

Fundusze Europejskie

dla Polski Wschodniej



Nieznany świat wnętrza Ziemi

Bioróżnorodność mikroorganizmów głębokiej biosfery (deep biosphere)

Maciej Walczak

11.05.2026



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Czym jest głęboka biosfera?

- Obejmuje skorupę kontynentalną i oceaniczną od głębokości 1m (złoża ropy, gazu i węgla, wody głębiowe (gorące i zimne), skały podziemne i ich przestrzenie, systemy hipertermalne i wysokim zasoleniu)
- Jeden z największych rezerwuarów biomasy, całkowita biomasa przewyższa tę zawartą we wszystkich oceanach
- Jeśli tak jest to: większość prokariontów żyje w głębokiej biosferze



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Historia badań

- XVIII w. – Humboldt opisuje organizmy w kopalniach
- XIX w. – Koch bada mikroorganizmy glebowe
- Początek XX w. – Namysłowski odkrywa bakterie w kopalniach soli w Wieliczce
- Lata 40-te XX wieku – badania dna głębin oceanicznych, m.in. prace ZoBell
- Koniec XX wieku – uruchomienie prywatnych i rządowych programów badania mikrobiologii głębin (USA, Niemcy, Francja, UK, Australia, Japonia)
- Przełom XX i XXI wieku – rewolucja molekularna – [Metagenomika](#) i „[microbial dark matter](#)” - wykazanie ogromnej biomasy i różnorodności;
- Obecnie???? – Krok wstecz



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Żeby nie być ignorantem...



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Table 4 Diversity studies on deep geothermal fluids or deposits in side geothermal power plants

Site or region	Temperature [°C]	Depth [m]	pH	Other measured conditions	Type(s) of sample	Archaea	Bacteria	Fungi	Reference
Molasse Basin (DE)	61–103 °C	NA	6.6–7.3	salinity 600–900 mg/l; DOC: 6.4–19.3 mg C/l	Fluids	X	X		(Alawi et al. 2011)
Bruchsal (DE)	132 °C (deepest drilling point)	2500 m	5.4–5.8	2.2 MPa (inside drilling pipes)	Biofilms		X		(Filippidou et al. 2016)
Gross Schönebeck (DE)	150 °C (reservoir)	4200 m	5.5 at 25 °C		Deposits		X		(Filippidou, Jaussi, et al. 2015; Filippidou et al. 2016)
Bad Blumau (AT)	107 °C	2800 m	8	salinity 20 g/l; sulfate 500 mg/l	Fluids	X	X		(Westphal et al. 2019)
Neu-brandenburg (DE)	45–54 °C or 65–85 °C	1250–1335 m	6	mineralization 131 g/l; DOC 3.5 g/l	Fluids (different sources) and filter		X		(Lerm et al. 2013)*
Pyrzyce (PL)	61 °C	1640 m	6.2	TDS 121 g/L	Fluids	X	X		(Kalwasińska et al. 2020)
Stargard (PL)	85 °C	2578 m	5.9	TDS 140 g/L	Fluids	X	X		(Kalwasińska et al. 2020)
Otaniemi (FI)	46–76 °C	3203 m to 4375 m	NA	NA	Fluids		X		(Purkamo et al. 2020)



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Warunki życia

- Brak światła i ograniczony dostęp lub brak tlenu
- Deficyt węgla organicznego (nie dotyczy pokładów ropy, gazu i węgla)
- Podstawymi źródłami energii są reakcje chemiczne układu woda–skała
- Bardzo niskie strumienie energii



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



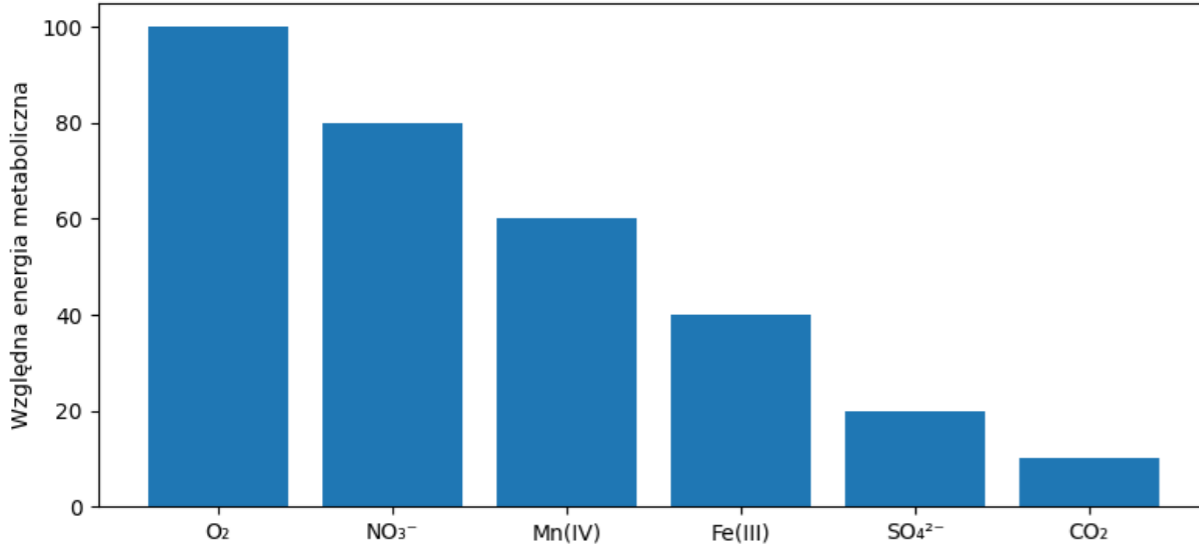
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Strefowość redoks

Spadek wydajności energetycznej akceptorów elektronów



“Redox ladder” - strefowość redoks i dostępność energii

Eh (mV)	Akceptor elektronów	Reakcja (przykład)	ΔG° (kJ/mol e ⁻)	Warunki	Dominujące procesy i mikroorganizmy
+400	O ₂	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	+820	utleniające (mikroaerofilne)	tlenowe oddychanie bakterie tlenowe i mikroaerofile
+300	NO ₃ ⁻	$NO_3^- + 6H^+ + 5e^- \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + 3H_2O$	+420	anoksyczne	denitryfikacja bakterie denitryfikujące
+200	Mn(IV)	$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	+220	anoksyczne	redukcja manganu bakterie redukujące Mn(IV)
+100	Fe(III)	$Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^- \rightarrow Fe^{2+} + 3H_2O$	+110	anoksyczne	redukcja żelaza bakterie redukujące Fe(III)
0				Warunki utleniające	
-100				Strefa przejściowa	
-300	SO ₄ ²⁻	$SO_4^{2-} + 8H^+ + 8e^- \rightarrow HS^- + 4H_2O$	-220	anoksyczne	redukcja siarczanów bakterie redukujące SO ₄ ²⁻
-400					
< -500	CO ₂	$CO_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-244	silnie redukcyjne	metanogeneza archeony metanogenne

Wraz ze spadkiem Eh dostępne są akceptory o niższym potencjale redoks i mniejszej wydajności energetycznej.



Fundusze Europejskie dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską



Warunki fizykochemiczne

- Wysokie ciśnienie – zawsze
- Ekstremalne temperatury: bardzo niskie lub częściej bardzo wysokie: wzrost temperatury średnio 25–30°C/km
- Zasolenie i toksyczne związki (???)
- Ekstremalne pH: bardzo kwaśne lub alkaliczne; pH >11 w serpentynitach



