód ma znaczenie przy rozpatrywaniu szybkości procesu sufozijnego w czasie. Dla opisu samego procesu czynnik ten nie jest istotny. Będzie on miał jednakże znaczenie przy analizie czynników wpływających na pole temperatury w strefie przypowierzchniowej.

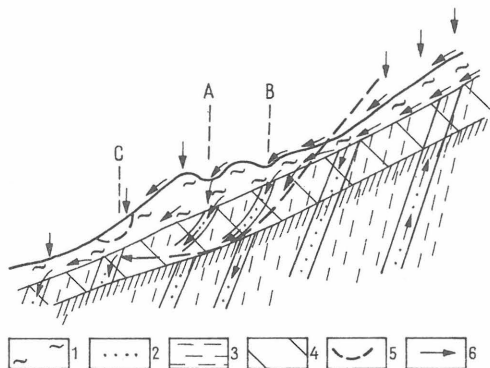
W przedstawionym na ryc. 1 przykładzie modelowym założono, że głównym czynnikiem powodującym sufozję i w konsekwencji powstawanie zapadlisk powierzchni te-

renu jest sekwencja utworów przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych, charakterystyczna dla fliszu. Wymywany z warstwy przypowierzchniowej materiał może być odprowadzany w dolne partie zbocza kanalikami występującymi w gruntach wietrzelinowych, względnie szczelinami w obrębie przepuszczalnych warstw fliszowych. Predysponowane do powstawania zapadlisk są więc te miejsca, gdzie w podłożu fliszowym utwory wietrzelinowe kontaktują się z utworami przepuszczalnymi. Sytuacja taka ma niewątpliwie wpływ na dynamikę i kierunek spływu wód gruntowych, w konsekwencji powodując przyspieszenie i ukierunkowanie procesu sufozyjnego właśnie w tych miejscach. Należy tutaj zaznaczyć, że przedstawiony model jest uproszczony i nie uwzględnia wszystkich możliwych do wystąpienia różnic strukturalnych w budowie geologicznej, jak i innych niż opisanych czynników, które mogą być genetycznie związane z mechanizmem sufozji (strukturalne parametry gruntów, niejednorodności sedymentacyjne, tektonika fliszu itp.).

POLE TEMPERATURY W UTWORACH PRZYPOWIERZCHNIOWYCH

Warunki termiczne w utworach przypowierzchniowych są wynikiem superpozycji pól cieplnych Słońca i Ziemi. Wpływ energii słonecznej na temperaturę przypowierzchniowych partii Ziemi opisuje się za pomocą tzw. fali cieplnej (2, 6). Fala ta, będąca periodyczną zmianą temperatury powietrza, rozchodzi się w Ziemi na skończoną głębokość. Im większa zmiana temperatury wystąpi w powietrzu w skończonym czasie, tym większa jest głębokość przenikania fali cieplnej w skałach. W opisie warunków termicznych przypowierzchniowych warstw skorupy ziemskiej wyróżnia się trzy strefy termiczne (6). Są to:

- strefa dobowych zmian temperatury (0–2 m ppt, dla większości obszarów Polski 0–1 m ppt),
- strefa dekadowych zmian temperatury (0–5 m ppt),
- strefa rocznych zmian temperatury (0–20 m ppt).



Ryc. 1. Przypuszczalny mechanizm sufozji na zboczu osuwiskowym. Punkty A, B wskazują istniejące zapadliska powierzchni ziemi. Punkt C wskazuje miejsce prognozowanego zapadliska

1 – gliny pylaste, 2 – piaskowce, 3 – łupki ilaste, 4 – zwietrzałe skały podłoża, 5 – płaszczyzna poślizgu, 6 – kierunki spływu wód powierzchniowych i podziemnych zasilających poziom wód gruntowych

Fig. 1. Presumed way of suffosion on the landslide slope. Points A and B denote recorded collapse structures. Point C denotes a supposed collapse structure

1 – silty loam, 2 – sandstone, 3 – clayey shale, 4 – weathered basement rocks, 5 – slip surface, 6 – direction of surface and subsurface water flow supplying ground water level

W strefie dobowych zmian temperatury warunki termiczne są ustalone jedynie w krótkich okresach i zależą głównie od własności cieplnych utworów budujących tę strefę (w większości gleb oraz gruntów wietrzelinowych). Wartości bezwzględne temperatur mierzonych w gruncie zmieniają się w szerokich granicach w zależności od pór roku i warunków pogodowych. Duży wpływ na rozkład pola temperatury w tej strefie ma woda opadowa i gruntowa. Wpływ ten jest szczególnie silny w rejonach górskich, w których istnieją warunki do szybkiej wymiany wód. Na zboczu górskim głównym czynnikiem wpływającym na zróżnicowanie temperatury w warstwie przypowierzchniowej jest różnica wysokości między punktami pomiarowymi. Wiadomo, że temperatura powietrza w atmosferze maleje wraz ze wzrostem wysokości. W szczególnych warunkach może wystąpić zjawisko tzw. inwersji, ale jako zjawisko stosunkowo rzadkie i krótkookresowe nie powinno mieć znaczącego wpływu na temperaturę pod powierzchnią ziemi.

