



Zmarzlina suwalska i klatraty metanu jako klucz do genezy biegunowych czap lodowych

The Suwałki permafrost and methane clathrates as a key to the genesis of polar ice caps

Witold Paleczek^{1*} 

¹ Wydział Budownictwa, Politechnika Częstochowska

* Kontakt / Correspondence: witold.paleczek@pcz.pl

Streszczenie:

Zaproponowany model redefiniuje genezę zmarzliny jako dynamicznego układu gazowo-hydrologicznego. Oparty jest na rozprężeniowych mechanizmach solanek i metanu. Proponowany mechanizm rozprężeniowego chłodzenia w kapilarach kliważu wyjaśnia formowanie klatratów metanu i lokalne zamarzanie wody w górotworze, co umożliwia reinterpretację zmarzliny suwalskiej jako struktury o potencjalnie endogenicznym pochodzeniu. Rozszerzeniem modelu jest hipoteza genezy biegunowych czap lodowych, w której kluczową rolę odgrywa synergiczne oddziaływanie solanek niskotemperaturowych, gazów pod ciśnieniem oraz lokalnych anomalii magnetycznych. Model ten otwiera nowe pole interpretacji zlodowaceń. Rozległe strefy lodowe mogły powstawać jako rezultat synergii procesów gazowo-hydrologicznych i magnetycznych, niezależnie od zmian klimatycznych.

Słowa kluczowe: zmarzlina, rozprężanie solanek, klatraty metanu, chłodzenie hydrogeochemiczne, zlodowacenia endogeniczne

Abstract:

The proposed model redefines the genesis of permafrost as a dynamic gas-hydrological system. It is based on decompression-driven mechanisms involving brines and methane. The suggested process of decompression-induced cooling within cleavage capillaries accounts for the formation of methane clathrates and the localized freezing of water within the rock mass, enabling a reinterpretation of the Suwałki permafrost as a structure potentially of endogenic origin. An extension of the model is a hypothesis concerning the formation of polar ice caps, in which a key role is played by the synergistic interaction of low-temperature brines, pressurized gases, and local magnetic anomalies. This model opens a new field for interpreting glaciation processes. Extensive ice-covered regions may have developed as a result of the synergy between gas-hydrological and magnetic processes, independent of climatic changes.

Keywords: permafrost, brine decompression, methane clathrates, hydrogeochemical cooling, endogenic glaciations

1. Wprowadzenie

W głębokich partiach górotworu obecność solanek o wysokim stężeniu soli nieorganicznych obniża temperaturę krzepnięcia wody, umożliwiając utrzymanie fazy ciekłej poniżej 0°C. Najczęściej spotykane roztwory NaCl, CaCl₂ i MgCl₂ osiągają minimalne temperatury krzepnięcia (punkty eutektyczne) odpowiednio -21°C (~21%), -50°C (~44%) i -33°C (~27%) zgodnie z danymi przedstawionymi w [1]. Niezależnie od stopnia hydratacji soli, solanki NaCl, CaCl₂ i MgCl₂ zamarzają w zakresie od ok. -2°C (słone wody oceaniczne) do -50 oC (np. roztwór CaCl₂) co oznacza, że w sprzyjających warunkach termodynamicznych stano-

wią efektywny czynnik chłodzący górotwór. W mikrostrukturach górotworu, zwłaszcza w kapilarach kliważowych, sprzyjają one migracji cieczy, procesom dekompresyjnym oraz formowaniu klatratów gazowych (np. CH₄·nH₂O). Zjawiska te mogą prowadzić do odwrócenia lokalnego gradientu cieplnego i stabilizacji układów chłodzących w strefach głębokiego oddziaływania gazowo-hydrologicznego.

W pracy podjęto próbę wyróżnienia następujących zagadnień:

- przesunięcie akcentu z klasycznego modelu infiltracyjnego na gazowo-fazowy, w którym klatraty metanu, gazy rozpuszczone i mikroorganizmy metanotroficzne stają się kluczowymi komponentami hydrologii krasowej,