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej

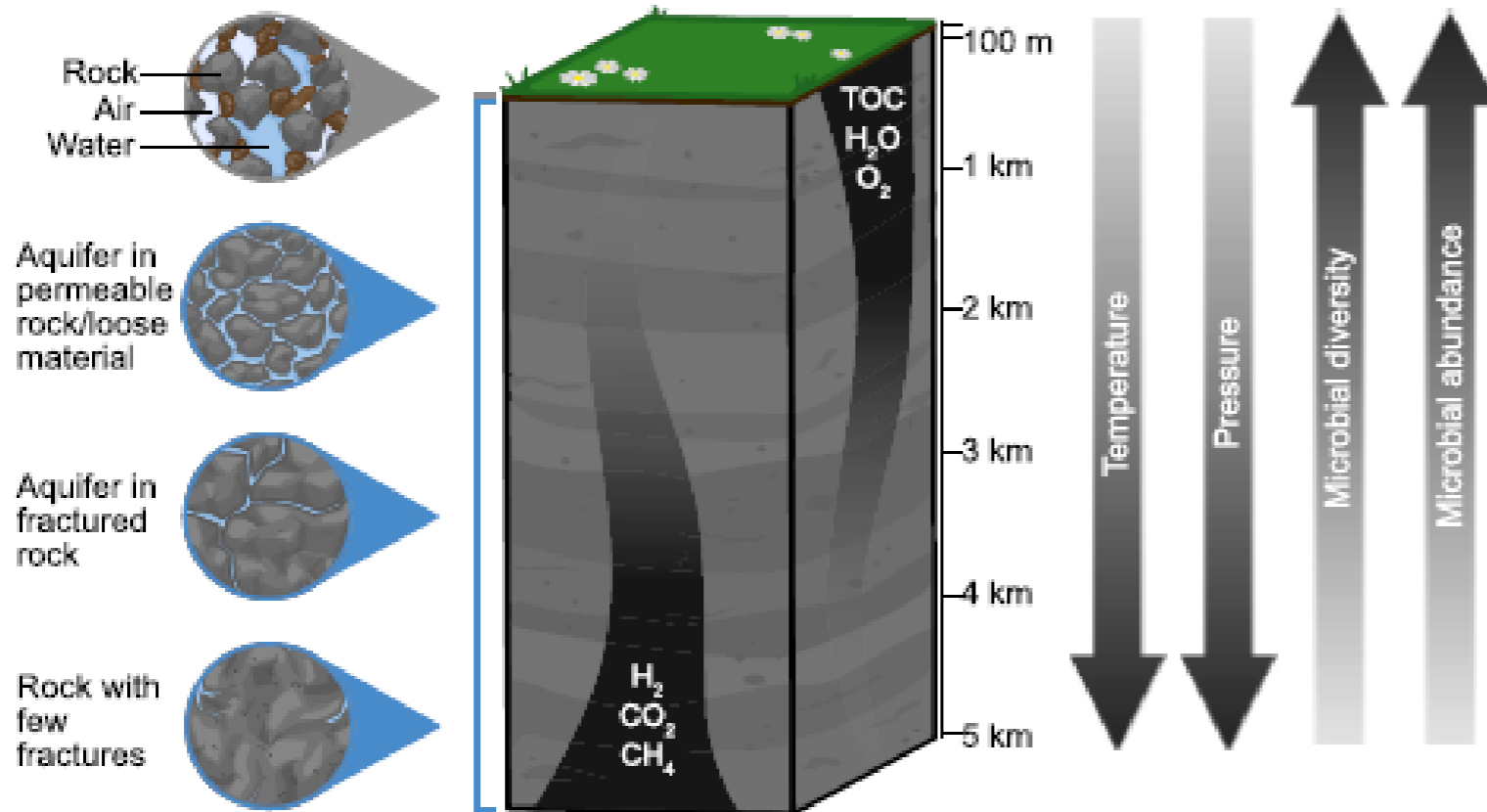


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Zmiany zachodzące wraz z głębokością



Poza warstwami wodonośnymi, szczeliny skalne w strefie nasyconej są często wypełnione wodą.

Wraz ze wzrostem głębokości wzrasta również temperatura i ciśnienie, natomiast różnorodność i liczebność mikroorganizmów są największe bliżej powierzchni.

Węgiel organiczny, woda i tlen stają się coraz bardziej niedostępne wraz z głębokością, podczas gdy gazy H₂, CO₂ i CH₄ występują obficie w głębokich warstwach pod powierzchnią.



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej

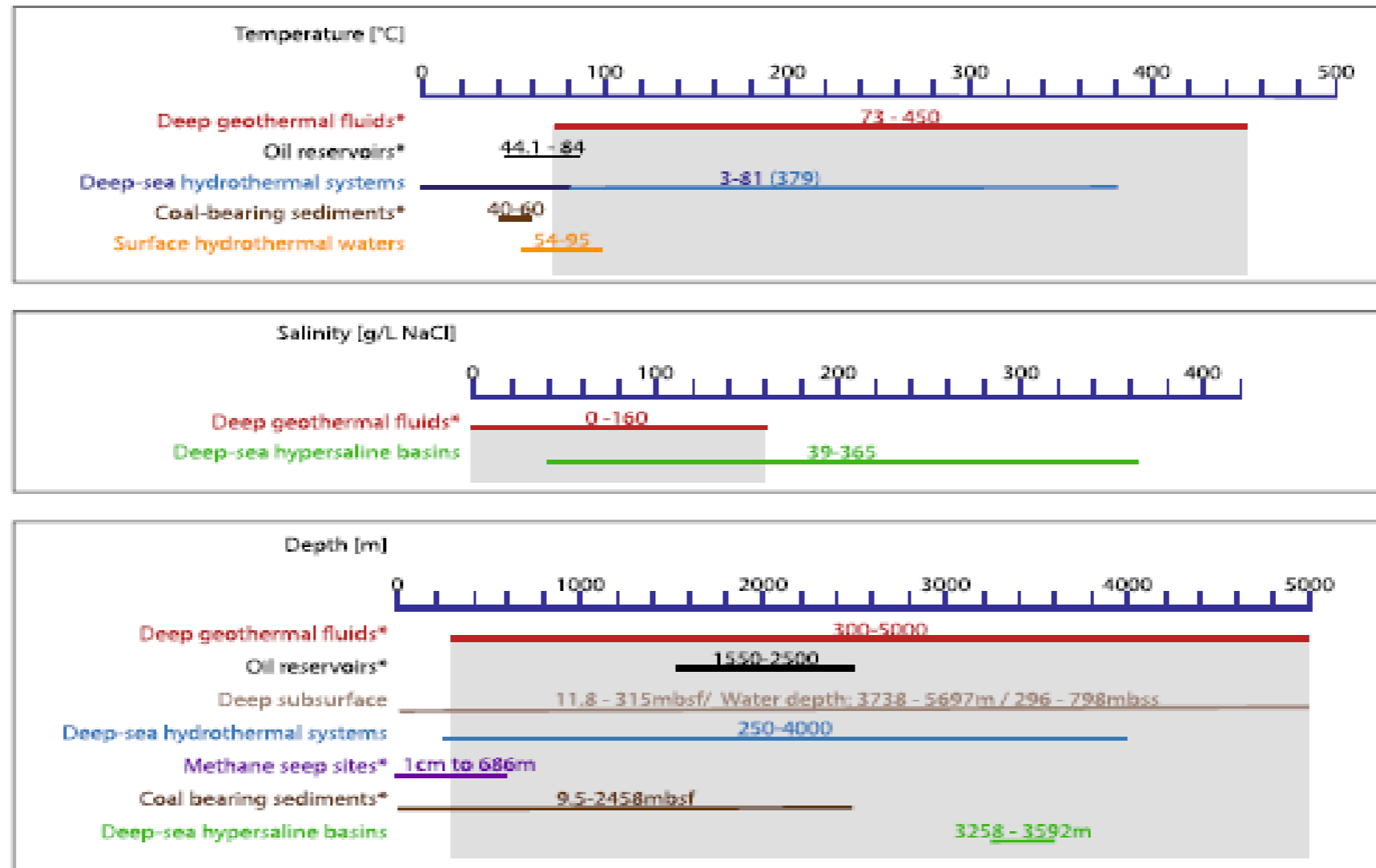


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Porównanie warunków fizykochemicznych różnych środowisk





Strategie życiowe

Fundusze Europejskie

Dominują mikroorganizmy chemoautotroficzne

Adaptacje błon i pomp protonowych

Funkcjonowanie blisko granicy energetycznej życia

Wolny metabolizm

Czas generacji: lata lub dekady

Strategia „slow life” – jako konsekwencja warunków życia



Fundusze
Europejskie

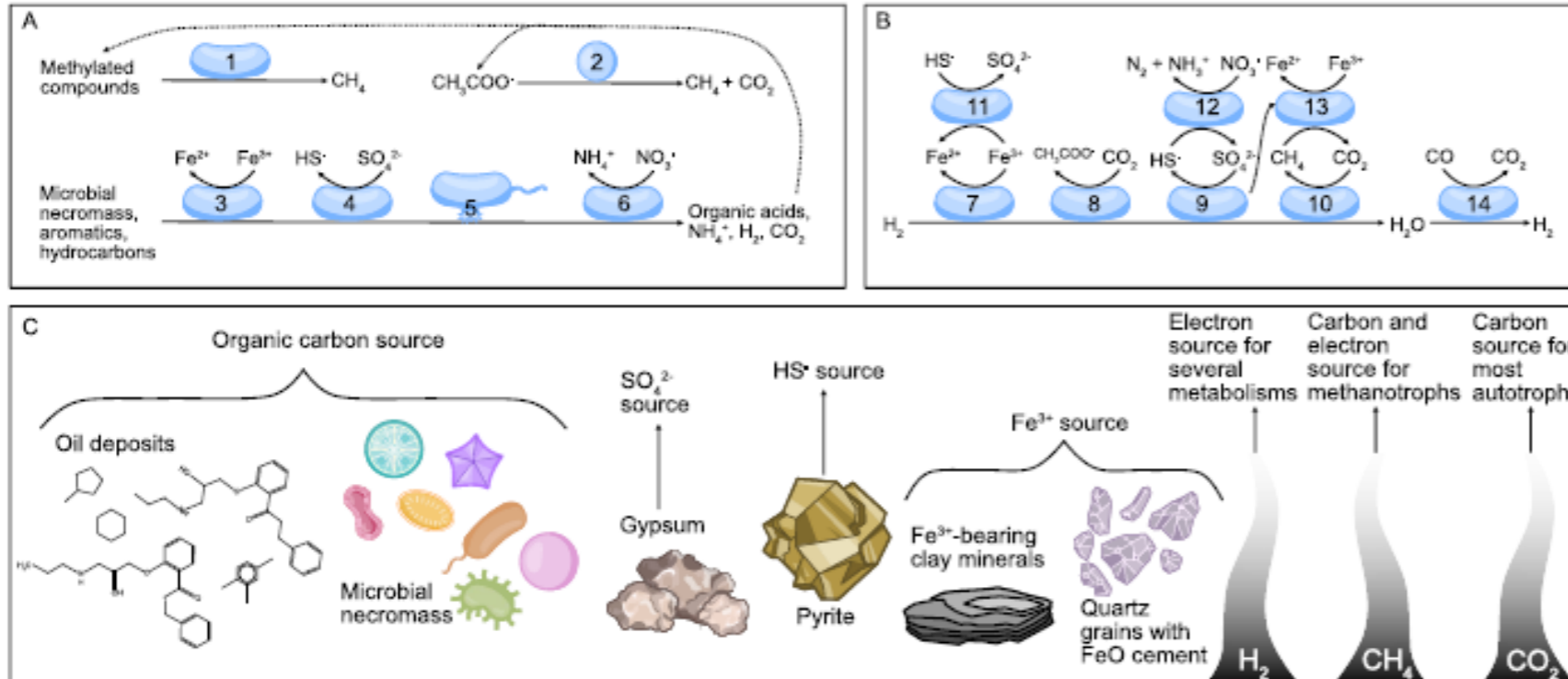


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Przykładowy schemat zależności metaboliczno-energetycznych



Utlenianie organicznych związków węgla może wspierać metanogenezę metyloτροφiczną (1), metanogenezę acetoklastyczną (2), redukcję żelaza (3), redukcję siarczanów (4), fermentację, potencjalnie obejmującą relacje episymbiotyczne oraz redukcję azotanów (6). Utlenianie H_2 może wspierać redukcję żelaza (7), acetogenezę (8), redukcję siarczanów (9) i metanogenezę (10), a zredukowane żelazo, siarczan i dwutlenek węgla oraz elektrony wytwarzane w tych procesach mogą działać jako donory elektronów w utlenianiu siarczków (11), redukcji azotanów (12) i beztlenowym utlenianiu metanu (13). Woda może zostać zredukowana do H_2 , co jest powiązane z utlenianiem CO do CO_2 w procesie karboksydotrofii (14).