Zakładając normalny rozkład temperatury na powierzchni zbocza, przedstawiony na ryc. 2, można również założyć stałość pionowego gradientu temperatury powietrza (gradient adyabatyczny) wynoszącego $0,01^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (2). Przy tych upraszczających założeniach można określić wpływ wysokości punktu pomiarowego na wielkość rejestrowanej temperatury w postaci zależności [1].

$$Q_h = 0,01 \cdot z \quad [1]$$

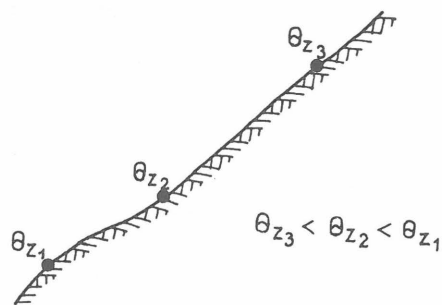
gdzie:

- Q_h – wielkość poprawki na wysokość punktu pomiarowego ($^{\circ}\text{C}$),
- z – różnica wysokości pomiędzy punktami pomiarowymi.

Temperaturę powierzchni ziemi w dowolnym punkcie zbocza można określić z relacji [2].

$$Q_z = Q_0 \pm 0,01 \cdot z \quad [2]$$

We wzorze [2] Q_0 oznacza temperaturę na poziomie odniesienia przyjętym do interpretacji danych. Znak w relacji [2] zależy będzie od przyjęcia płaszczyzny redukcji temperatury. Jeżeli przyjmiemy punkt płaszczyzny odniesienia w dolnej partii zbocza, a pozostałe punkty pomiarowe będą usytuowane na bezwzględnie większych wysokościach, znak poprawki należy przyjąć „+” przy redukcji do płaszczyzny Q_0 . Natomiast gdy chcemy zredukować dane pomiarowe do płaszczyzny w górnej partii zbocza, znak poprawki będzie „-”. Jeżeli dysponujemy rzeczywistą wielkością gradientu w danych konkretnych warunkach pomiarowych, przyjęcie tej wartości we wzorach [1] i [2] będzie poprawniejsze.



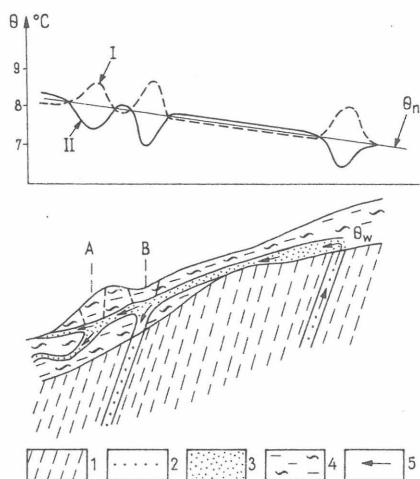
Ryc. 2. Normalny rozkład temperatury θ w profilu podłużnym zbocza

Fig. 2. Normal distribution of temperature (θ) along the slope margin

Przechodząc do ostatniego czynnika, mającego wpływ na pole ciepłne w przypowierzchniowej partii zbocza (ryc. 1), należy wymienić rodzaje wód uruchamiających procesy sufozyjne. Są one następujące:

- wody opadowe wsiąkające w podłoże i filtrujące w utworach wietrzelinowych,
- wody gruntowe z warstw wodonośnych w obrębie fliszu, filtrujące w obrębie wietrzelin.