- włączenie klatratów metanu jako rezerwuarów gazowych stabilizujących skład chemiczny i dynamikę wypływu, rozumianego jako naturalne wydostawanie się wód i gazów z głębokich stref górotworu do powierzchni lub do stref przypowierzchniowych, kontrolowane przez ciśnienie, temperaturę oraz strukturę szczelinową skał,
- interpretację gazów (CH₄, CO₂, H₂S) jako wskaźników głębokiego zasilania i izolacji (w artykule określenie interpretacja gazów odnosi się do analizy ich składu, proporcji i pochodzenia jako wskaźników procesów fizykochemicznych zachodzących w głębokich strefach górotworu),
- zastosowanie mikroorganizmów metanotroficznych jako biologicznych markerów głębokiego zasilania,
- integrację fizyki fazowej z geochemią i hydrologią (tworzenie i rozpad klatratów jako mechanizmy regulujące wpływ),
- propozycję interdyscyplinarnego języka opisu górotworu, w którym woda, gaz i skała są współzależnymi komponentami,
- model chłodzenia głębi przez dekompresję cieczy niskotemperaturowych: zakłada istnienie zbiornika wodnego podgrzewanego magmą, z którego ciecz wtłaczana jest pod ciśnieniem do wyżej położonych stref; dekompresja prowadzi do spadku temperatury, lokalnego zamarzania i powstania zmarzliny [2],
- rola magnetytu (Fe₃O₄) jako naturalnego bufora redoks i źródła lokalnych anomalii magnetycznych, stabilizujących procesy krystalizacji wody i sprzyjających powstawaniu stref lodowych,
- hipoteza genezy biegunowych czap lodowych jako efektu synergii solanek niskotemperaturowych, gazów pod ciśnieniem oraz oddziaływania magnetyzmu ziemskiego, co pozwala tłumaczyć utrzymywanie się lodu niezależnie od klimatycznego mrozu,
- opis „efektu dezodorantu” – rozprężeniowego chłodzenia cieczy nasyconych gazami, prowadzącego do gwałtownego spadku temperatury i lokalnego zamarzania wody, stanowiącego kluczowy mechanizm w modelu głębokiej zmarzliny.

Proponowany model stanowi alternatywę wobec klasycznej interpretacji zmarzliny jako reliktu zlodowacenia i może potencjalnie tłumaczyć anomalie termiczne obserwowane m.in. w rejonie Suwalszczyzny, co wymaga dalszych badań terenowych. W efekcie dekompresji solanek (np. CaCl₂) może dochodzić do lokalnego zamarzania wody – mechanizmu chłodzenia niezależnego od klimatycznego zlodowacenia. Mieszanina solanek CaCl₂, MgCl₂ i NaCl wykazuje silniejszy efekt obniżenia temperatury krzepnięcia niż pojedyncze roztwory, co czyni ją skutecznym czynnikiem chłodzącym w głębokich systemach hydrotermalnych. Dodatkowo rozpuszczanie struktur solnych jako proces endotermiczny sprzyja lokalnemu ochłodzeniu górotworu. Roztwór niskotemperaturowy (np. CaCl₂, –50°C) pełni funkcję chłodziwa w modelu głębokiej zmarzliny, co ilustruje Tabela 1.

2. Samozamrożenie górotworu w wyniku rozprężenia solanek

Zjawisko quasi-sprężystości cieczy, wynikające z obecności rozpuszczonych w solankach gazów, których pęcherzyki nadają

sprężystość medium z natury niesprężystemu, można zilustrować na przykładzie solanek niskotemperaturowych o punkcie krzepnięcia sięgającym około –50°C. W warunkach górotworu solanki takie, poddane wysokiemu ciśnieniu, zachowują się jak medium sprężone, zdolne do gwałtownego rozprężania przy wyjściu z kapilar. Efekt ten przypomina mechanizm chłodzenia znany z aerozoli: rozprężająca się ciecz powoduje lokalne obniżenie temperatury nawet do kilkunastu stopni poniżej zera. Tak długo, jak trwa dopływ solanki przez kapilary, tak długo utrzymuje się stan chłodzenia zbiornika, prowadząc do samozamrożenia fragmentu górotworu wraz z wodą w jego sąsiedztwie. W rezultacie zmarzlina może stopniowo zwiększać swój zasięg. Solanki niskotemperaturowe mogą funkcjonować w cyklu obiegu zamkniętego, wypychane przez ciepło magmy (ok. +1200°C), przy czym rozprężeniu sprzyja obecność gazów rozpuszczonych pod ogromnym ciśnieniem. Woda obecna w porach skalnych ulega zamarzaniu mimo podwyższonego ciśnienia, podczas gdy same solanki pozostają w stanie ciekłym dzięki swemu niskotemperaturowemu charakterowi. Mechanizm ten tłumaczy możliwość powstawania lokalnych stref lodowych w górotworze, co ma istotne znaczenie dla interpretacji procesów geotermicznych i hydrogeologicznych.

Zjawisko to może występować również w rejonach okółobiegunowych, gdzie pokrywa lodowa nie musi powstawać wyłącznie wskutek działania mrozu atmosferycznego, lecz także w wyniku efektu swoistej „chłodziarko-zamrażarki geomechaniczno-chemicznej”. Tłumaczy to obecność stref występowania pokładów metanu (CH₄) o zwiększonych ilościach w tych obszarach świata.