Fundusze Europejskie dla Polski Wschodniej



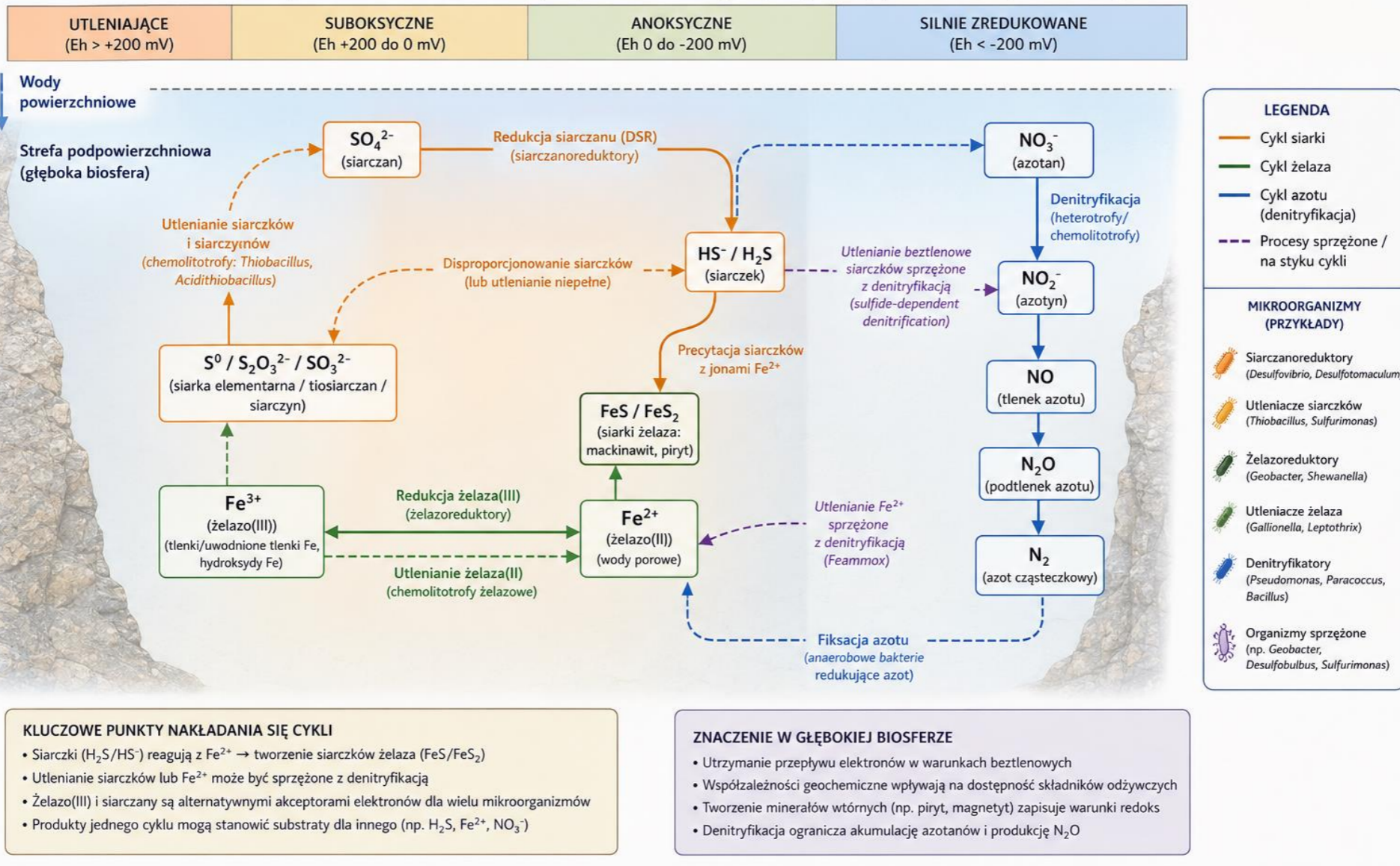
Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską



ZAZĘBIONE CYKLE: SIARKI, ŻELAZA I DENITRYFIKACJA W GŁĘBOKIEJ BIOSFERZE

Interakcje redoks w środowiskach podpowierzchniowych (skały, wody porowe, strefy uskawkowe)



Fundusze Europejskie dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską



Bioróżnorodność

- Ogólnie rzecz ujmując: Dominacja Proteobacteria i Firmicutes
- Metanogeny i SRB
- Bakterie przekształcające żelazo i siarkę
- Bakterie zdolne do wykorzystania wodoru oraz strumienia elektronów bezpośrednio ze skał za pomocą zewnątrzkomórkowych cytochromów



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej

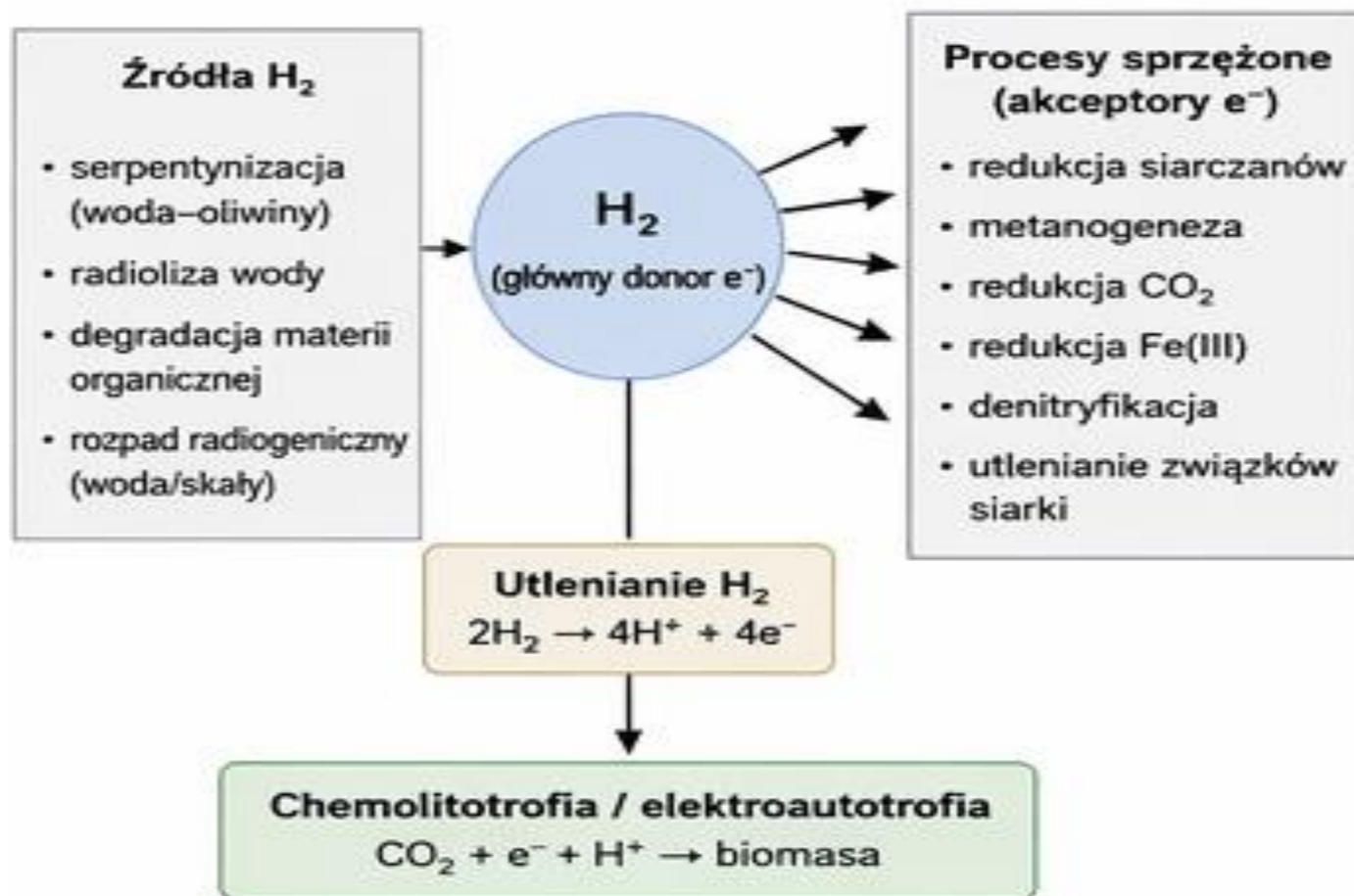


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Wodór jako uniwersalny donor elektronów



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Comamonadaceae OTU as a Remnant of an Ancient Microbial Community in Sulfidic Waters