Wody opadowe jako czynnik uruchamiający sufozję występują okresowo. W danych warunkach mogą podnosić temperaturę ośrodka względnie ją obniżać, stosowanie do pory roku i warunków pogodowych. Wpływ tych wód na temperaturę ośrodka nie jest jednolity. W miejscach, w których w strefie przypowierzchniowej zalegają utwory o większym współczynniku filtracji (w stosunku do otoczenia), szybciej będzie zachodziła wymiana ciepła, a więc i zmiana temperatury. To samo zjawisko zachodzi przy rozpatrywaniu wód podziemnych, przy czym przy filtracji wód wypływających z warstw fliszowych czynnik ten ma stały wpływ na pole temperatury. Hipotetyczny model rozkładu temperatury dla takiego przypadku przedstawiony jest na ryc. 3. Wynika z niego, że w praktyce pomiarowej można zarejestrować dwa typy anomalii geotermicznych. Mogą to być anomalie zarówno dodatnie, jak i ujemne. Wielkość ich będzie w ścisłym związku ze współczynnikiem filtracji utworów zalegających w podłożu, ich współczynnikiem przewodnictwa temperaturowego oraz rodzajem (genetycznie) filtrującej wody.



Ryc. 3. Hipotetyczny przekrój geologiczny i odpowiadający mu rozkład temperatury gruntu w zboczu, w którym zachodzą zjawiska sufozyjne. Punkty A, B wskazują miejsca prognozowanego i istniejącego zapadliska powierzchni terenu

1 - łupki ilaste, 2 - piaskowce, 3 - grunty przepuszczalne w obrębie wietrzzenia, 4 - grunty wietrzelinowe, 5 - kierunki filtracji wód gruntowych, θ_n - temperatura normalna gruntu, θ_w - temperatura wody, I - rozkład temperatury, gdy $\theta_w > \theta_n$, II - rozkład temperatury, gdy $\theta_w < \theta_n$

Fig. 3. Distribution of temperature on the slope with suffosion appearances along the hypothetical geological cross section. Points A and B show supposed and recorded collapse sites

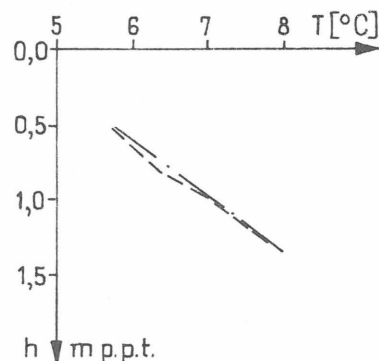
1 - clayey shale, 2 - sandstone, 3 - permeable grounds within weathering cover, 4 - weathering ground, 5 - direction of ground filtration, θ_n - normal ground temperature, θ_w - water temperature, I - temperature distribution while $\theta_w > \theta_n$, II - temperature distribution while $\theta_w < \theta_n$

POMIARY TEMPERATURY GRUNTU NA POŁUDNIOWYM ZBOCZU KOTLINY WIELICZKI

W latach 1982-1985 Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych wykonało pomiary geotermiczne na południowych zboczach Kotliny Wieliczki, na których zjawiska sufozyjne często występują. Wykorzystane w niniejszym artykule przykłady pochodzą z pomiarów wykonanych w tzw. serii prac doświadczalnych, mających wykazać przydatność metody geotermicznej do badania zjawisk sufozyjnych. Pomiary te przeprowadzono w krótkim cyklu obserwacyjnym (głębokość pomiaru 1 m), aby zapewnić w trakcie ich wykonywania stały reżim ciepłny w strefie głębokościowej leżącej na pograniczu dobowych i dekadowych zmian temperatury. Głębokościowy rozkład temperatury w otworze bazowym jest przedstawiony na ryc. 4. Pomiary w otworze bazowym przeprowadzono przed rozpoczęciem i po zakończeniu pomiarów. Krzywe z tych pomiarów są prawie identyczne, co świadczy o tym, że zachowany został warunek „stałości reżimu ciepłego” w okresie wykonywania pomiarów.

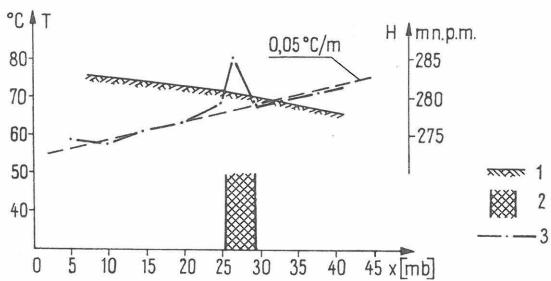
Rozkłady temperatury na profilach pomiarowych w zboczu przedstawiono na ryc. 5, 6. W obu przypadkach zarejestrowano dodatnie anomalie temperatury nad lejami sufozyjnymi. Wartości względne w maximum anomalii temperatury określono względem linii aproksymujących rozkład normalny temperatury w zboczu ($0,05^\circ\text{C}/\text{m}$) i w obu przykładach przewyższają 1°C . Na uwagę przy analizie zdjęć profilowych zasługują stosunkowo duże wartości gradientów (poziomego - jw. oraz pionowego - $0,2^\circ\text{C}/\text{m}$), wielokrotnie przewyższających wartości gradientów normalnych, wynikające z różnicy wysokości punktów pomiarowych. Ta prawidłowość jeszcze bardziej jest widoczna w obrazie mapy izoterm obszaru pomiarowego (ryc. 7). Zaznaczają się na niej strefy o dużych wartościach poziomego gradientu temperatury (duża gęstość izoterm w pewnych rejonach). W strefach zagęszczenia izoterm zinwentaryzowano ślady lejów sufozyjnych, których wielkość i kształt przedstawiono na ryc. 7.