Tabela 1. Elementy modelu chłodzenia i zamarzania wody w górotworze i przy dnie zbiorników wodnych, Źródło: opracowanie własne
Table 1. Components of the water cooling and freezing model in the rock mass and at the bottom of aquatic reservoirs, Source: authors' own study

Element	Opis
Zbiornik głęboki	Podgrzewany magmą (~1200°C): źródło pary, gazów i cieczy
Kapilary kliważowe	Kanały transportu cieczy, pary i gazów pod wysokim ciśnieniem
Roztwór niskotemperaturowy	CaCl ₂ (–50°C), MgCl ₂ (–33°C), NaCl (–21°C); mieszaniny wzmacniają efekt obniżenia temperatury krzepnięcia
Gazy rozpuszczone	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S pod wysokim ciśnieniem; nadają cieczy quasi-sprężystość i sprzyjają rozprężeniu
Mechanizm chłodzenia	Dekompresja przy wypływie z kapilary → gwałtowne ochłodzenie → lokalne zamarzanie wody
Proces endotermiczny	Rozpuszczanie struktur solnych dodatkowo obniża temperaturę górotworu
Efekt geologiczny	Powstanie zmarzliny (<i>permafrost</i>) bez udziału lodowca; lokalne strefy lodowe w górotworze
Konsekwencje hydrogeologiczne	Stabilizacja klatratów metanu, zmiana lokalnego gradientu cieplnego, potencjalne rezerwuary gazowe

3. Woda i gazy jako aktywne komponenty dynamicznych układów ciśnieniowych w strukturach skalnych

Woda, choć często traktowana jako neutralny nośnik, jest aktywnym medium geochemicznym – przenosi sole, gazy, energię oraz ‘zapis chemiczny skał’. W głębokich systemach krasowych i geotermalnych jej rola wykracza poza transport: uczestniczy w przemianach fizykochemicznych, katalizuje reakcje i kształtuje lokalną równowagę chemiczną. Rozpuszczone gazy – me-

tan (CH₄), dwutlenek węgla (CO₂) i siarkowodór (H₂S) – pełnią funkcję stabilizatorów wpływów, inicjują procesy mineralizacji, wpływają na pH oraz regulują równowagę redoks systemu. Równowaga redoks w górotworze nie jest abstrakcyjnym „zbiorem parametrów”, lecz realnym mechanizmem regulującym przemiany chemiczne i cieplne. W rejonie Suwalszczyzny, gdzie na dużych głębokościach występują złoża magnetytu (Fe₃O₄), układ Fe²⁺/Fe³⁺ pełni rolę naturalnego bufora oksydacyjno-redukującego. Obecność solanek niskotemperaturowych, nasyconych gazami (CH₄, CO₂, H₂S), wzmacnia ten efekt: pęcherzyki gazowe nadają cieczy quasi-sprężystość, a ich rozprężenie prowadzi do gwałtownego chłodzenia – jak już wspomniano: mechanizmu analogicznego do „efektu dezodorantu”. Woda w porach skalnych ulega zamarzaniu mimo podwyższonego ciśnienia, podczas gdy solanki pozostają ciekłe dzięki obniżonemu punktowi krzepnięcia. Solanki te posiadają odrębny obieg hydrogeologiczny, który dzięki skomplikowanej układowi szczelin w klaważu nie miesza się z wodami słodkimi. W rezultacie nie dochodzi do zaburzeń reżimu wód górotworu, a system solankowy zachowuje izolację chemiczną i termiczną. W takim układzie równowaga redoks stabilizuje zarówno fazy żelaza, jak i obecność gazów, tworząc środowisko sprzyjające powstawaniu lokalnych stref lodowych. Magnetyt, jako minerał o mieszanym stopniu utlenienia, rejestruje i utrzuła warunki redoks, stanowiąc geochemiczny dowód izolacji i stabilności systemu. Powiązanie zmarzliny suwalskiej z równowagą redoks i rozprężeniem solanek pokazuje, że chłodzenie górotworu może być procesem endogenicznym, niezależnym od klimatycznego zlodowacenia, a jednocześnie zgodnym z obserwowanymi anomaliami termicznymi w regionie. Ich obecność i dynamika zależą od ciśnienia, temperatury oraz mikrostruktury górotworu, stanowiąc czułe wskaźniki głębokiej aktywności geochemicznej. Szczególną rolę w analizie proponowanego modelu odgrywają klatraty metanu – krystaliczne struktury lodowe z uwiezionymi pęcherzykami CH₄. Ich występowanie świadczy o izolacji, stabilności termicznej i zachowaniu pierwotnych parametrów chemicznych. W połączeniu z reliktowymi wpływami, anomaliami chemicznymi oraz obecnością mikroorganizmów metanotroficznych, stanowią punkt odniesienia w redefinicji modeli hydrologii głębokiej. Artykuł analizuje rolę gazów w systemach wodnych jako czynników sprawczych i kontrolnych procesów geochemicznych. Interakcje woda-gaz, regulowane przez ciśnienie i temperaturę, determinują dynamikę głębokich układów hydrogeologicznych [3–7]. Tabela 2 zestawia wybrane zagadnienia z literatury, uporządkowane tematycznie zgodnie z argumentacją w tekście.