Edyta Deja-Sikora^{1,2} • Marcin Gołębiowski^{1,3} • Agnieszka Kalwasińska² • Arkadiusz Krawiec⁴ • Przemysław Kosobucki⁵ • Maciej Walczak²

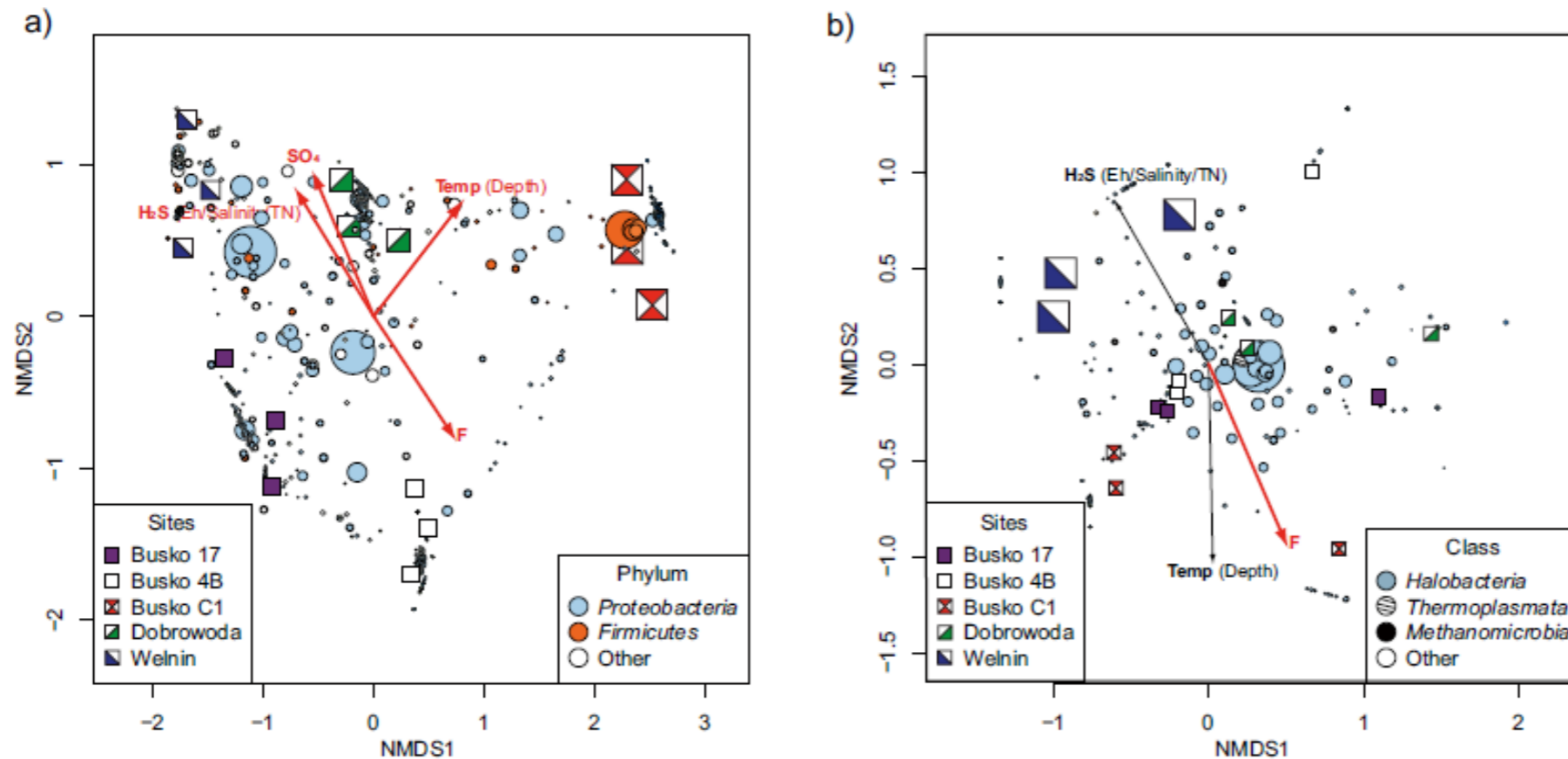


Fig. 2 a, b Bacterial OTUs gathered around specific sites

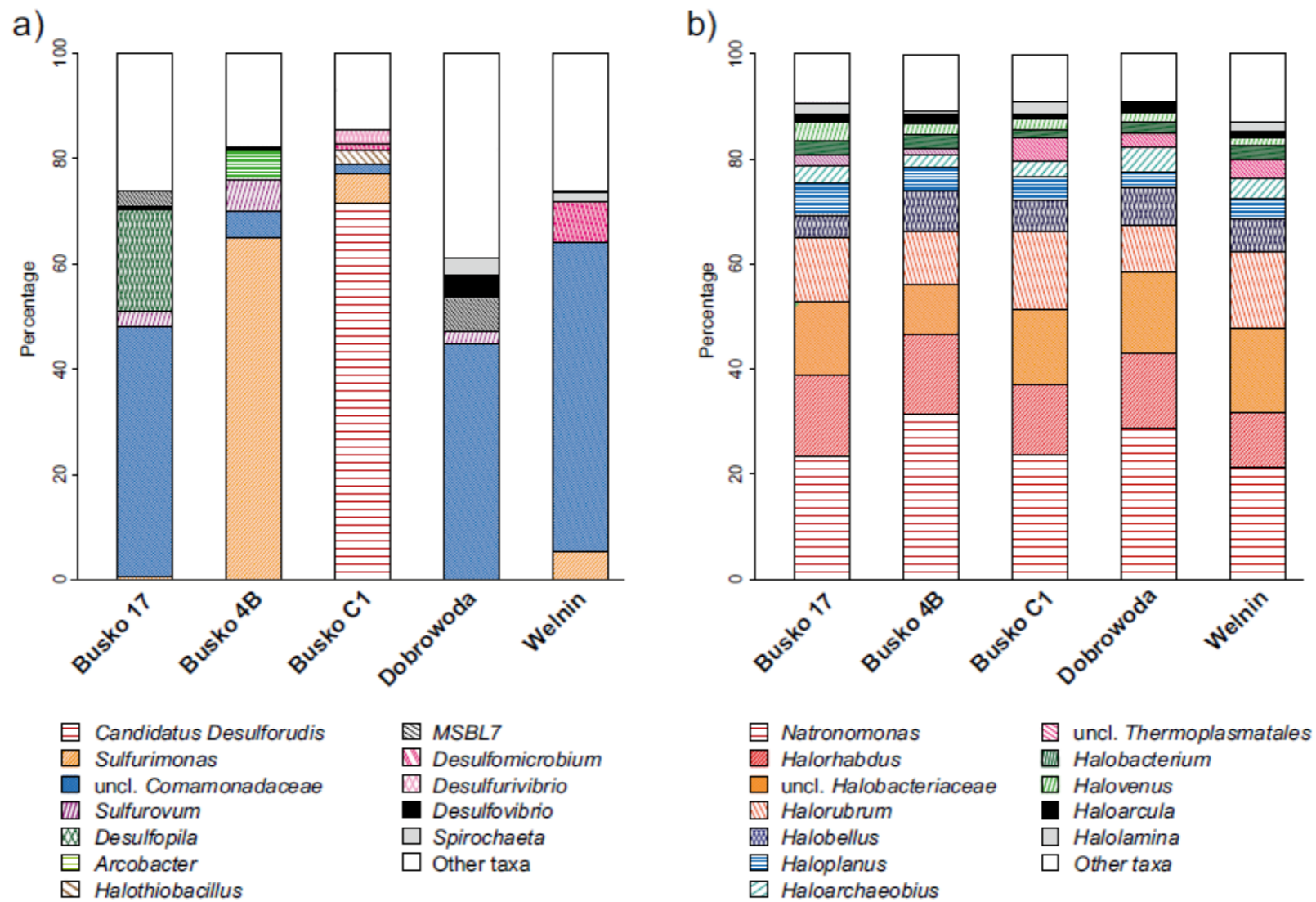


Fig. 1 a, b Percentage composition of microbial communities



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej

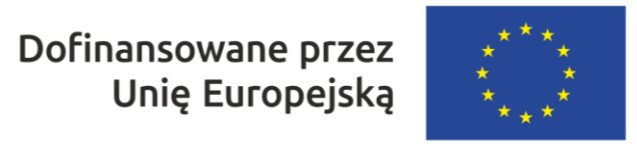
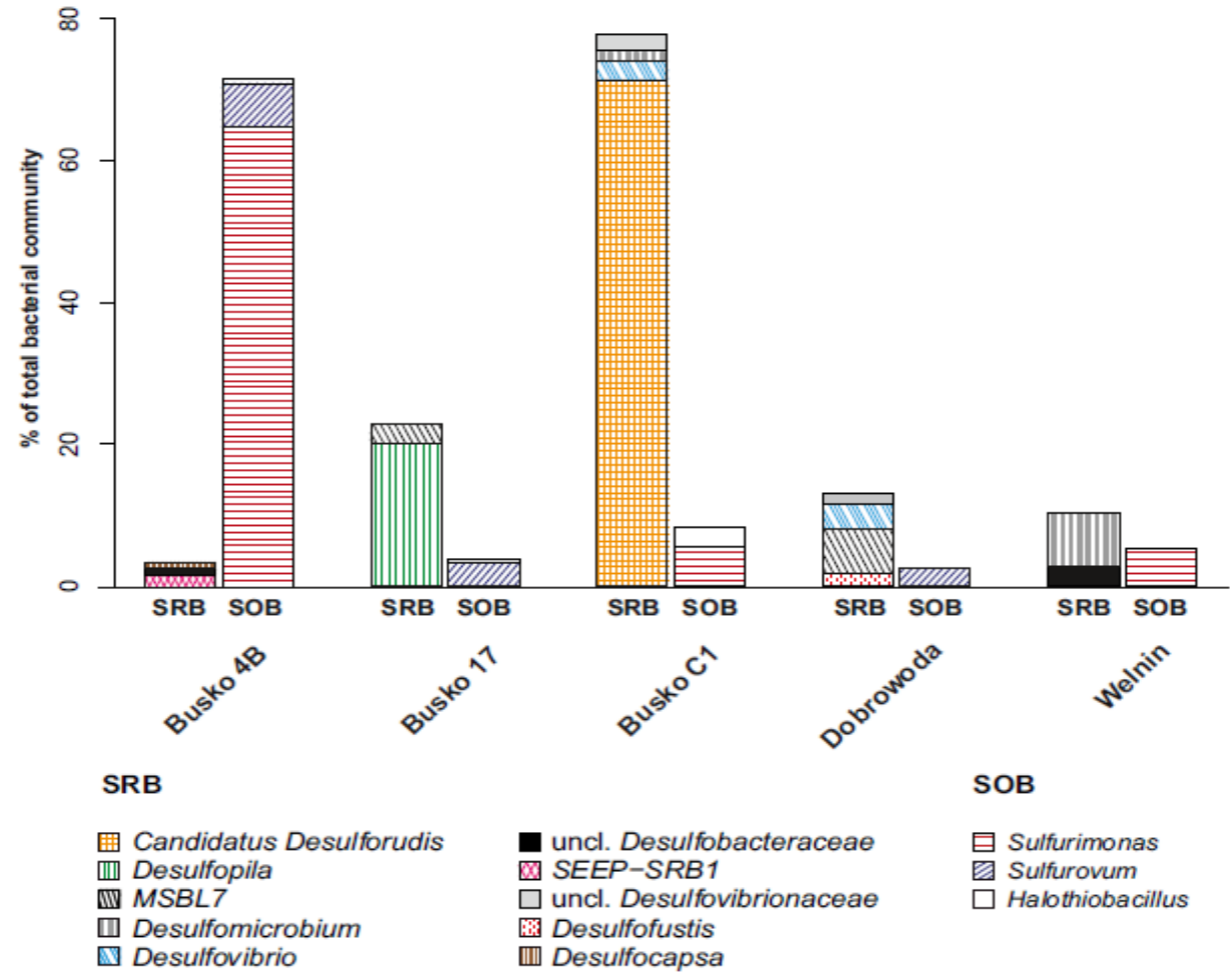


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Grupy bakterii potencjalnie zaangażowane w cykle siarki



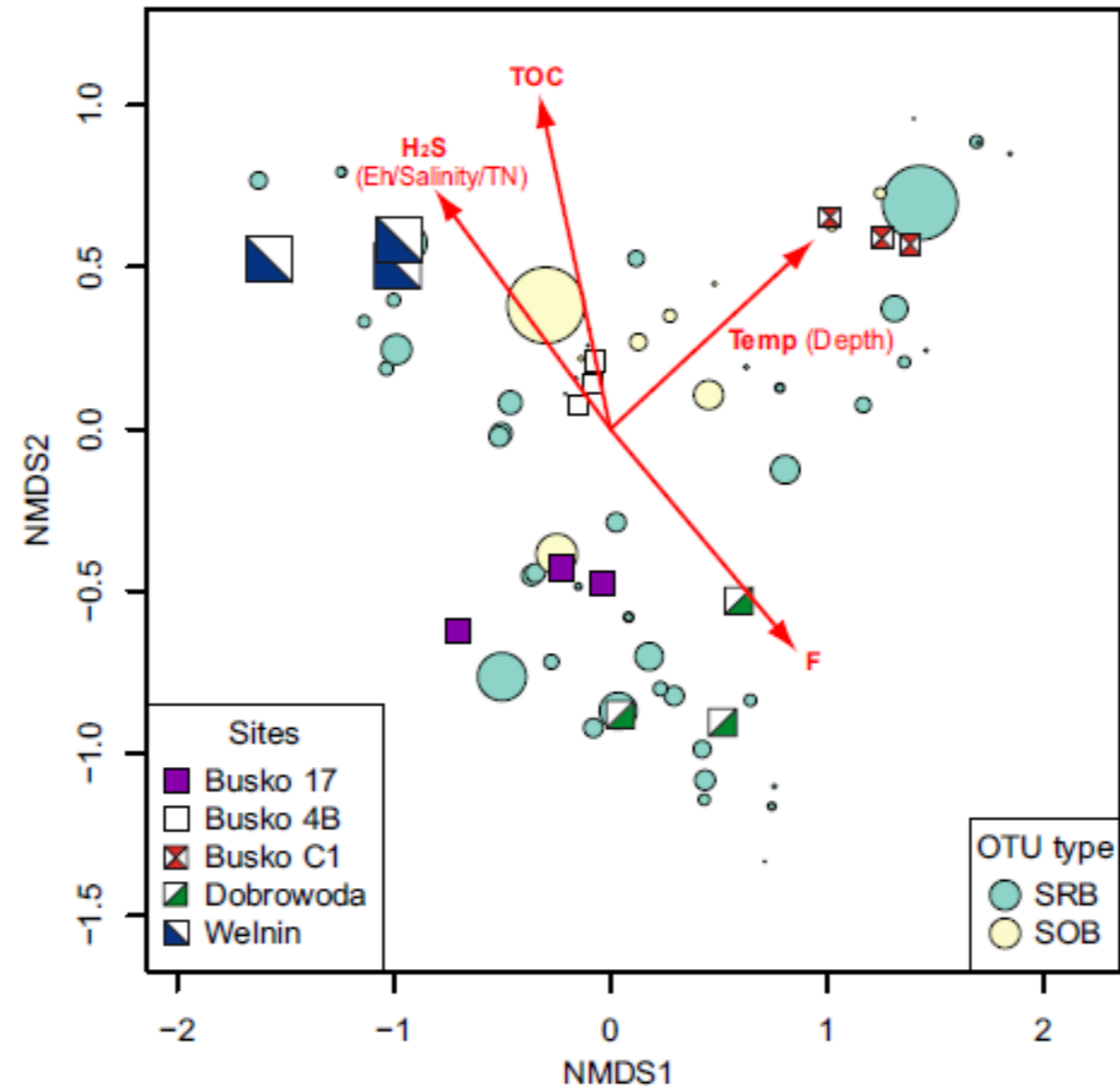


Fig. 4 NMDS plot showing dispersion of sampling sites and bacterial genera related to sulfur cycling



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Niż Polski

Bioróżnorodność mikroorganizmów hodowalnych solanek

Sampling site	Intake	Isolate	The closest 16S rDNA relative			
			Species	Strain	Reference source of isolation	Similarity [%]
Ciechocinek	A	1	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	D8	Not known	99
		2	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Zzx45	Not known	100
		3	<i>Staphylococcus pasteurii</i>	HN-35	Spacecraft surface	100