Jedną z podstawowych cech zdjęć geotermicznych, wykorzystywaną w interpretacji geologicznej jest poziomy gradient temperatury. W danych warunkach hydrogeologicznych może on być wiązany z kierunkami przepływu wód, które - jak wskazano wcześniej - działają wyrównująco na temperaturę gruntu, jednocześnie silnie podwyższając wartości normalne zboczowego gradientu tem-



Ryc. 4. Zmiany temperatury z głębokością w otworze bazowym

Fig. 4. Dependence of temperature upon the depth in the basic borehole

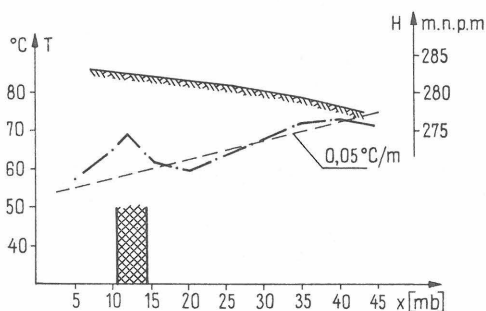


Ryc. 5. Rozkład temperatury w zboczu na głęb. 1 m ppt (przykład 1)

1 – morfologia zbocza, 2 – lej sufozyjny, 3 – linia aproksymująca normalny rozkład temperatury w zboczu

Fig. 5. Temperature distribution on the slope at the depth of 1 m (example no. 1)

1 – morphology of the slope, 2 – suffosional crater, 3 – approximation of the normal distribution of temperature on the slope



Ryc. 6. Rozkład normalny temperatury w zboczu na głęb. 1 m ppt (przykład 2)

Objaśnienia jak na ryc. 5

Fig. 6. Normal distribution of temperature on the slope at the depth of 1 m (example no. 2)

Explanations see Fig. 5

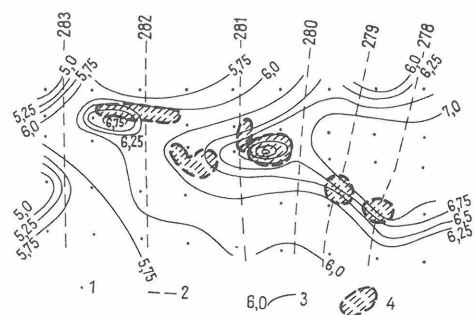
peratury, który w przypadku niewystępowania wód podskórnych powinien osiągać wartości zbliżone do pionowego gradientu temperatury powietrza.

Leje sufozyjne w opisywanych przykładach miały średnice od 0,5 m do 2,5 m. Zapadliska w rejonie lejów zasypali okoliczni mieszkańcy materiałem pochodzącym z pobliskich pól. Zlokalizowane są one w obrębie dużego osuwiska, rozmiarami przewyższającego rejon występowania zapadlisk powierzchni terenu.

UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione w niniejszym artykule rozważania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zdjęcia geotermiczne pozwalają na detekcję form sufozyjnych oraz określenie rejonów, w których procesy te zachodzą obecnie, jak również rejonów, w których będą zachodziły w przyszłości. Mogą więc być wykorzystane do oceny intensywności tych zjawisk, a w szerszym ujęciu do oceny przydatności terenu do zabudowy względnie innego wykorzystania gospodarczego. Mogą być również podstawą do podjęcia zabiegów prewencyjnych, jeżeli takie byłyby konieczne z inżynierskiego punktu widzenia.



Ryc. 7. Leje sufozyjne na tle mapy izoterm na głęb. 1 m ppt

1 – punkt pomiaru temperatury, 2 – warstwicze m n.p.m., 3 – izotermie w °C, 4 – leje sufozyjne na powierzchni zbocza

Fig. 7. Suffosional craters at the background of the isotherm map at the depth of 1 m

1 – temperature measurement point, 2 – contour lines in m a.s.l., 3 – suffosional craters on the slope surface

2. Anomalie temperatury w rejonach istniejących zapadlisk powierzchni terenu mają znak dodatni. Stwierdzenie dodatniego znaku anomalii nie wyklucza możliwości rejestracji również ujemnych anomalii w analogicznych warunkach geologicznych. Materiał pomiarowy prezentowany w tym artykule pochodzi z badań w tzw. okresie przejściowym (listopad), co przy pomiarach geotermicznych oznacza między letnim i zimowym, które to pory roku uważa się za okresy względnie stabilnych warunków termicznych w strefie przypowierzchniowej.