4. Hipoteza czap lodowych a magnetyzm ziemski

Pole magnetyczne Ziemi nie jest wyłącznie tarczą chroniącą planetę przed wiatrem słonecznym. W głębokiej geochemii może ono oddziaływać na strukturę wody i solanek, modulując ich właściwości fizykochemiczne. Badania laboratoryjne wskazują, że pola magnetyczne wpływają na proces krystalizacji wody i roztworów solnych, zmieniając stopień przechłodzenia oraz inicjację krzepnięcia. W rejonach okołobiegunowych, gdzie występują solanki niskotemperaturowe i gazy rozpuszczone pod ciśnieniem, lokalne warunki magnetyczne mogą sprzyjać stabilizacji stref lodowych – niezależnie od klimatycznego mrozu. Mechanizm ten można interpretować jako efekt synergii: rozprę-

żenie solanek nasyconych gazami (efekt rozprężeniowy: „efekt dezodorantu”), równowaga redoks stabilizowana przez minerały żelaza oraz lokalne anomalie magnetyczne wspólnie tworzą środowisko sprzyjające powstawaniu i utrzymywaniu czap lodowych. Szczególną rolę odgrywa magnetyt (Fe₃O₄), obecny w górotworze na dużych głębokościach. Jako minerał o mieszanym stopniu utlenienia pełni funkcję naturalnego bufora redoks, a jednocześnie generuje lokalne anomalie magnetyczne. To może tłumaczyć, dlaczego w niektórych miejscach lód utrzymuje się w sposób „nadmiarowy” względem samej temperatury atmosferycznej. Hipoteza ta sugeruje, że czapy lodowe na biegunach mogą być nie tylko efektem klimatycznego chłodzenia, lecz także wynikiem procesów endogenicznych – geochemiczno-magnetycznych – zachodzących w głębi Ziemi. Analiza prac [8–11] wskazuje na bardzo dobrą korelację między obecnością czap lodowych w obrębie biegunów magnetycznych a oddziaływaniem magnetyzmu ziemskiego na zwiększenie krzepnięcia wody i jej roztworów. Jest to propozycja nowa, gdyż literatura naukowa dotychczas nie wspomina o bezpośrednim powiązaniu magnetyzmu ziemskiego z genezą czap lodowych.

Tabela 2. Tematyczne zestawienie wybranych źródeł literaturowych, Źródło: opracowanie własne
Table 2. Thematic overview of selected literature sources, Source: authors' own study

Źródło	Zakres i znaczenie
Otero, 2020 [8]	Wpływ oscylujących pól magnetycznych na przechłodzenie i krzepnięcie wody oraz roztworów NaCl
Jarulertwattana, 2019 [9]	Oddziaływanie pola magnetycznego na szybkość krzepnięcia i przejście fazowe wody dejonizowanej
Urbic, 2023 [12]	Stabilizacja sieci wodorowej wody przez pole magnetyczne; symulacje krystalizacji
Appelo, 2023 [4]	Hydrogeochemia, wpływ CO ₂ na pH i rozpuszczalność; modele geochemiczne dla środowisk skalnych
Aeschbach, 2013 [3]	Gazy szlachetne jako wskaźniki paleotemperatur i izolacji hydrogeologicznej
PIG, 2025 [10, 13]	Zmarzlina w Suwałkach jako przypadek głębokiej izolacji i chłodzenia rozprężeniowego
Carrol, 2020 [14]	Struktura i kontrola klatratów metanu; równowaga fazowa w systemach gazowo-wodnych
Sander, 2015 [15]	Rozpuszczalność gazów jako funkcja temperatury i ciśnienia; równowaga gaz-ciecz
Kvenvolden, 1988 [16]	Klatraty metanu jako rezerwuary węgla; relikтовая izolacja geochemiczna
Rouwet, 2020 [17]	Źródła gazowe w systemach hydrotermalnych; migracja CO ₂ i H ₂ S
Li, 2025 [18]	Mikroorganizmy metanotroficzne jako biologiczne wskaźniki głębokiego zasilania
Buffett, 2004 [19]	Stabilność klatratów metanu; funkcja bufora gazowego
Longone, 2024 [20]	Mikroskopowe mechanizmy stabilizacji klatratów CH ₄ i CO ₂ ; przemiany fazowe
Sloan, 2007 [21]	Struktura, powstawanie i destabilizacja klatratów; równowaga fazowa i kinetyka
Max, 2009 [22]	Klatraty jako archiwum geotermalne; koncepcja „pamięci gazowej”
Paleczek, 2025 [2]	Alternatywny mechanizm zasilania wód słodkich; integracja geotermii, gazów (CO ₂), endotermicznych reakcji chemicznych i transportu pary wodnej w szczelinach klaważowych; propozycja rewizji klasycznego cyklu hydrologicznego i genezy źródeł krasowych

Zagadnienia mikrobiologii głębokich systemów geotermalnych zostały szeroko omówione w [23, 24], natomiast modelowanie klatratów w ujęciu dwuwymiarowym przedstawiono w [25].