		4	<i>Staphylococcus pasteurii</i>	HN-35	Spacecraft surface	99
Kołobrzeg	B-1	1	<i>Bacillus pumilus</i>	HNS70	Marine sediment	100
		2	<i>Micrococcus sp.</i>	JNU-H022	Marine sediment	99
		3	<i>Bacillus methylotrophicus</i>	HB26	Tobacco rhizospheric soil	99
		4	<i>Micrococcus yunnanensis</i>	KNUC422	Not known	99
	B-2	1	<i>Micrococcus luteus</i>	HN-40	Spacecraft surface	99
		2	<i>Micrococcus yunnanensis</i>	KNUC422	Not known	99
		3	<i>Marinobacter lipolyticus</i>	SM-19	Not known	99
		4	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	BS22	Soil	100
	B-3	1	<i>Pseudoalteromonas issachenkonii</i>	XH148	Bottom seawater	99
		2	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Jc-07	Farmland soil	99
		3	<i>Kocuria palustris</i>	XH182	Deep-sea sediment	99
		4	<i>Bacillus licheniformis</i>	TS_10	Hot spring	99
Połczyn	C	1	<i>Kocuria sp.</i>	13-2-9	South China Sea	99
		2	<i>Kocuria sp.</i>	13-2-8	South China Sea	99
		3	<i>Staphylococcus haemolyticus</i>	CIFRI P-TSB-72	Marine water from Puri	99
		4	<i>Micrococcus sp.</i>	A1	Wetlands	99

Maciej Walczak, Edyta Deja-Sikora, Agnieszka Kalwasińska, Marcin Polański and Arkadiusz Krawiec



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Bioróżnorodność mikroorganizmów solanek Nizu Polskiego (NGS)