3. W rejonie występowania zjawisk sufozyjnych stwierdzono duże wartości poziomego gradientu temperatury. Ta cecha opisowa pola temperatury najsilniej związana jest z formami sufozyjnymi i może być wykorzystana do perspektywicznej oceny intensywności rozwoju tych procesów.

4. Niezależnie od przyjętej w artykule hipotezy związku anomalii temperatury z cyrkulacją wód gruntowych, możliwe jest, że ich genezy należy szukać przez badania efektów termicznych, wywołanych przez niejednorodności przypowierzchniowe. Niewątpliwie jest, że podsadzenie zapadliska materiałem innym od występującego w podłożu, spowoduje zróżnicowanie współczynnika przewodnictwa temperaturowego w linii profilu pomiarowego. To zróżnicowanie może być powodem rejestracji anomalii temperatury o względnym natężeniu 1°C, a więc zbliżonym do opisanych przykładów.

LITERATURA

1. Bażyński J., Turek S. – Słownik hydrogeologii inżynierskiej. Wyd. Geol. 1969.
2. Kappelmeyer O., Hänel R. – Geothermics with special reference to application. Berlin 1974.
3. Książkiewicz M. – Geologia dynamiczna. Wyd. Geol. 1979.
4. Mościcki W.J. – Lokalizowanie wyrobisk podziemnych metodą geotermiczną. Rozprawa doktorska, AGH 1979.
5. Rudzka B. – Dokumentacja badań geofizycznych. Temat „Klucze”. Arch. PBG Warszawa 1980.
6. Stajniak J. – Badanie ziemskiego pola cieplnego w strefie jego okresowych zmian na obszarze Polski. Geof. Stos. 1978 nr 2.

SUMMARY

The paper deals with theoretical fundamentals of an application of geothermal method to investigation of suffosion phenomena occurring in landsliding areas of Carpathian Flysch. The factors influencing the temperature in subsurface ground in mountain and submountain areas likewise the development of suffosion phenomena are described. Geophysical model describing the mechanism of suffosion phenomena is built and connected geothermic effects are shown. In second part of paper some examples from terrain geothermic measurements performed on southern slopes of Wieliczka valley are shown. In conclusion some remarks are drawn out in order to further applications of subsurface temperature measurements to examination of suffosion phenomena likewise criterions for interpretation of geothermic data.

The measurements of ground temperature can be used for geotechnical forecast of the intensity of suffosion phenomena affecting an area. The high values of horizontal temperature gradient indicate the zones of circulation of subsurface water being the main factor commencing suffosion mechanism. That parameter can be used to forecast performance. An inventory of existing suffosion holes in ground usually invisible can be carried by analysis of the distribution of relative anomalies of ground temperatures.

In presented examples those anomalies had sign “+” (increased values) and relative intensity in maximum of the order 1°C.

Translated by the author

РЕЗЮМЕ

В статье представлены теоретические основы применения геотермического метода для исследования суффозийных явлений образующихся во флишевых оползнях. Обсуждены факторы влияющие на температуру околоповерхностных отложений в горных и подгорных районах, также влияющих на развитие суффозийных явлений. Представлена геофизическая модель описывающая механизм суффозийных явлений на флишевом склоне, а также геотермические эффекты вытекающие из этого механизма. В концевой части представлены примеры из полевых геотермических измерений проведенных на южных склонах Величской котловины. Представлены итоги относительно применения геотермического метода для исследований суффозийных явлений, а также критериев интерпретации геотермических данных. Измерения температуры грунта могут использоваться для приготовления геотехнического прогноза интенсивности суффозийных явлений происходящих на данной территории. Большие величины горизонтального температурного градиента определяют зоны циркуляции грунтовых вод, являющиеся главным фактором создающим механизм суффозии. Это можно использовать для разработки прогноза.

Инвентаризацию существующих уже впадин поверхности, часто ликвидированных и незаметных, можно провести опираясь на поверхностном распределении относительных аномалий температуры. В представленных примерах этим аномалиям придан знак „+” (повышение температуры) и относительная интенсивность, максимум 1°C.

Перевод автора