5. Mechanizmy fizykochemiczne i rozpuszczalność gazów

W głębokich systemach wodnych gazy są czynnikami sprawczymi, współkształtującymi dynamikę wypływu, skład chemiczny i parametry geochemiczne środowiska skalnego. Ich działanie zależy od temperatury, ciśnienia, struktury porowej skał oraz obecności wody w różnych stanach skupienia. Rozpuszczalność gazów zmienia się wraz z warunkami fizycznymi: w środowisku powierzchniowym wzrost temperatury obniża rozpuszczalność (np. CO_2 , CH_4), sprzyjając uwalnianiu, natomiast w głębokich strefach przy wysokim ciśnieniu zależność ta może ulec odwróceniu:

- CO_2 może być wypierany z roztworu, inicjując mineralizację (np. kalcyt),
- CH_4 może stabilizować się w formie klatratów, wpływając na wypływ i obecność mikroorganizmów metanotroficznych.

6. Klatraty metanu i separacja CO_2

Klatraty metanu – struktury lodowe z uwięzionym CH_4 – powstają w warunkach wysokiego ciśnienia i niskiej temperatury, typowych dla głębokich szczelin krasowych i basenów osadowych. Ich obecność świadczy o izolacji systemu, stabilności termicznej i ciśnieniowej oraz zachowaniu pierwotnych parametrów geochemicznych. Rozpad klatratów, np. wskutek wzrostu temperatury, może prowadzić do nagłego uwolnienia metanu i zakłócenia równowagi chemicznej wypływu. W procesie kondensacji pary wodnej dochodzi do selektywnej separacji gazów. CO_2 , jako gaz dobrze rozpuszczalny, może być zatrzymywany lub wypierany w zależności od lokalnych warunków, wpływając na:

- zmiany pH i mineralizację (np. węglany),
- reakcje endotermiczne stabilizujące temperaturę,
- skład chemiczny wód źródłanych, niezależny od infiltracji atmosferycznej [5, 15, 16].

Rozpuszczanie CO_2 w wodzie jest procesem endotermicznym, który lokalnie pochłania ciepło z otoczenia, co prowadzi do stabilizacji temperatury w strefie reakcji.

7. Zjawiska obserwowalne: wypływy gazowe i stabilność źródeł

Wypływy gazowe są nie tylko obiektem obserwacji geochemicznej, lecz także wskaźnikiem głębokich procesów fizykochemicznych i biologicznych, nieuwzględnianych w klasycznych modelach hydrologicznych. Mogą wskazywać na alternatywne mechanizmy zasilania i stabilizacji, niezależne od infiltracji atmosferycznej. Mofety, źródła siarkowe i wody mineralne ujawniają gaz w postaci pęcherzyków, zmętnień, zapachów i lokalnych zmian chemicznych. Skład (CO_2 , H_2S , CH_4) odzwierciedla warunki głębokie – ciśnienie, temperaturę i reaktywność skał – i może świadczyć o:

- aktywności magmowej lub hydrotermalnej,
- redukcji siarczanów i fermentacji metanowej,
- strefach separacji gazów związanych z kondensacją pary wodnej.

Wypływ gazu jest elementem systemowym, odzwierciedlającym parametry środowiska skalnego. Stabilność wielu źródeł mimo zmiennych warunków atmosferycznych może wynikać z:

- reakcji endotermicznych (np. tworzenia kwasu węglowego),
- chłodzenia kapilarnego w szczelinach,
- obecności klatratów kontrolujących uwalnianie gazu.

Klatraty, jako stabilne struktury lodowe wiążące cząsteczki gazów, mogą okresowo blokować lub ograniczać ich migrację, a ich rozpad prowadzi do impulsowego uwalniania gazu.

Źródło działa wówczas jako system samoregulujący, oparty na warunkach geologicznych.

8. Mikroorganizmy metanotroficzne jako wskaźniki

Obserwowane w niektórych źródłach mikroorganizmy metanotroficzne świadczą o:

- długotrwałej obecności CH_4 ,
- izolacji biologicznej i chemicznej głębokich stref krasowych,
- reliktowym charakterze ekosystemu.

Stanowią biologiczne wskaźniki głębokiego zasilania – zastosowanie mikroorganizmów *metanotroficznych* (np. *Methylococcus capsulatus*, *Methylosinus trichosporium*) jako biologicznych markerów głębokiego zasilania, można traktować jak żywe rejestry procesów zachodzących poza klasycznymi modelami hydrologicznymi, [11, 18, 23, 24].

Modelowanie i implikacje: zjawiska gazowe w systemach krasowych nie są zjawiskiem wtórnym, lecz aktywnie uczestniczą w mechanizmach zasilania, separacji i stabilizacji wód. Ich obecność otwiera możliwość modelowania hydrologii głębokich stref w ujęciu wykraczającym poza tradycyjne modele infiltracyjne, [2].

9. Klatraty jako bufor gazowy

Klatraty metanu – struktury lodowe z uwięzionym gazem – mogą działać jako naturalny bufor regulujący ciśnienie, temperaturę i skład chemiczny wypływu. W szczelinach krasowych mogą:

- stabilizować wypływ poprzez kontrolowane uwalnianie metanu,
- chronić system przed nagłymi zmianami ciśnienia,
- inicjować aktywność mikroorganizmów metanotroficznych,
- wpływać na pH i mineralizację poprzez interakcje z CO_2 i jonami węglanowymi.