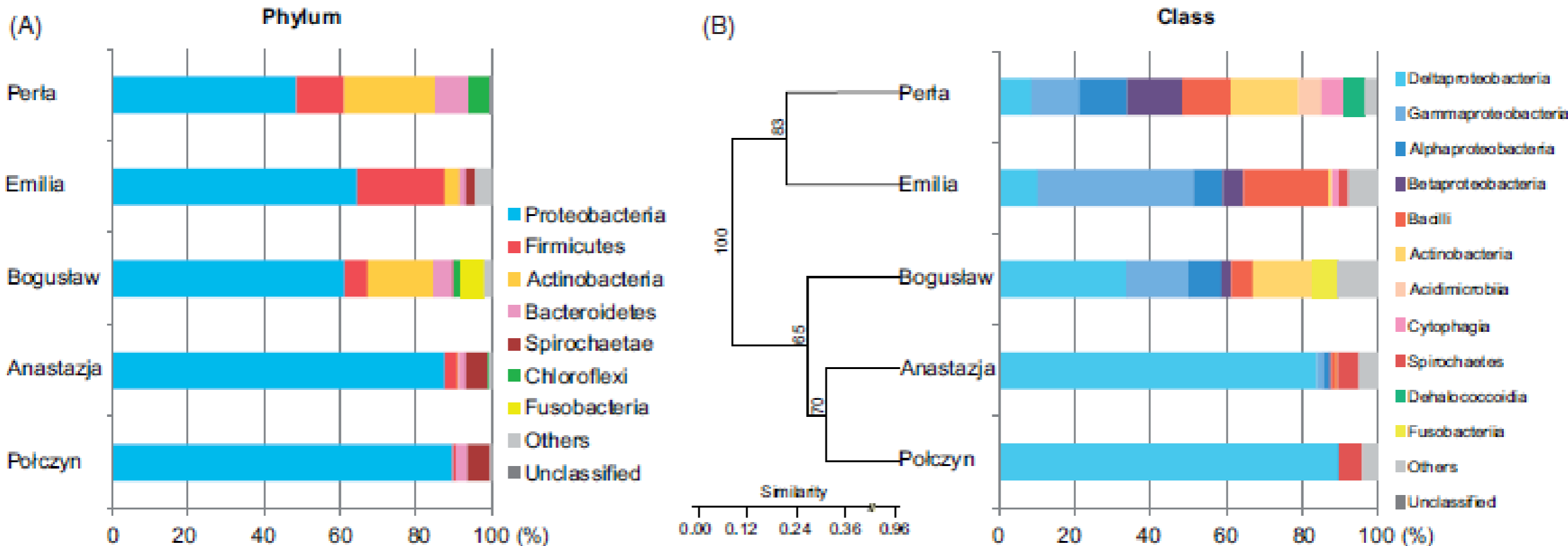


Figure 4. Bacterial community composition and UPGMA dendrogram based on 16S rRNA genes present in mineral waters from Kołobrzeg and Polczyn. The most abundant phyla (A) and classes (B). The dendrogram was constructed using Bray–Curtis dissimilarity values at the OTU level. Bootstrap values (%) for 1000 replicates are given at the nodes.

Bakterie redukujące siarczany w solankach Niziu Polskiego

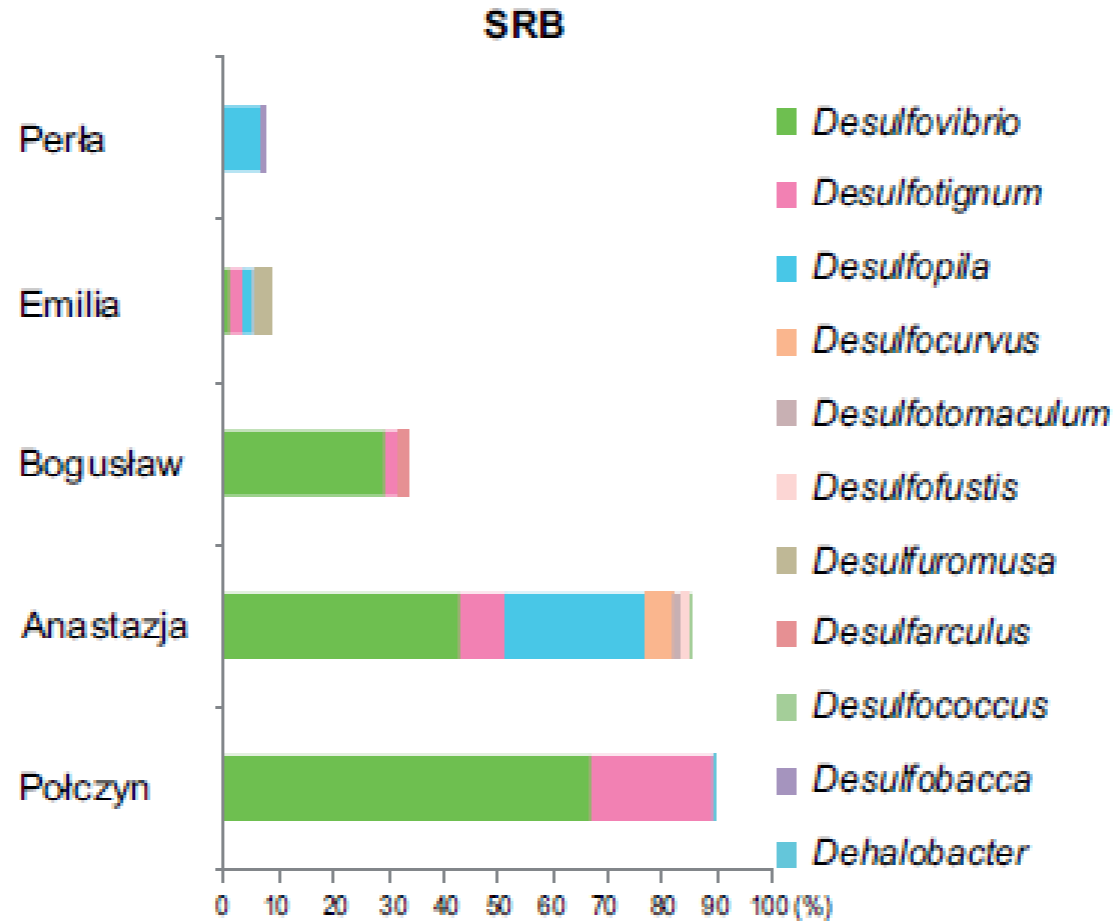


Figure 5. Sulfate-reducing bacteria (SRB) in mineral water from Kołobrzeg and Połczyn based on NGS data. Percentage values refer to their contribution to the total number of NGS reads.

Miejsca badań Fablet i inni 2025; Cel: zależności na linii mikroorganizmy a geochemia.

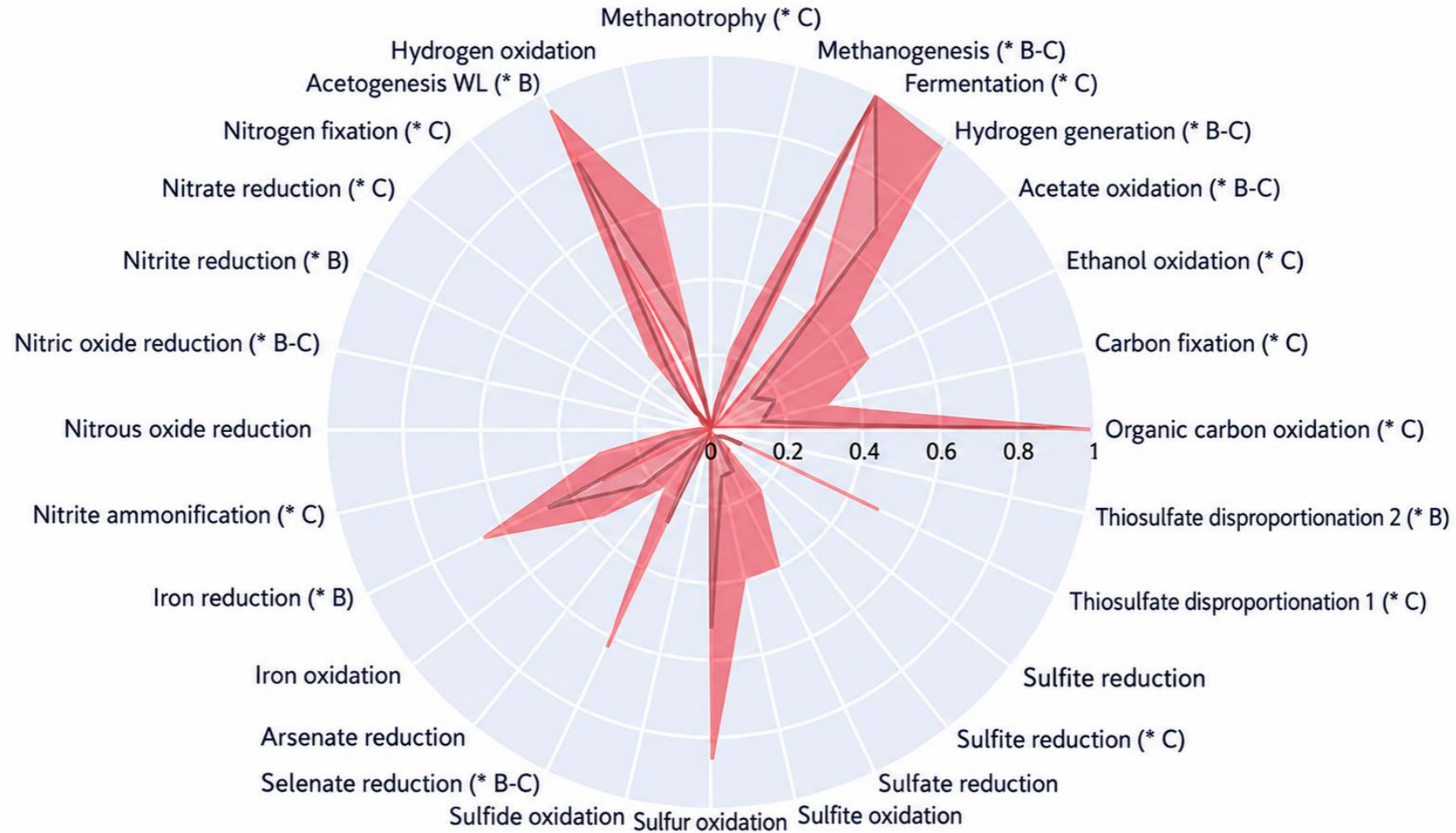


● Szczelinowe wody solankowe

● Kawerny przestrzenne niezasolone

(a)

Microbial cluster A



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



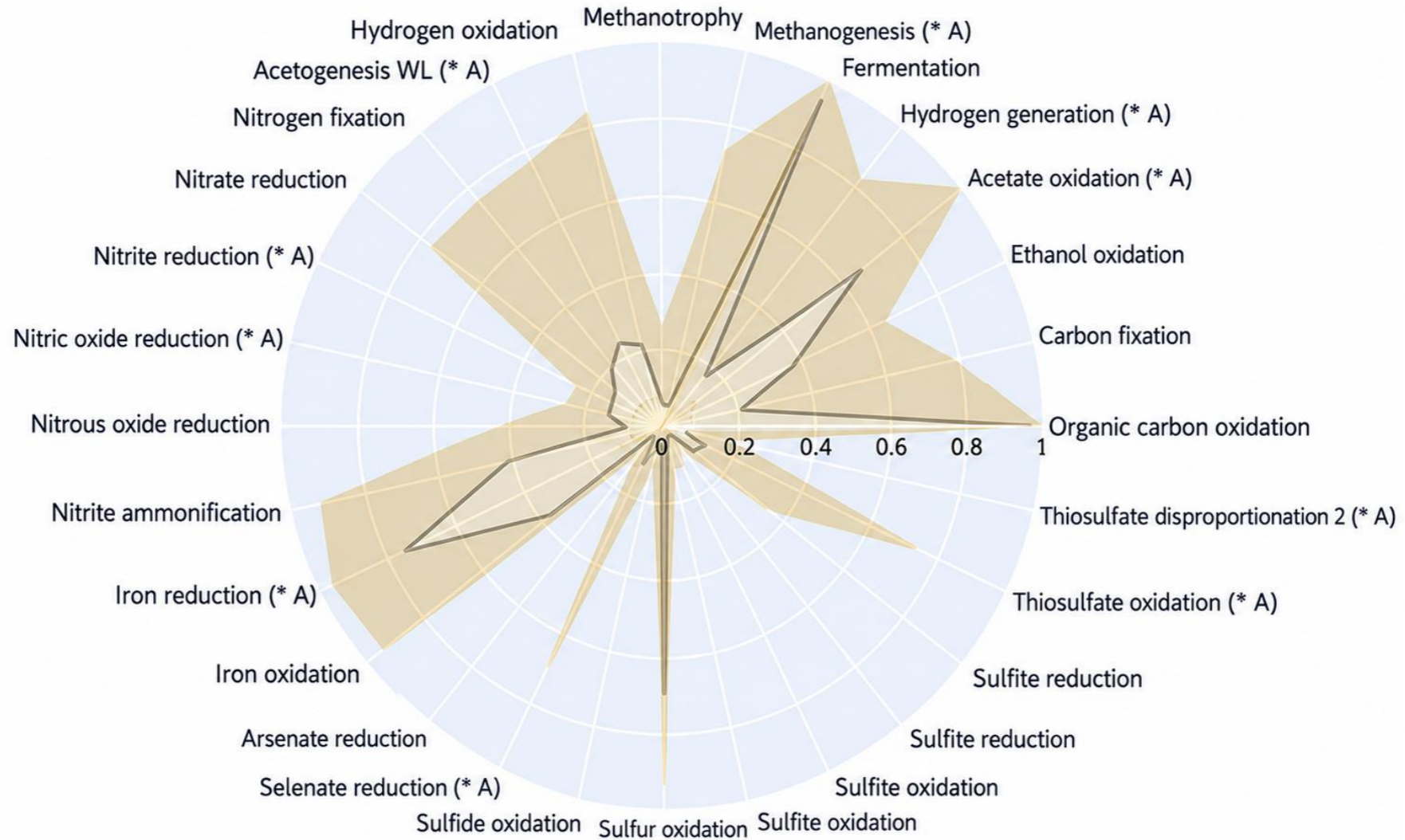
Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



(b)

Microbial cluster B



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



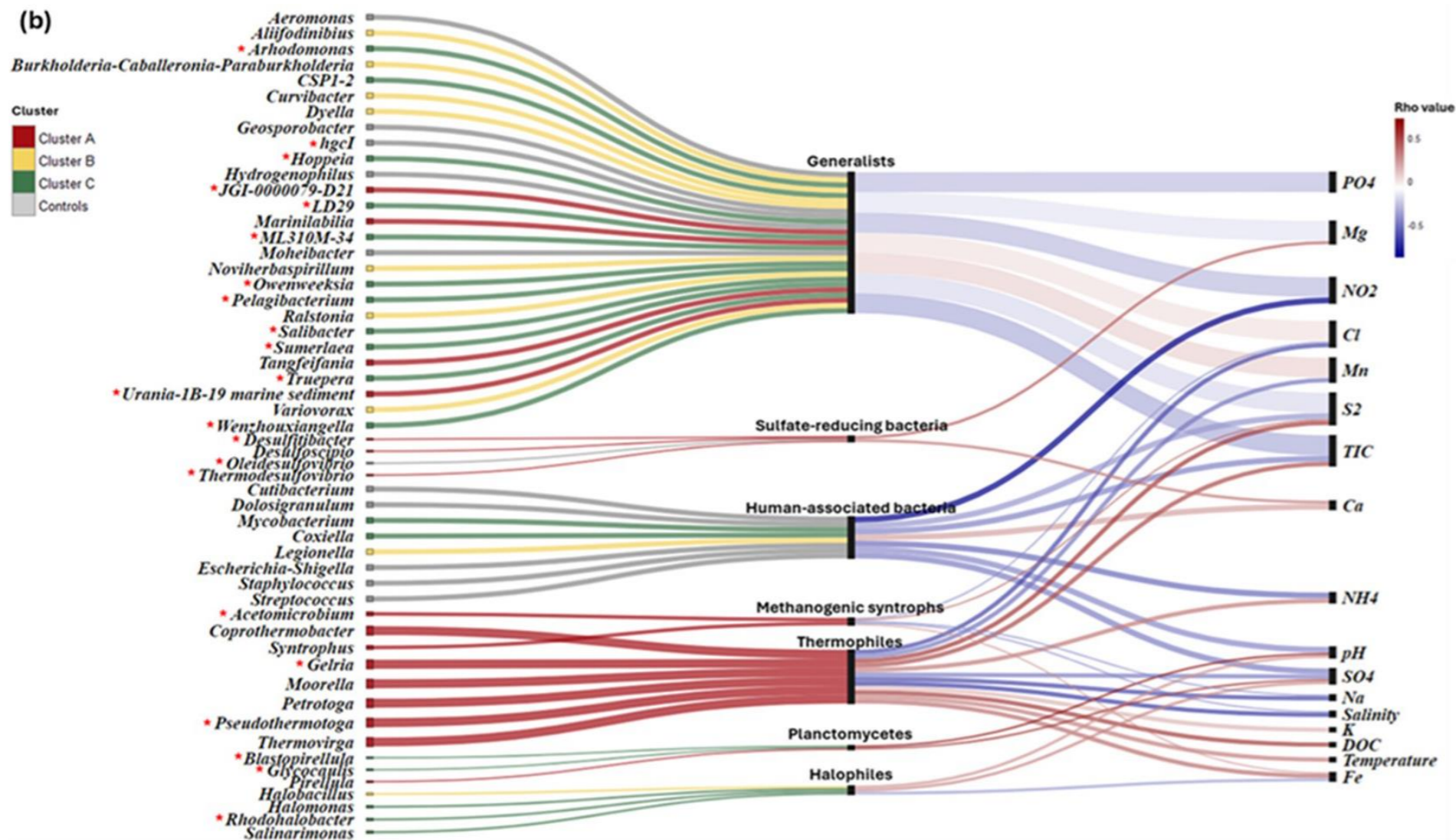


Diagram Sankeya przedstawiający kategoryzację bakterii dominujących (bez czerwonej gwiazdki) i wskaźnikowych (z czerwoną gwiazdką) według ich domniemanej funkcji ekologicznej, powiązanej z parametrami fizykochemicznymi. Cechy rodzajowo-funkcyjne odpowiadają określonym klasterom mikrobiologicznymi: A na czerwono, B na żółto, C na zielono