W modelu geotermalno-krasowym klatraty funkcjonują jako dynamiczny rezerwuár gazowy reagujący na zmiany ciśnienia i temperatury.

10. Zjawiska gazowe jako wskaźniki zasilania

Skład gazów w wypływach odzwierciedla głębokie warunki geochemiczne:

- obecność CH_4 w formie klatratów sugeruje izolację systemu,
- stabilne stężenie CO_2 wskazuje na reakcje endotermiczne,
- H_2S świadczy o redukcji siarczanów w warunkach beztlenowych.

11. Wpływ gazów na wodę słodką

Rozpuszczone lub uwięzione gazy wpływają na migrację, separację jonów oraz stabilność termiczną i chemiczną wypływu:

- CO₂ inicjuje mineralizację i zmienia skład wody,
- CH₄ oddziałuje na mikrobiologię systemu, stabilizując jego parametry,
- separacja gazów podczas kondensacji prowadzi do rozdziału faz i zmiany składu chemicznego.

Gaz pełni więc aktywną rolę w kształtowaniu właściwości fizykochemicznych wód słodkich [7, 19, 20].

12. Przestrzenie dalszego rozpoznania

Prezentowany model ma charakter eksploracyjny: polega na formułowaniu pytań kwestionujących ustalone, dominujące sposoby interpretacji i wskazujących potrzebę rozszerzenia metod opisu procesów geochemicznych i hydrologicznych. Wymagają one pogłębionej analizy teoretycznej, modelowania fizykochemicznego i weryfikacji terenowej:

- Czy istnieją źródła, w których klatraty metanu aktywnie uczestniczą w cyklu hydrologicznym, regulując parametry wypływu?
- Jakie cechy górotworu (porowatość, szczelinowość, obecność soli, typ litologiczny) sprzyjają powstawaniu i trwałości klatratów? Czy ich rozpad może być inicjowany przez lokalne zmiany geotermalne, sejsmiczne lub antropogeniczne?
- Czy klatraty metanu mogą pełnić rolę rezerwuaru gazowego, rejestrującego przebieg dawnych cykli geotermalnych, migracji wody i aktywności biologicznej? Czy ich obecność może być traktowana jako wskaźnik głębokiej historii systemu – analogicznie do izotopów, minerałów czy organizmów reliktowych?
- Czy lokalne anomalie magnetyczne mogą inicjować krystalizację wody w warunkach przechłodzenia i sprzyjać powstawaniu zmarzliny?
- Czy gwałtowne rozprężenie cieczy nasyconych gazami może być traktowane jako główny mechanizm chłodzenia niezależny od klimatu?
- Czy biegunowe czapy lodowe mogą być produktem synergii solanek, gazów pod ciśnieniem i magnetyzmu, a nie tylko klimatycznego mrozu?
- Jakie gatunki (np. *Methylococcus capsulatus*, *Methylosinus trichosporium*) mogą pełnić rolę biologicznych markerów głębokiego zasilania i izolacji?
- Czy lokalne anomalie termiczne w rejonie Suwałk można wytłumaczyć procesami gazowohydrologicznymi i magnetycznymi, a nie tylko warunkami klimatycznymi?

Pytania przykładowe obejmują również dotąd przemilczane aspekty – rolę magnetyzmu i minerałów żelaza w krystalizacji wody, mechanizm rozprężeniowego chłodzenia cieczy nasyconych gazami, udział organizmów metanotroficznych jako biologicznych wskaźników oraz możliwość reinterpretacji fenomenu Suwałk jako ‘bieguna zimna’ Polski. Włączenie tych zagadnień poszerza pole badawcze i wskazuje, że geneza zmarzliny oraz czap lodowych może być wynikiem synergii procesów gazowo-hydrologicznych, geochemicznych [21, 22, 26] i magnetycznych [8, 9, 12].

13. Wnioski końcowe i redefinicja zmarzliny

Model przedstawiony w pracy redefiniuje genezę zmarzliny i otwiera nowe perspektywy dla interdyscyplinarnego opisu procesów głębokiego górotworu. Woda, gaz i skała funkcjonują tu jako współzależne elementy dynamicznego układu. Integracja mechanizmów rozprężeniowych, niskotemperaturowych solanek i metanu pozwala ujmować zmarzlinę jako układ gazowo-hydrologiczny, którego geneza nie musi być związana z epoką lodowcową. Zamiast traktować ją jako relikտ paleoklimatyczny, należy rozważyć jej powstanie w wyniku procesów fizykochemicznych zachodzących pod zmiennym ciśnieniem i temperaturą.

Porównanie klasycznych źródeł gazowych z systemami opartymi na klatratach metanu (Tabela 3) ukazuje różnice w mechanizmach uwalniania gazu, stabilności wypływu i obecności mikroorganizmów. Wskazuje to, że zmarzlina może być efektem równowagi gazowo-hydrologicznej inicjowanej przez rozprężenie gazów w strukturach skalnych.

Tabela 3. Klasyczne źródła gazowe vs. źródła z klatratami metanu, Źródło: opracowanie własne
Table 3. Classical gas sources vs. methane clathrate-based sources, Source: authors' own study

Element	Klasyczne źródła gazowe	Źródła z klatratami metanu
Rodzaj gazu dominującego	CO ₂ , H ₂ S, CH ₄ (rozpuszczony)	CH ₄ uwięziony w strukturze lodowej, powstałej wskutek rozprężenia gazu
Mechanizm uwalniania gazu	Degazacja z głębi lub z roztworu gazowego	Rozprężenie metanu przy wyjściu z kapilar, prowadzące do formowania klatratów
Warunki fizykochemiczne	Niskie ciśnienie, umiarkowana temperatura	Zmienność ciśnienia i temperatury; lokalne zamarzanie
Stabilność wypływu	Zmienna, zależna od sezonowości	Stabilna; kontrolowana przez równowagę gaz-klatrat
Obecność mikroorganizmów	Bakterie siarkowe, denitryfikacyjne	Metanotrofy, organizmy reliktowe
Zjawiska towarzyszące	Degazacja, zmętnienie wody, obecność siarkowodoru	Ciche wypływy, struktury lodowe, lokalne zamarzanie
Zależność od warunków atmosferycznych	Wysoka – wpływ opadów i temperatury	Niska – system głęboki, izolowany termicznie
Znaczenie geochemiczne	Wskazuje na aktywność gazową i mineralizację	Długotrwała izolacja, zachowanie parametrów pierwotnych
Potencjał badawczy	Dobrze udokumentowany, klasyfikowany w literaturze	Słabo rozpoznany; otwarty na redefinicję

Dodatkowo, obecność magnetytu (Fe₃O₄) jako bufora redoks i źródła lokalnych anomalii magnetycznych sprzyja krystalizacji wody w warunkach przechłodzenia [8, 9, 12]. Mechanizm rozprężeniowego chłodzenia („efekt dezodorantu”) prowadzi do lokalnego zamarzania i uwięzienia gazów w strukturze lodowej. Zatem model ten może tłumaczyć nie tylko genezę zmarzliny suwalskiej, lecz także powstawanie biegunowych czap lodowych oraz epizody zlodowaceń w historii Ziemi jako rezultat synergii procesów gazowo-hydrologicznych, magnetycznych i geochemicznych.

Model gazowo-hydrologiczny pozwala również na reinterpretację fenomenu Suwałk jako polarnych obszarów Polski, tradycyjnie określanych mianem „bieguna zimna”. Zamiast wyłącznie klimatycznego uwarunkowania, proponowane ujęcie wskazuje na udział procesów endogenicznych – rozprężeniowego chłó-

dzenia solanek, uwięzienia gazów w strukturach lodowych oraz oddziaływania lokalnych anomalii magnetycznych – w kształtowaniu stabilnych stref niskiej temperatury. W tym kontekście Suwałki mogą być traktowane jako przykład regionu, w którym głębokie procesy gazowo-hydrologiczne współtworzą obraz klimatyczny i geologiczny, czego dowodem jest zmarzlina suwalska stwierdzona na głębokości 350–400 m p.p.t.

14. Podziękowania

Pracę tę dedykuję mojej Mamie – Geologowi, której pasja i wrażliwość na piękno procesów Ziemi były dla mnie nieustającym źródłem inspiracji.

15. Bibliografia

- [1] Paleczek, W. (2023). Uderzenie hydrodynamiczne w próbie oceny możliwości analizy przyczyn uszkodzeń nawierzchni z betonu asfaltowego. *Przegląd Komunikacyjny*, 78(11/12), 15-22.
- [2] Paleczek, W. (2025). Model geotermalno-krasowy zasilania wód słodkich: propozycja alternatywna wobec klasycznego cyklu hydrologicznego. *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 99(11), 34-37. <https://doi.org/10.15199/17.2025.11.4>.
- [3] Aeschbach-Hertig, W., & Solomon, D. K. (2013). Noble gas thermometry in groundwater hydrology. *The noble gases as geochemical tracers*, 81-122.
- [4] Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2004). *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC press.
- [5] Chemistry Stack Exchange. (2025). Why does calcium chloride cause a greater freezing point depression in water than magnesium chloride? Dostęp online: <https://chemistry.stackexchange.com/questions/58816/why-does-calcium-chloride-cause-a-greater-freezing-point-depression-in-water-tha> (dostęp: 19 października 2025).
- [6] He, R., Hu, B., Zhong, H., Jin, F., Fan, J., Hu, Y. H., & Jing, Z. (2019). Reduction of CO₂ with H₂S in a simulated deep-sea hydrothermal Vent System. *Chemical Communications* 55, no. 8: 1175–1178. <https://doi.org/10.1039/C8CC08075E>.
- [7] Navarro-Cárdenas, I., & Martín, Á. (2023) Thermodynamic modelling of mixtures of water, carbon dioxide and hydrogen at high pressure and temperature for hydrothermal CO₂ reduction processes. *Frontiers in Physics* 11: 1219630. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1219630>.
- [8] Otero, L., Rodríguez, A. C., & Sanz, P. D. (2020). Effect of the frequency of weak oscillating magnetic fields on supercooling and freezing kinetics of pure water and 0.9% NaCl solutions. *Journal of Food Engineering*, 273, 109822.
- [9] Jarulertwattana, P., Siri wattanayotin, S., & Asavasanti, S. (2020). Effect of oscillating magnetic field on freezing rate, phase transition time and supercooling of deionized water. *Applied Science and Engineering Progress*, 13(1), 32-37. <http://doi.org/10.14416/j.asep.2019.08.001>
- [10] Honczaruk, M., & Śliwiński, Ł. (2011). Wyniki badań hydrogeologicznych w strefie występowania głębokiej wieloletniej zmarzliny w otworze wiertniczym Udryń Pig 1. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 445(445-1), 203-216. <http://doi.org/10.2478/v10134-011-0015-3>
- [11] Upin, H. (2020). *Connections Between Hydrothermal System Geochemistry and Microbiology: Traversing Tectonic Boundaries in the South-Central Peruvian Andes* (Master's thesis, Utah State University).
- [12] Urbic, T. (2023). The Magnetic Field Freezes the Mercedes-Benz Water Model. *Entropy*, 25(12), 1618. <http://doi.org/10.3390/e25121618>
- [13] Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy. (2025). Odkryto wieczną zmarzlinę w Polsce. Dostęp online: <https://www.pgi.gov.pl/kontakt/rzecznik-prasowy/2723-odkryto-wieczna-zmarzlin-polsce.html>
- [14] Carroll, J. (2020). *Natural gas hydrates: a guide for engineers*. Gulf Professional Publishing.
- [15] Sander, R. (2015). Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(8), 4399-4981. <https://doi.org/10.5194/acp-15-4399-2015>.
- [16] Kvenvolden, K. A. (1988). Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere?. *Chemical geology*, 71(1-3), 41-51. [http://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90104-0](http://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90104-0)
- [17] Rouwet, D., Tamburello, G., Sciarra, A., Ricci, T., & Caliro, S. (2018, April). The Fangaia mud pool, Solfatara (Campi Flegrei, Italy): the effect of scrubbing on CO₂ and H₂S degassing. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 14058). <https://doi.org/10.3390/min10121051>.
- [18] Li, S., Dong, X., Humez, P., Borecki, J., Birks, J., McClain, C., Mayer, B., Strous M., & Diao, M. (2025). Proteomic evidence for aerobic methane production in groundwater by methylotrophic Methylothermus. *The ISME Journal*, 19(1), wraf024. <https://doi.org/10.1093/ismejo/wraf024>.
- [19] Buffett, B., & Archer, D. (2004). Global inventory of methane clathrate: sensitivity to changes in the deep ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 227(3-4), 185-199. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.09.005>
- [20] Longone, P. J., Sanchez Varretti, F. O., Bulnes, F. M., & Ramirez Pastor, A. J. (2024). Lattice-gas model of methane and carbon dioxide sl clathrate hydrates: A comprehensive study using analytical cluster approximation and Monte Carlo simulations. *Physical Review E*, 110(6), 064103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.110.064103>.
- [21] Sloan Jr, E. D., & Koh, C. A. (2007). *Clathrate hydrates of natural gases*. CRC press.
- [22] Max, M. D., Johnson, A. H., & Dillon, W. P. (2009). Economic geology of methane hydrate: Potential and challenges. W: T. S. Collett, A. Johnson, C. Knapp & R. Boswell (red.), *Natural gas hydrates—Energy resource potential and associated geologic hazards* (AAPG Memoir 89, s. 313–352). American Association of Petroleum Geologists; Max, M. D., Johnson, A. H., & Dillon, W. P. (2006). *Economic Geology of Natural Gas Hydrate*. Springer.
- [23] Bregnard, D., Leins, A., Cailleau, G., Vieth-Hillebrand, A., Eichinger, F., Ianotta, J., Hoffmann, R., Uhde, J., Bindschedler S., Regensourg, S., & Junier, P. (2023). Unveiling microbial diversity in deep geothermal fluids, from current knowledge and analogous environments. *Geothermal Energy*, 11(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00269-z>.
- [24] Urbiet, M. S., Panyushkina, A., Cuadros-Orellana, S., Gonzalez-Toril, E., Aguilera-Bazán, A., & Blamey, J. M. (2023). Microbial communities from geothermal fields: recent advances on characterization, interaction with the environment, and potential applications in biotechnology. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1205759. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1205759>.
- [25] Juan, J., Pronsato, M. E., Ramirez-Pastor, A. J., & Longone, P. (2025). Two-Dimensional Lattice-Gas model for methane clathrate Hydrates: Comparative analysis with experiments and Three-Dimensional simulations. *Journal of Molecular Liquids*, 127669. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127669>.
- [26] Ruppel, C. D., & Kessler, J. D. (2017). The interaction of climate change and methane hydrates. *Reviews of Geophysics*, 55(1), 126-168. <https://doi.org/10.1002/2016RG000534>.