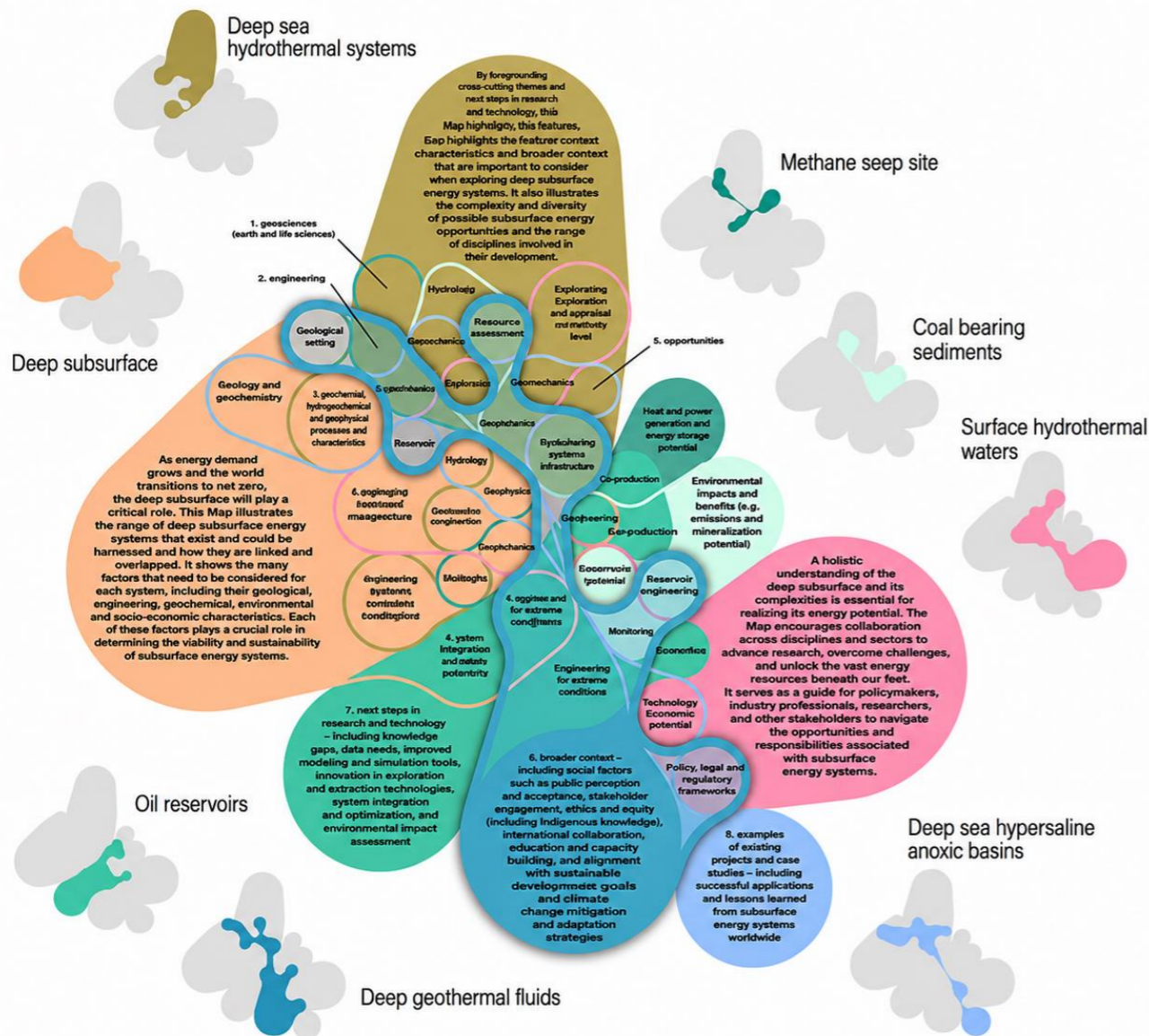
Fundusze Europejskie dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską





Światowe porównanie bioróżnorodności mikroorganizmów na podstawie badań różnych wód geotermalnych (Bernard i inni 2023)



Fundusze Europejskie dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita Polska

Dofinansowane przez Unię Europejską



Strategia „slow life”

To konsekwencja braku energii skutkująca:

1. Spowolnienie metabolizmu,
2. Wzrost znaczenia syntrofii czyli selekcji mikroorganizmów o wysokiej efektywności energetycznej,
3. Życiem na granicy równowagi termodynamicznej
4. Podziałami co kilka, kilkadziesiąt lub nawet kilkaset lat – aenofile – ekstremalnie wolny wzrost



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Desulforudis audaxviator

Desulforudis audaxviator: bakteria żyjąca w kopalniach złota w RPA na głębokości ok. 3 km. Żyje bez dostępu do tlenu i światła, a jej czas podziału szacuje się na **setki, a nawet tysiące lat**.

Jest zdolna do:

- wiązania CO₂
- redukcji NO₃,
- wiązania N₂,
- utleniania H₂,
- przekształcania S
- oraz korzystania z wolnych elektronów pochodzących z rozpadu nuklidów



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Znaczenie biologiczne

Kluczowa rola w reakcjach biogeochemicznych:

Utlenianie i redukcja żelaza, manganu, siarki, wodoru, tlenków miedzi, azotu.
Udział w przekształcaniu tych pierwiastków i przeobrażeniach ich minerałów:

Minerały żelaza:

Hematyt	Fe_2O_3
Magnetyt	Fe_3O_4
Syderyt	FeCO_3
Piryt	FeS_2

Minerały manganu:

Piroluzyt	MnO_2
Braunit	$\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}_6\text{SiO}_{12}$
Rodonit	MnSiO_3

Minerały miedzi:

Chalkopirytyt	CuFeS_2
Bornit	Cu_5FeS_4
Kupryt	Cu_2O
Malachit	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$

Minerały siarki:

Siarka rodzima	S
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Anhydryt	CaSO_4
Piryt	FeS_2



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej

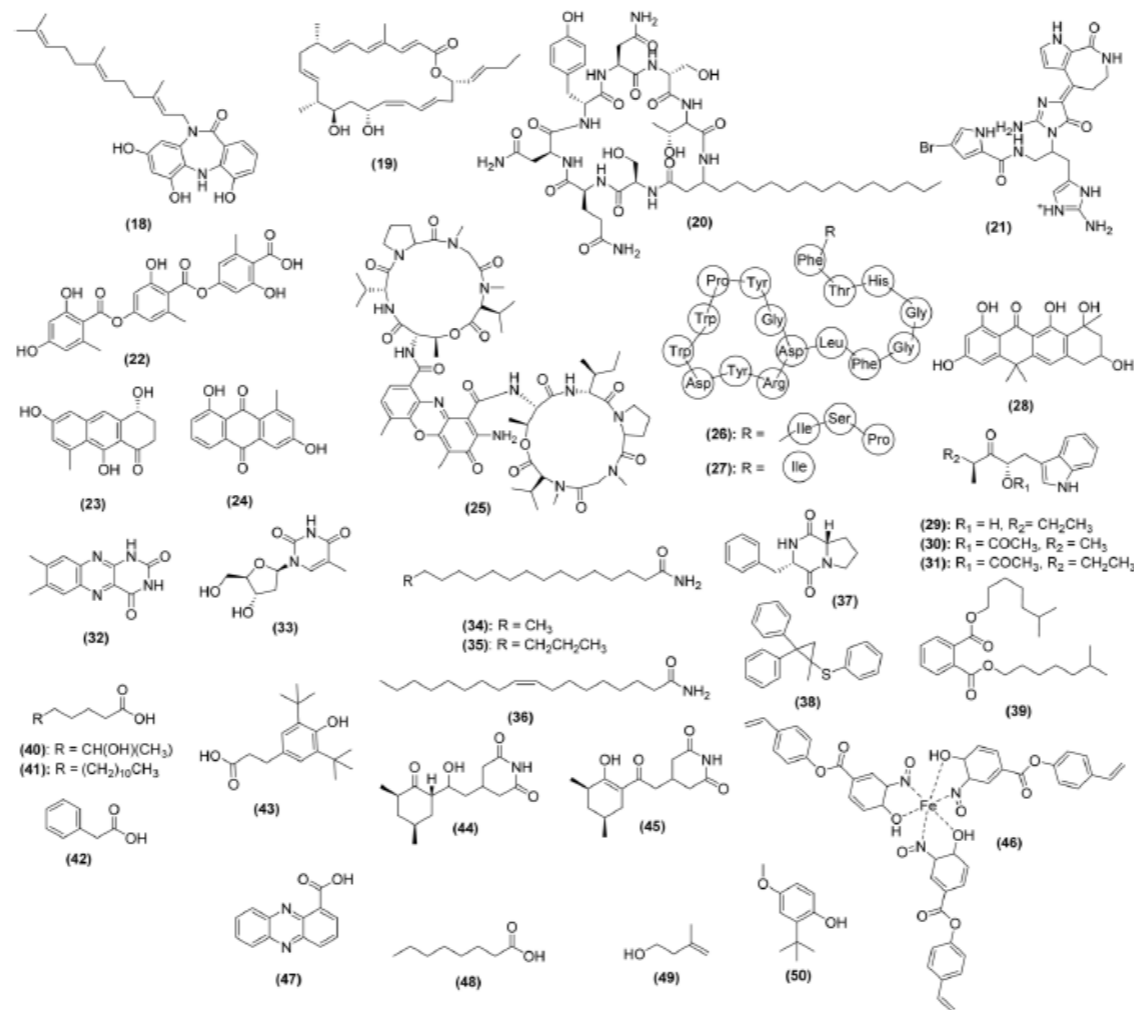


Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Znaczenie gospodarcze: struktura nowych związków pozyskanych przy pomocy mikroorganizmów z głębin w okresie 2014-2024 (Paris S. i inni 2025)



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Jakie ważne pytania należy postawić w aspekcie rozwoju i różnorodności mikroorganizmów?

1. Jaka jest rola tektoniki (np. ruch uskoków), magmatyzmu, zderzeń planetarnych i innych wielkoskalowych procesów geologicznych w uwalnianiu substratów ważnych dla rozwoju mikroorganizmów i jaką rolę odgrywają one w ewolucji życia?
2. Jakie interakcje biotyczno-abiotyczne tworzą lub niszczą przydatność siedlisk (np. powstawanie lub zamykanie szczelin)? Jak te interakcje wpływają na dystrybucję, rozprzestrzenianie i metabolizm życia podpowierzchniowego?
3. Jakie są wymagania energetyczne i strategie życiowe pozwalające na długoterminowe przetrwanie i utrzymanie życia podpowierzchniowego?
4. Czy w warstwie podpowierzchniowej nadal czekają na odkrycie „starożytne” grupy filogenetyczne?
5. Konieczne jest rozważenie konsekwencji zatłaczania w głąb ziemi CO_2 czy H_2 jak i pozyskiwanie H_2



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Wnioski

- Energia jest głównym czynnikiem limitującym rozwój mikroorganizmów w głębokiej biosferze
- Ze względu na niedobór węgla organicznego dominują organizmy chemolitotroficzne
- Wiele minerałów mogło powstać na drodze mikrobiologicznej
- Mikroorganizmy głębokiej biosfery mają ogromny, choć nadal nieznaną potencjał biotechnologiczny



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Dziękuję za uwagę.

Zapraszamy na stronę:

<https://bioroznorodnosc.ipan.lublin.pl/>



Fundusze Europejskie
dla Polski Wschodniej



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską

