

Patogeni mikroorganizmi permafrosta

Mastella, Kalista

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:111263>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-18**



Repository / Repozitorij:

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

PATOGENI MIKROORGANIZMI PERMAFROSTA

ZAVRŠNI RAD

Kalista Mastella

Zagreb, rujan, 2024.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET**

Preddiplomski studij:
Animalne znanosti

PATOGENI MIKROORGANIZMI PERMAFROSTA

ZAVRŠNI RAD

Kalista Mastella

Mentor: doc. dr. sc. Ivana Rajnović

Zagreb, rujan, 2024.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET**

**IZJAVA STUDENTA
O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

Ja, **Kalista Mastella**, JMBAG 0178130489, izjavljujem da sam samostalno izradila završni rad pod naslovom:

PATOGENI MIKROORGANIZMI PERMAFROSTA

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica ovoga završnog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj završni rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga završnog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznata s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana _____

Potpis studentice

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET**

**IZVJEŠĆE
O OCJENI I OBRANI ZAVRŠNOG RADA**

Završni rad studentice **Kalista Mastella**, JMBAG 0178130489 naslova

PATOGENI MIKROORGANIZMI PERMAFROSTA

mentor je ocijenio ocjenom _____.

Završni rad obranjen je dana _____ pred povjerenstvom koje je prezentaciju ocijenilo ocjenom _____ te je studentica postigla ukupnu ocjenu _____.

Povjerenstvo:

potpisi:

1. doc. dr. sc. Ivana Rajnović mentor

2. _____ član

3. _____ član

Zahvala

Ovim putem želim izraziti iskrenu zahvalnost svim profesorima i asistentima na pruženom znanju i na maksimalnoj susretljivosti. Svi skupa su pridonijeli ugodnoj atmosferi i studiranju bez stresa. Zahvaljujem se i svojoj mentorici, doc. dr. sc. Ivani Rajnović, na stručnom vodstvu i korisnim savjetima tijekom cijelog procesa pisanja ovog rada.

Zatim, posebnu zahvalnost dugujem svojem najvećem uzoru i inspiraciji, mojoj mami Tei, za njenu nesebičnu ljubav, razumijevanje i stalnu podršku.

Hvala i mojoj dragoj prijateljici Dragici, osobi kojoj sam se obraćala kada me nitko drugi nije razumio i kada je bilo vrijeme za velike odluke, osobi koja me naučila vrijedne životne lekcije kojima se sada vodim u životu. Nadam se da je sada na boljem i sretnijem mjestu, negdje gdje može pjevati i pričati o ljubavi, gdje može biti slobodna.

Zahvaljujem i svojoj braći i sestrama. Zatim, prijateljima i kolegama na faksu i izvan njega, koji su mi uljepšali i obogatili ove dane studiranja, a pojedinci pomogli kada pomoć nisam ni tražila. Volim vas puno.

Na kraju, želim zahvaliti sebi na upornosti, radu i vremenu koji sam uložila u ovaj rad i cjelokupno studiranje.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Cilj rada.....	1
2. Permafrost.....	2
2.1. Starost permafrosta.....	3
2.2. Debljina permafrosta.....	3
2.3. Temperatura permafrosta.....	4
3. Utjecaj globalnog zatopljenja na permafrost.....	5
3.1. Nestanak podmorskog permafrosta.....	6
4. Prijetnje uslijed otapanja permafrosta.....	8
4.1. Staklenički plinovi.....	8
4.2. Smanjenje debljine leda.....	9
4.3. Štete u gradovima.....	9
4.4. Nusproizvodi fosilnih proizvoda.....	9
4.5. Oslobođanje patogena.....	10
5. Mikroorganizmi permafrosta.....	11
5.1. Bakterije i arheje permafrosta.....	13
5.1.1. <i>Bacillus anthracis</i>	13
5.1.2. <i>Francisella tularensis</i>	14
5.1.3. <i>Yersinia pestis</i>	15
5.1.4. <i>Clostridium perfringens</i>	16
5.1.5. <i>Salmonella</i>	16
5.1.6. <i>Listeria monocytogenes</i>	17
5.1.7. <i>Escherichia coli</i>	17
5.1.8. <i>Brucella</i> spp.....	17
5.1.9. <i>Leptospira</i>	18
5.2. Otpornost bakterija na antibiotike.....	19
5.3. Virusi permafrosta.....	20
5.3.1. Bakteriofagi.....	20
5.3.2. H1N1.....	21
5.3.3. <i>Rabies lyssavirus</i>	22

5.3.4.	<i>Mammalian orthoreovirus (MRV)</i>	22
5.3.5.	Virus krpļnog encefalitisa (TREV).....	23
5.3.6.	<i>Variola virus</i>	24
5.4.	Ostali virusi.....	25
5.4.1.	<i>Pithovirus sibericum</i>	25
5.4.2.	<i>Mollivirus sibericum</i>	26
5.4.3.	<i>Pithovirus mammoth</i>	26
5.4.4.	<i>Pandoravirus mammoth</i>	26
5.4.5.	<i>Pandoravirus yedoma</i>	27
5.4.6.	<i>Megavirus mammoth</i>	27
5.4.7.	<i>Pacmanvirus lupus</i>	27
5.4.8.	<i>Cedravirus lena</i> i ostali.....	28
5.5.	Gljivični patogeni u permafrostu.....	28
5.6.	Mehanizmi prilagodbe mikroorganizama na ekstremne uvjete permafrosta.....	29
5.7.	Rast i metabolička aktivnost pri subnultim temperaturama.....	30
6.	Mogućnosti i rješenja.....	32
6.1.	Ublažavanje klimatskih promjena.....	32
6.2.	Unapređenje praćenja i nadzora mikroorganizama.....	32
6.3.	Istraživanje i razumijevanje patogena.....	32
6.4.	Preventivne mjere.....	33
6.5.	Razvoj cjepiva.....	33
6.6.	Koncept "Jedno zdravlje".....	34
7.	Zaključak.....	35
8.	Popis literature.....	36
	Životopis.....	43

Sažetak

Završnog rada studentice **Kalista Mastella**, naslova

PATOGENI MIKROORGANIZMI PERMAFROSTA

Permafrost predstavlja još uvijek nedovoljno istražen genetski resurs. Njegovo otapanje otkrilo je tek osnovni uvid u raznolikost mikroorganizama koji uključuje brojne bakterije, arheje i viruse. Nedavna istraživanja dokazuju da su među virusima permafrosta najzastupljeniji dsDNA bakteriofagi, no ono što predstavlja najveću brigu je prisutnost brojnih humanih i animalnih patogena. Porast temperature i produljenje ljetne sezone brzo topi ledene mase u tlu, što ubrzava procese naglog otapanja i produbljuje aktivni sloj permafrosta. Naglo otapanje u područjima viših nadmorskih visina rezultira odvajanjem aktivnog sloja ili velikim klizištima tla te stvara krateraste doline. Modeli procjena predviđaju da će gubitak ugljika uzrokovan naglim otapanjem biti ekvivalentan 40 % gubitka očekivanog od postupnog otapanja. Trenutno imamo ograničeno razumijevanje kako se mikrobi odazivaju na takve nagle promjene i promjene u količinama leda, ugljika i hranjivih tvari.

Ključne riječi: permafrost, mikroorganizmi, globalno zatopljenje, bolesti

Summary

Of the final work - student **Kalista Mastella**, entitled

PATHOGENIC MICROORGANISMS OF PERMAFROST

Permafrost represents a still insufficiently explored genetic resource. Its thawing has revealed only a basic insight into the diversity of microorganisms, including numerous bacteria, archaea, and viruses. Recent research proves that among the viruses in permafrost, dsDNA bacteriophages are the most prevalent, but the greatest concern lies in the presence of numerous human and animal pathogens. Rising temperatures and the extension of the summer season rapidly melt the ice masses in the soil, accelerating the processes of sudden thawing and deepening the active layer. Sudden thawing in higher altitude areas results in the separation of the active layer or large landslides, creating crater-like valleys. Estimation models predict that carbon loss caused by sudden thawing will be equivalent to 40 % of the loss expected from gradual thawing. Currently, we have a limited understanding of how microbes respond to such sudden changes and changes in the amounts of ice, carbon, and nutrients.

Keywords: permafrost, microorganisms, global warming, diseases

1. Uvod

Permafrost predstavlja značajan, ali još uvijek nedovoljno istražen genetski resurs koji sadrži raznolike mikroorganizme, uključujući brojne bakterije, arheje i viruse. Klimatske promjene i porast globalnih temperatura uzrokuju brzo otapanje permafrosta, što posljedično oslobađa drevne mikrobe koji su u njemu bili zarobljeni tisućama godina. Među tim mikroorganizmima, posebnu zabrinutost izazivaju patogeni koji mogu utjecati na zdravlje životinja i ljudi.

Patogeni mikroorganizmi iz permafrosta, poput virusa, bakterija i gljiva, predstavljaju prijetnju za arktičke ekosustave i šire. Na primjer, bakterije poput *Bacillus anthracis* mogu uzrokovati bolesti kod životinja, a potencijalno i kod ljudi, dok su neki virusi sposobni preživjeti u ekstremnim uvjetima permafrosta i ostati zarazni nakon odmrzavanja. Ova pojava predstavlja dodatni izazov u kontekstu globalnog zagrijavanja jer oslobađanje i širenje ovih patogena može imati ozbiljne posljedice za bioraznolikost, poljoprivredu i javno zdravstvo.

Kako bi se smanjio rizik od zoonotskih bolesti koje bi mogle prijeći sa životinja na ljude, važno je razviti strategije prevencije i kontrole. To uključuje povećanu suradnju između veterinarskih stručnjaka, javnozdravstvenih službenika i znanstvenika, kao i ulaganje u istraživanja i razvoj novih tehnologija za praćenje i neutralizaciju ovih patogena. S obzirom na rastuću prijetnju, kontinuirano istraživanje i praćenje patogenih mikroorganizama iz permafrosta ključno je za zaštitu zdravlja životinja i ljudi u uvjetima globalnog zagrijavanja.

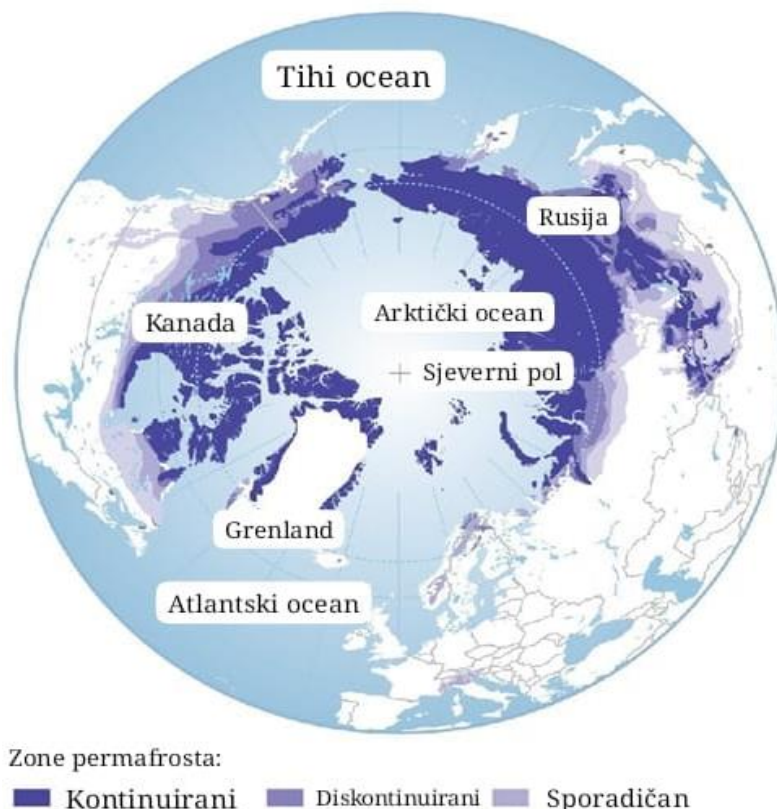
1.1. Cilj rada

Cilj ovog rada je pružiti pregled raznolikosti patogenih mikroorganizama u permafrostu i mehanizama prilagodbe tih mikroorganizama u ekstremnim uvjetima permafrosta. Nakon temeljitog pregleda dostupne literature dat će se uvid u njihov moguć utjecaj na životinje i čovjeka.

2. Permafrost

Permafrost se definira kao tlo ili podvodni sediment koji ostaje na ili ispod 0 °C najmanje dvije uzastopne godine. Tlo ispod ledenjaka i ledenih ploča obično se ne definira kao permafrost pa se na kopnu permafrost uglavnom nalazi ispod takozvanog aktivnog sloja tla koji se smrzava i otapa ovisno o godišnjem dobu. Ako se tlo smrzava i otapa svake godine, smatra se da je tlo "sezonski smrznuto".

Na sjevernoj hemisferi, regije u kojima se pojavljuje permafrost zauzimaju približno 25 % (23 milijuna km²) kopnene površine, gdje je tlo zamrznuto tijekom cijele godine. Rasprostranjen je u arktičkim regijama Sibira, Kanade, Grenlanda i Aljaske gdje se gotovo 85 % države nalazi na vrhu sloja permafrosta. Nalazi se i na Tibetanskoj visoravni, u predjelima s velikim nadmorskim visinama poput Stjenjaka i na dnu Arktičkog oceana kao podmorski permafrost. Na južnoj hemisferi, gdje ima mnogo manje tla podložnog smrzavanju, permafrost se nalazi u planinskim regijama kao što su južnoameričke Ande i novozelandske južne Alpe, kao i ispod Antarktika (Brown, 2000).



Slika 2.1. Rasprostranjenost permafrosta na sjevernoj polutci

Izvor: <http://scx2.b-cdn.net/gfx/news/2022/permafrost-zones-in-th.jpg>

Nizinska područja permafrosta tradicionalno su podijeljena u nekoliko zona na temelju procijenjenog geografskog kontinuiteta krajolika: kontinuirani permafrost (90-100 % krajolika), diskontinuirani permafrost (50-90 %) i sporadični permafrost (0-50 %).

Na primjer, dio Rusije poznat kao Sibir pripada kontinuiranom permafrostu, a područje blizu južne obale Hudsonovog zaljeva u Kanadi diskontinuiranom permafrostu.

2.1. Starost permafrosta

Dostupna istraživanja pokazala su da Zemlja sadrži permafrost različitih starosti. Većina permafrosta koji danas postoji nastao je tijekom ledenih doba i održao se kroz toplija razdoblja između ledenih doba, uključujući holocen (zadnjih 10 000 godina). Neki relativno plitki permafrost (30 do 70 metara) formiran je tijekom drugog razdoblja holocena (posljednjih 6 000 godina), a neki tijekom malog ledenog doba (prije 400 do 150 godina) (International Permafrost Association, 2023).

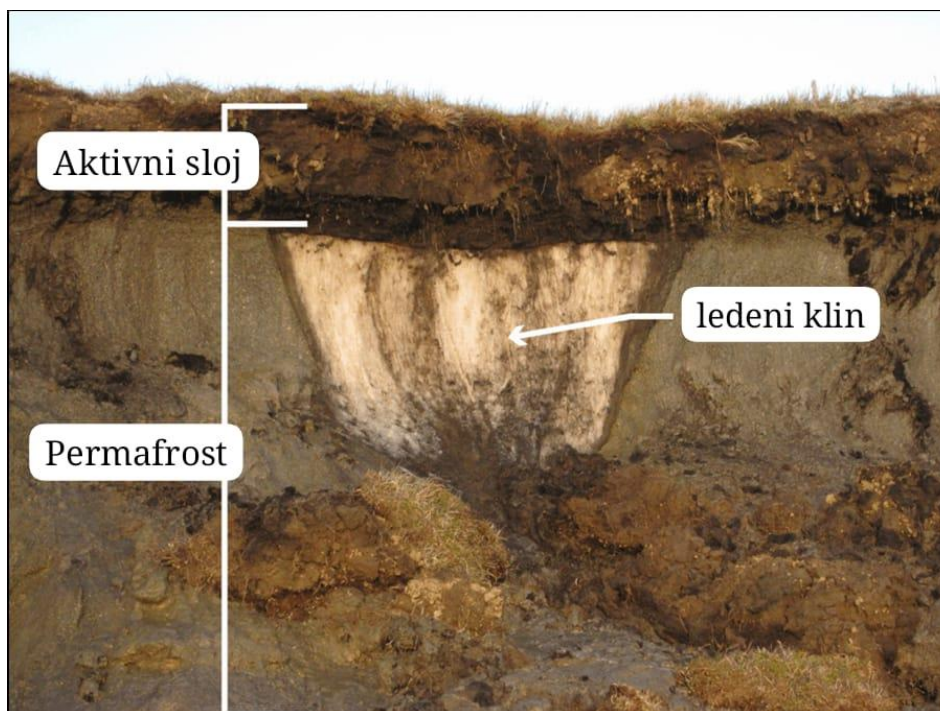
Najstariji permafrost, formiran prije $15,15 \pm 0,02$ milijuna godina, pronađen je u dolini Nibelungen na Antarktici, što je potvrđeno nedostatkom autigenih glinenih minerala u smrznutim naslagama vulkanskog pepela. U usporedbi s tim, permafrost pronađen na sjevernoj hemisferi je mlađi. Na primjer, u Sjevernoj Americi nije stariji od 800 000 godina. U kanadskom visokom Arktiku, permafrost je procijenjen na približno 10 000 godina, dok je permafrost iz CRREL tunela na Aljasci star između 19 000 i 33 000 godina. Na sjevernoj Aljasci, u Prudhoe Bayu, pronađen je permafrost star do 500 000 godina, dok je u središnjem teritoriju Yukona u Kanadi star oko 740 000 godina. Ovi podaci ukazuju na značajne razlike u starosti permafrosta između Antarktike i sjeverne hemisfere, što može pružiti dragocjene uvide u povijest klimatskih uvjeta i geoloških procesa na različitim dijelovima planeta (Mackelprang i sur., 2017).

2.2. Debljina permafrosta

Debljina permafrosta varira manje od jednog metra do više od 1500 metara.

Najdeblji permafrost nastao je tijekom pleistocena u Sibiru, a dubok je preko 1500 m. Permafrost na Aljasci i zapadnoj arktičkoj Kanadi debeo je do preko 700 m zbog agradacije (oblikovanje reljefa materijalom akumuliranim djelovanjem vode, vjetera i leda) permafrosta tijekom pleistocena u subarktičkim uvjetima.

Sloj tla na vrhu permafrosta ne ostaje smrznut tijekom cijele godine. Ovaj sloj, nazvan aktivni sloj, otapa se tijekom toplih ljetnih mjeseci i ponovno smrzava u jesen. U hladnijim krajevima tlo se rijetko topi. Tamo je aktivni sloj vrlo tanak, samo 10 do 15 centimetara. U toplijim područjima permafrosta, aktivni sloj može biti debeo nekoliko metara (Francuski, 2007).



Slika 2.2.1. Slojevi permafrosta

Izvor: <http://climatekids.nasa.gov/permafrost/permafrost2.png>

2.3. Temperatura permafrosta

Dugoročno praćenje temperature aktivnog sloja od 1980. do 2014. u nizinama Kolyma i Yana–Indigirka te na poluotoku Bykovsky u sjevernom Sibiru pokazalo je temperaturne fluktuacije od maksimalnih 15,2 °C ljeti do minimalnih -22,7 °C zimi, s prosječnim godišnjim varijacijama temperature od -4,3 do -9,7 °C na 20 cm ispod površine (Fedorov-Davydov i sur., 2018). Podaci iz Globalne terestrične mreže za permafrost pokazuju da su prosječne godišnje temperature permafrosta u Kolymi od 2007. do 2010. bile od -5,6 do -6,3 °C. Godišnje temperaturne varijacije u gornjem sloju permafrosta od 5 metara bile su od -1,2 do -4,5 °C, dok su u dubljim sedimentima bile manje, od -0,02 do -1,4 °C. Prosječna godišnja temperatura permafrosta u regiji ovisi o geografskoj širini i uvjetima krajolika. Na primjer, na visokim točkama vodenih razdjelnica Yedome varira od -12,3 °C na 72°50' N do -9,9 °C na 69°30' N, dok je u holocenskim depresijama temperatura viša, s -9 °C na 71°40' N i -7 °C na 68°50' N (Romanovsky i sur., 2010). Očuvanje ledenih klinova u srednjem i kasnom pleistocenskom permafrostu, prekrivenom mlađim holocenskim permafrostom, sugerira da temperatura kasnih pleistocenskih sedimenta nikada nije bila iznad nule.

3. Utjecaj globalnog zatopljenja na permafrost

Globalno zatopljenje donosi značajan porast prosječnih temperatura Zemljine atmosfere i oceana, uzrokovan uglavnom povećanim emisijama stakleničkih plinova poput ugljikovog dioksida (CO₂) i metana (CH₄), koje su nastale većinom djelovanjem čovjeka, odnosno sagorijevanjem fosilnih goriva, krčenjem šuma i industrijskom aktivnošću (IPCC, 2021). Posljedice globalnog zatopljenja uključuju topljenje ledenjaka, porast razine mora te češće i intenzivnije ekstremne vremenske uvjete (NASA, 2020). Dugoročni učinci globalnog zatopljenja također mogu uključivati promjene u ekosustavima i gubitak bioraznolikosti (Smith i sur., 2019).

Jedna od najkritičnijih posljedica globalnog zatopljenja vidljiva je u arktičkim regijama, gdje temperature rastu brže nego bilo gdje drugdje na planetu. Ovo ubrzano zagrijavanje ima izravne posljedice na permafrost koji je ključan za stabilnost arktičkog ekosustava jer sadrži ogromne količine organskog materijala koji je smrznut tisućama godina.

Prema Nacionalnom centru za podatke o snijegu i ledu (NSIDC), Arktik se zagrijava dvostruko brže od ostatka svijeta — brže nego u posljednjih 3 milijuna godina. Primarni razlozi za brže zagrijavanje Arktika uključuju smanjenje reflektivnosti (albedo efekt) zbog topljenja leda i snijega, kao i promjene u cirkulaciji atmosfere i oceana koje utječu na transport topline prema polarnim regijama. Kada površinske temperature zraka rastu, podzemne temperature također rastu, usput otapajući permafrost. Znanstvenici NSIDC-a procjenjuju da sada ima 10 posto manje smrznutog tla na sjevernoj hemisferi nego što je bilo u ranim 1900-ima. Istraživanja pokazuju da bi sa svakim dodatnim 1 °C, 3,9 milijuna km² permafrosta moglo nestati. Čak i ako se ispune klimatski ciljevi postavljeni tijekom pregovora o klimi u Parizu 2015., svijet bi još uvijek mogao izgubiti više od 6,5 milijuna km² smrznutog tla (IPCC, 2018).

Arktik se zagrijava brže od ostatka svijeta zbog nekoliko ključnih razloga:

1. Albedo efekt: Kada se snijeg i led tope, svjetlija površina prekrivena ledom i snijegom koja reflektira sunčevu svjetlost (visoki albedo) zamjenjuje se tamnijom površinom oceana ili kopna, koja apsorbira više sunčeve energije (niski albedo). To uzrokuje dodatno zagrijavanje i ubrzava topljenje (Serreze i Barry, 2011).

2. Toplinska inverzija: Arktički zrak je često stabilan i hladan, što može stvoriti toplinske inverzije gdje je topliji zrak zarobljen ispod hladnijeg zraka. Ovo može povećati lokalno zagrijavanje jer toplina ostaje zarobljena bliže površini (Serreze i sur., 2009).

3. Promjene u atmosferskoj cirkulaciji: Promjene u obrascima vjetera i atmosferske cirkulacije mogu donijeti topliji zrak u Arktik ili smanjiti izlazak hladnog zraka iz Arktika, što dodatno doprinosi zagrijavanju (Overland i sur., 2015).

4. Povećano isparavanje: Kako se oceani zagrijavaju, povećava se isparavanje, što dodaje više vodene pare u atmosferu. Vodena para je snažan staklenički plin koji dodatno zadržava toplinu, povećavajući zagrijavanje (Screen i Simmonds, 2010).

5. Morski led i oceanske struje: Gubitak morskog leda mijenja oceanske struje, što može dovesti topliju vodu u arktičke regije. Ove promjene također utječu na globalne obrasce cirkulacije oceana i atmosfere, dodatno pogoršavajući arktičko zagrijavanje (Polyakov i sur., 2010).

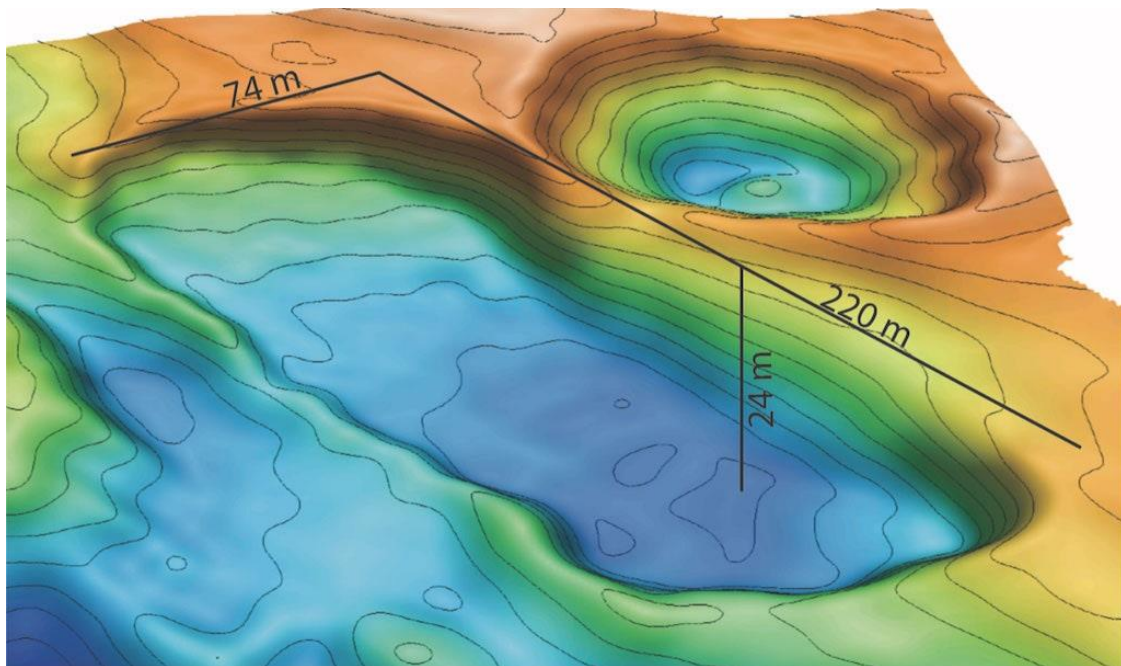
Ovi faktori zajedno doprinose fenomenu poznatom kao „Arktičko pojačanje“, gdje se stopa zagrijavanja Arktika odvija dvostruko brže nego globalni prosjek (IPCC, 2021).

3.1. Nestanak podmorskog permafrosta

Podmorski permafrost formirao se tijekom posljednjeg ledenog doba, kada su razine mora bile znatno niže, a obalne ravnice izložene hladnim arktičkim uvjetima. Kada su se ledenjaci povukli i razine mora porasle, te ravnice su se potopile, ali permafrost je ostao očuvan ispod morskog dna zbog niskih temperatura (Rachold i sur., 2007).

Podmorski permafrost nalazi se pretežno u arktičkim priobalnim regijama, uključujući obalu Sjevernog ledenog mora, Laptevsko more, Istočnosibirsko te Beaufortovo more (Romanovski i sur., 2004). Ova područja su posebno osjetljiva na promjene u klimatskim uvjetima i temperaturi oceana.

Također, uglavnom je neproučen zbog svoje nedostupnosti i visokih troškova istraživanja u arktičkim područjima, a prikupljanje uzoraka putem bušenja predstavlja dodatni izazov. Međutim, u nedavno objavljenom radu, međunarodni tim znanstvenika pruža rijedak uvid u procese koji se odvijaju u podvodnom permafrostu. Tim je koristio oceanske robote, slične torpedima, kako bi mapirao morsko dno sonarom duž obale sjeverne Kanade. Istraživanja su se provodila tijekom devet godina, ponavljajući postupak nekoliko puta kako bi se stekao uvid u promjene topologije morskog dna. Rezultati su pokazali da morsko dno prolazi kroz značajne promjene koje uključuju goleme potrese, što ukazuje na dinamiku i nestabilnost podmorskog permafrosta (Bünz i sur., 2023).



Slika 3.1.1. Topljenje i rušenje podmorskog permafrosta

Izvor:

http://media.wired.com/photos/6234b4a1a37e6beffa938e38/master/w_1600,c_limit/Map_2022_Large_Arctic_sinkhole_Eve_Lundsten-1024.jpg

Na slici 3.1.1. je prikazano kako se podmorski permafrost otopio i urušio, fenomen koji je na kopnu poznat kao “termokrš“. Permafrost je sastavljen od tla suspendiranog u matrici smrznute vode, a kada se otopi, zemlja se skuplja, stvarajući velike rupe u arktičkom krajoliku. Slično se događa i pod vodom.

Na kopnu se permafrost otapa zbog porasta temperatura. Međutim, nema dokaza da temperatura morskog dna raste dovoljno da bi uzrokovala otapanje permafrosta pa je vjerojatno da otapanje počinje odozdo, ispod morskog dna. Podmorski permafrost formira debeli sloj od nekoliko stotina metara, ispod kojeg teče relativno topla podzemna voda koja može degradirati permafrost. Ako se radi o čistom permafrost ledu, otapanje će stvoriti praznine koje će se kasnije urušiti, što dovodi do zaključka da praznine koje se razvijaju na morskom dnu nastaju zbog dugotrajnog zagrijavanja (Paull, 2022).

Dvije velike nepoznanice su količina podmorskog permafrosta i količina stakleničkih plinova koje sadrži. Znanstvenici ne mogu uzeti uzorke svakog kvadratnog metra arktičkog morskog dna pa umjesto toga analiziraju koliko je kopna bilo izloženo tijekom posljednjeg ledenog doba i uspoređuju te podatke s današnjim stanjem. To im pomaže procijeniti koliko se permafrosta možda formiralo i kasnije potopilo kada su se ledenjaci otopili i razina mora porasla. Procjene sugeriraju da postoji oko 2 milijuna km² podmorskog permafrosta, koji sadrži možda stotine gigatona organskog ugljika i desetke gigatona zarobljenog metana (Simon, 2022).

4. Prijetnje uslijed otapanja permafrosta

Do otapanja permafrosta dolazi zbog klimatskih promjena uzrokovanih antropogenim djelovanjem, što već vidimo po velikim promjenama u permafrostnim područjima. Temperature tla porasle su za 2 °C u posljednjem desetljeću, a aktivni sloj značajno se produbio. Globalno zagrijavanje neravnomjerno je zagrijalo permafrost visokih geografskih širina i visokih nadmorskih visina (npr. Tibetanska visoravan), a predviđa se da će ova područja nastaviti doživljavati veće poraste temperatura u usporedbi s drugim regijama svijeta. Kao rezultat, globalno gledano, očekuje se da će se između 22 % i 64 % permafrosta otopiti do 2100. godine (Schoor, 2022).



Slika 4.1. Blok odmrznutog permafrosta koji je pao u ocean na arktičkoj obali Aljaske

Izvor: <http://climatekids.nasa.gov/permafrost/permafrost3.png>

4.1. Staklenički plinovi

Permafrost sadrži milijarde tona stakleničkih plinova koji zagrijavaju planet za koje znanstvenici upozoravaju da će biti oslobođeni globalnim zagrijavanjem, zajedno s uzročnicima bolesti koji su zarobljeni u ledu. Procjenjuje se da je u vječnom ledu zaključano oko 1,7 trilijuna tona ugljika u obliku smrznute organske tvari — ostataka istrnutih biljaka i davno mrtvih životinja koje se nisu mogle razgraditi ili istrnuti zbog hladnoće te koje su ostale zarobljene u sedimentu i kasnije prekrivene ledenim pločama. Kada se permafrost

otopi, smrznuta se organska tvar zagrijava i razgrađuje do ugljikovih spojeva, na kraju oslobađajući ugljikov dioksid i metan, plinove koji imaju učinak stakleničkog zagrijavanja na planet. Permafrost sadrži otprilike dvostruko više ugljika nego Zemljina atmosfera.

4.2. Smanjenje debljine leda

Naglo zagrijavanje Arktika značajno utječe na morski ekosustav, posebno kroz promjene u debljini leda. Smanjenjem debljine leda, više svjetla prodire do dna morskog leda, što može imati široke posljedice na ekosustav. Ispod površine leda, godišnje raste travnjak algi, koji poput fitoplanktona u otvorenim vodama podržava složenu prehrambenu mrežu. Zooplankton se hrani tim algama, a zatim služi kao hrana za ribe, tuljane i polarne medvjede, ključne vrste u arktičkom hranidbenom lancu. Alge, kao primarni proizvođači u ekosustavu, igraju ključnu ulogu u procesima fotosinteze. Procjena dostupnosti svjetla za ove alge, iako izazovna zbog nedostatka direktnog promatranja iz svemira, može pružiti uvid u njihov potencijalni rast i aktivnost u budućnosti pod utjecajem promjena u okolišu. Podaci od 2011. do 2022. pokazali su da će južnije arktičke regije doživjeti ranije cvjetanje algi (Stroeve i sur., 2024).

4.3. Štete u gradovima

Oko 35 milijuna ljudi živi u zoni permafrosta, u mjestima i gradovima izgrađenim na vrhu onoga što se nekada smatralo trajno smrznutim tлом. Ali kako to čvrsto tlo omekšava, infrastruktura na koju se ove zajednice oslanjaju postaje sve nestabilnija. U Kanadi se procjenjuje da nestajanje permafrosta uzrokuje desetke milijuna dolara štete na javnoj infrastrukturi diljem sjeverozapadnih teritorija svake godine. Na Aljasci, procjenjuje se da će troškovi popravka javne infrastrukture kao što su ceste, željezničke linije, zgrade i zračne luke oštećene otapanjem permafrosta i drugim čimbenicima povezanim s klimom iznositi čak 5,5 milijardi dolara do kraja ovog stoljeća (Arctic Institute, 2021).

4.4. Nusproizvodi fosilnih goriva

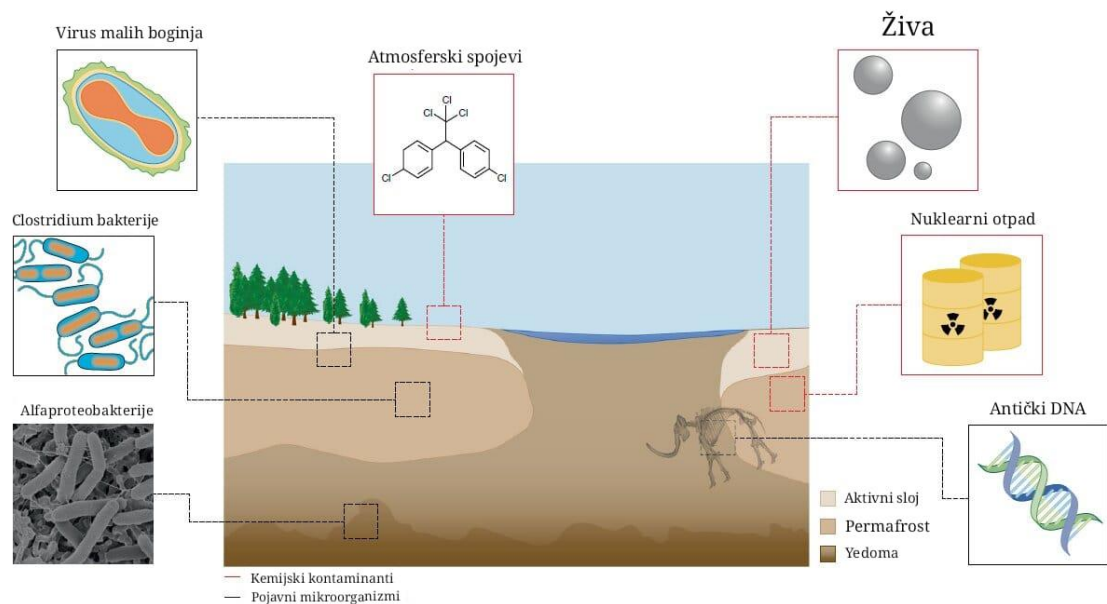
Još jedan rizik odnosi se na nusproizvode fosilnih goriva, koji su uneseni u okolinu permafrosta od početka industrijske revolucije. Arktik također sadrži prirodne naslage metala, uključujući arsen, živu i nikal, koji su vađeni desetljećima i koji su uzrokovali ogromnu kontaminaciju otpadnim materijalom na desecima milijuna hektara. Također, sada zabranjeni zagađivači i kemikalije, kao što je insekticid dikloro-difenil-trikloroetan, DDT, koji su atmosferski transportirani na Arktik i s vremenom ostali zarobljeni u permafrostu, u opasnosti

su od ponovnog prodiranja u atmosferu. Osim toga, povećan protok vode znači da se zagađivači mogu široko rasprostraniti, oštećujući životinjske vrste, kao i ući u ljudski prehrambeni lanac (Alfred Wegener Institute, 2023).

4.5. Oslobađanje patogena

Jedan od najvećih problema predstavlja oslobađanje patogenih mikroorganizama poput virusa i bakterija. Više od 1 000 naselja, stvoreno je na permafrostu tijekom posljednjih 70 godina. Bilo da se radi o naseljima stvorenih s ciljem vađenja resursa, vojnih i znanstvenih projekata ili o naseljima s lokalnim stanovništvom, sve skupa povećava vjerojatnost slučajnog kontakta s patogenima i njihovog oslobađanja iz tla. Upravo će o tom značajnom problemu biti više riječi u nastavku ovog završnog rada.

Također je utvrđeno da je više od 100 različitih mikroorganizama u dubokom permafrostu Sibira otporno na antibiotike. Kako se permafrost otapa, postoji mogućnost da se te bakterije pomiješaju s otopljenom vodom i stvore nove sojeve otporne na antibiotike (Claverie, 2024).

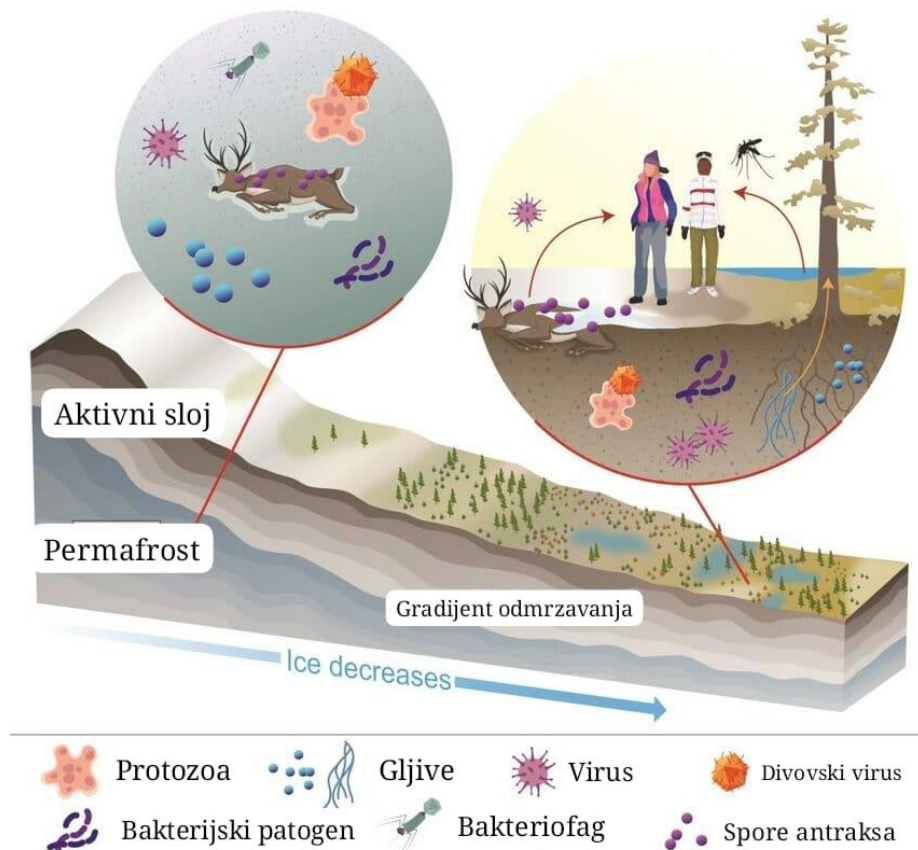


Slika 4.5.1. Kemijski kontaminanti i pojavni mikroorganizmi permafrosta

Izvor: http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/10/Arctic_permafrost_hazard_storage

5. Mikroorganizmi permafrosta

Permafrost je kopneni ekosustav vrlo bogat specifičnim mikroorganizmima. Kada su zamrznuti, mnogi mikroorganizmi u permafrostu, za razliku od makroorganizama, poput mamuta, uspjeli su se prilagoditi i preživjeti na temperaturama ispod nule. Ovi psihrotolerantni mikroorganizmi također moraju izdržati druge stresne uvjete, uključujući visoki salinitet, nisku dostupnost vode i hranjivih tvari, kao i anoksiju i nisku pH vrijednost u zamrznutim močvarama i barama. Mikroorganizmi permafrosta uključuju bakterije, arheje, gljive, alge, protiste i viruse. Iz permafrosta su izolirani i protozoa. Vrste mikroba i njihova sposobnost preživljavanja ovise o raznim čimbenicima, uključujući starost permafrosta i kemijski sastav. Pitanje je jesu li neki od tih mikroba potencijalno patogeni za ljude, druge životinje i biljke (Tablica 5.1.), što je trenutna briga i tema značajnih rasprava.



Slika 5.1. Mikroorganizmi u permafrostu

Izvor: <http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2590332222001439-gr1.jpg>

Tablica 5.1. Primjeri potencijalnih patogena u permafrostu i pridruženim ledištima

Mikroorganizam	Uzročnik bolesti	Bolest	Tip patogena	Lokacija pronalaska uzorka
Bakterija	<i>Bacillus anthracis</i>	antraks	patogen za ljude i životinje	sibirski permafrost
DNA virus	<i>Variola virus</i>	male boginje	patogen za ljude i životinje	sjeveoistočni Sibir
DNA virus	aCFV (antički virus iz sobovog fecesa)	asimptomatska infekcija	za biljke gljivični	subarktički led (sobov feces star 700 godina)
Gljiva	rodovi <i>Ascochyta</i> , <i>Entyloma</i> , <i>Epicoccum</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Gaeumannomyces</i> , <i>Microdochium</i> , <i>Phaeosphaeria</i> , and <i>Phoma</i>	lisna pjegavost, defolijacija, smanjenje prinosa i vrijednosti usjeva	patogen za biljke	sibirski permafrost star 16 000-32 000 godina
Gljiva	rodovi <i>Cordyceps</i> i <i>Paecilomyces</i>	paraliza, smrt	patogen za insekte	sibirski permafrost star 16 000 - 32 000 godina
RNA virus	Cripavirus	paraliza, smrt	patogen za insekte	subarktički led (sobov feces star 700 godina)
RNA virus	H1N1 virus	influenca/ gripa	patogen za ljude i životinje	smrznuto plućno tkivo žrtava influence iz 1918.
RNA virus	ToMV (virus mozaika rajčice)	bolest mozaika rajčice	patogen za biljke	140 000 godina stare jezgre leda iz Grenlanda

Izvor: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332222001439#bib57>

5.1. Bakterije i arheje permafrosta

Pokazalo se da tla permafrosta sadrže širok raspon bakterija iz tla, pretežno iz supergrupe *Terrabacteria*, uključujući *Actinobacteria*, *Firmicutes*, *Cyanobacteria*, *Chloroflexi*, *Bacteroidetes* i *Proteobacteria*. Također su otkriveni predstavnici manje poznatih koljena u metagenomima permafrosta, uključujući metagenomski složene genome koji odgovaraju kandidatskim koljenima *Eremiobacteraeota* i *Dormibacteraeota* u netaknutom i otapajućem permafrostu. Slično bakterijama, mnoge različite vrste arheja pronađene su u permafrostu, uključujući predstavnike *Euryarchaeota*, *Crenarchaeota* i *Thaumarchaeota*. Do sada najčešće promatrane arheje u otapajućem permafrostu jesu metanogeni *Euryarchaeota*, koji mogu koristiti produkte fermentacije za proizvodnju CH₄ (Wu i sur, 2022).

5.1.1. *Bacillus anthracis*

Bakterijski patogeni mogu se očuvati u stanju mirovanja u permafrostu i aktivirati kada se permafrost otopi i uvjeti postanu povoljni za rast. Jedan od najpoznatijih primjera je *Bacillus anthracis*, uzročnik bolesti antraksa, koji je globalno rasprostranjen i predstavlja potencijalni rizik za ljude, stoku i divlje životinje. Antraks je primarno bolest biljojeda, a ljudi su slučajni domaćini, poput radnika koji obrađuju zaražene životinjske proizvode ili konzumiraju nepropisno kuhanu zaraženu hranu.

Ljudi su oboljeli od antraksa nakon što su došli u kontakt sa zaraženim govedima (86 % slučajeva), konjima (7 %) i ovcama (3 %). Izbijanja bolesti među govedima i sobovima dovela su do toga da danas postoji više od 13 000 grobnih mjesta sa zakopanim zaraženim životinjama u Rusiji. Više od polovice ovih grobnih mjesta smješteno je na permafrostu u Sibiru zbog čestih epizootskih ciklusa koji su prouzročili smrt 1,5 milijuna jelena na ruskome sjeveru između 1897. i 1925. godine te ponovno u 1920. i 1931. godini u regiji Taymyr, a zatim 1969. godine u Jakutiji, Evenkiji i Taymyru. Mnoga od tih grobnih mjesta ne zadovoljavaju federalne sanitarne standarde (Hugh-Jones i Blackburn, 2009).

Između 1985. i 2008. godine, zabilježeno je 72 slučaja antraksa među ljudima koji žive u Sibiru, a godine 2016. prijavljeno je izbijanje antraksa u Sibiru zbog izlaganja zaraženim leševima životinja koji su prethodno bili smrznuti u permafrostu. Kao rezultat topljenja permafrosta, spore antraksa su se oslobodile iz zaraženih leševa i jedna osoba te više od 2 000 sobova smrtno su nastradali nakon ingestije spora, dok je 70 osoba bilo hospitalizirano (Hugh-Jones i Blackburn, 2009).

Zagrijavanje ruske Arktike zbog klimatskih promjena povećat će stopu otapanja permafrosta. Najveći porast temperatura permafrosta očekuje se u Jakutiji, istočnom dijelu autonomnog okruga Nenetski i Komi Republici. Računalne simulacije predviđaju da će se temperature permafrosta u Jakutiji povećati za 2,38 °C do 2050. godine. Takvi ekološki događaji rezultirat će poplavama i poremećajima tla nad tim grobnim mjestima, što će osloboditi spore

antraksa na površinsko tlo i na vegetaciju koju će potom konzumirati pašuće životinje, povećavajući tako rizik od infekcije kod ljudi koji dođu u kontakt sa zaraženim životinjskim proizvodima (nepropisno kuhanim mesom, kožom, kostima) (Hugh-Jones i Blackburn, 2009).

Među svim teritorijama ruske Arktike, najveći broj naselja s rizikom od antraksa je u Jakutiji, Arkangelskoj regiji, Kareliji, Komi i Taymyru. Jedan dodatni razlog za izbijanje antraksa je porast broja sobova bez imuniteta, što bi moglo doprinijeti širenju i zaraznoj sposobnosti patogena, stoga bi potencijalna strategija za ublažavanje budućih izbijanja bila cijepjenje sobova. Dakle, za ove regije potrebno je povećano praćenje permafrosta oko poznatih grobnih mjesta, kao i povećana vakcinacija domaćih životinja i pojačani nadzor bolesti u populacijama životinja i ljudi.

Nadalje, nevladine organizacije za razvoj, zajedno s humanitarnim organizacijama poput Svjetskog programa za hranu, upozoravaju na moguće nestašice hrane. Antraks bi mogao predstavljati izravnu prijetnju poljoprivrednim životinjama ako se proširi preko ptica na farme. Potencijalne posljedice uključuju masovne gubitke stoke i, posljedično, pad u proizvodnji životinjskih proizvoda. Ovisno o zaraženom području i njegovom značaju za međunarodnu opskrbu hranom, nestašice hrane mogle bi se dogoditi i izvan Rusije.

5.1.2. *Francisella tularensis*

Francisella tularensis u permafrostu predstavlja značajnu prijetnju za životinje diljem svijeta. Tularemija je visoko infektivna bolest koja je također i zoonoza te može zahvatiti širok spektar životinja, uključujući zečeve, glodavce, ptice i stoku. Infekcija se može prenijeti putem ugriza inficiranih krpelja, direktnim kontaktom s inficiranim životinjama ili inhalacijom kontaminiranih čestica (Revich i Podolnaya, 2011).

Ova bakterija može preživjeti u ekstremnim uvjetima permafrosta, što je potvrđeno otkrićem u Sibiru. Pronađen je u više od 20 sisavaca koji nastanjuju ruski Arktik, uključujući zečeve, dabrove, vodene voluharice, vjeverice, poljske miševe i druge. Prirodni rezervoari *F. tularensis* opisani su na Kolskom poluotoku te u republikama Jamal, Tajmir i Jakutija, uglavnom u dolinama rijeka Lena, Vilui i Aldan (Revich i sur., 2012).

F. tularensis je najčešće prisutna u vodenim voluharicama (*Arvicola terrestris*), a epizootije među njima često prethode epidemijama kod ljudi. Prvi slučajevi tularemije u Jakutiji datiraju iz 1944., u Komi Republici od 1949. te u Murmanskoj regiji od 1950-ih godina. Izboji tularemije zabilježeni su i u Norilsku i Vorkuti 1964. godine (Revich i sur., 2012).

Tularemija je zabilježena i među sobovima, gdje su pronađena protutijela na *F. tularensis*, kao i među divljim životinjama poput zečeva (Revich i sur., 2012). U istraživanju provedenom među domorodačkim stanovnicima Čukotke, 11,5 % ispitanika imalo je protutijela na *F. tularensis*, što ukazuje na prethodnu infekciju. Slični rezultati zabilježeni su i u Aljasci (Revich i sur., 2012).

Zagrijavanje Arktika i ubrzano otapanje permafrosta povećavaju rizik od oslobađanja patogena poput *F. tularensis*. To može dovesti do novih izbijanja tularemije s potencijalno devastirajućim posljedicama na životinjske populacije širom svijeta. Divlje životinje koje dođu u kontakt s kontaminiranim tlom ili vodom mogle bi postati rezervoari infekcije, prenoseći bolest na domaće životinje i ljude (Parkinson i sur., 2014).

Izbijanja tularemije među divljim i domaćim životinjama mogla bi imati ozbiljne ekonomske i ekološke posljedice, ugrožavajući poljoprivrednu proizvodnju i biodiverzitet. Stoga je važno provoditi kontinuirano praćenje permafrosta i poduzimati mjere za sprječavanje širenja ove opasne bakterije. Poboljšane strategije praćenja i kontrole, uključujući vakcinaciju životinja i edukaciju javnosti, ključne su za smanjenje rizika od budućih izbijanja tularemije (Revich i Podolnaya, 2011).

5.1.3. *Yersinia pestis*

Yersinia pestis je bakterija koja uzrokuje bubonsku kugu i predstavlja potencijalnu prijetnju ako se oslobodi iz permafrosta. Povijesni zapisi pokazuju da su se izbijanja kuge javljala tijekom srednjeg vijeka, ali s porastom globalnih temperatura i otapanjem permafrosta, postoji zabrinutost da bi se drevni sojevi *Y. pestis* mogli ponovno pojaviti. Ova bakterija može preživjeti u smrznutom tlu tisućama godina, što je potvrđeno otkrićima u Sibiru (Schmid i sur., 2015).

U 2011. godini, istraživači su otkrili tragove *Y. pestis* u drevnim grobovima u blizini jezera Baikal u Sibiru. Ovi ostaci, datirani na preko 1800 godina starosti, pokazali su prisustvo genetskog materijala *Y. pestis*, što sugerira da je bakterija mogla preživjeti u smrznutim uvjetima tijekom dugih vremenskih perioda (Rasmussen i sur., 2015).

Globalno zagrijavanje može izazvati otapanje permafrosta i oslobađanje bakterije *Y. pestis*, što bi moglo dovesti do novih izbijanja kuge među životinjskim populacijama. Kuga se može prenijeti s divljih glodavaca na domaće životinje i ljude putem ugriza zaraženih buha. Ovo predstavlja ozbiljnu prijetnju za divlje i domaće životinje, kao i za ljude koji dolaze u kontakt s njima (Stenseth i sur., 2008).

U slučaju novih izbijanja kuge, posljedice bi mogle biti katastrofalne za poljoprivredne i stočarske zajednice. Kontinuirano praćenje permafrosta, rano otkrivanje izbijanja i brza reakcija ključni su za sprečavanje širenja ove smrtonosne bolesti. Uz to, potrebne su preventivne mjere, poput kontrole populacije glodavaca i buha te edukacija javnosti o rizicima povezanim s klimatskim promjenama i potencijalnim zarazama iz permafrosta (Stenseth i sur., 2008).

5.1.4. *Clostridium perfringens*

Clostridium perfringens je anaerobna, sporogena bakterija koja uzrokuje bolesti kod ljudi i životinja. Ova bakterija, poznata po svojim otpornim sporama, može preživjeti ekstremne uvjete, uključujući i zamrzavanje u permafrostu.

C. perfringens je otkriven u sibirskom permafrostu, gdje su drevni slojevi tla sadržavali bakterijske spore stare tisućama godina. Ovi slojevi, koji se polako otapaju zbog klimatskih promjena, mogu osloboditi bakterije u okoliš, potencijalno izazivajući nove epidemije bolesti među životinjama (Vishnivetskaya i sur., 2000).

Ova patogena bakterija uzrokuje različite bolesti kod domaćih i divljih životinja, uključujući enterotoksemiju kod ovaca, goveda i drugih preživača. Enterotoksemija može biti fatalna, uzrokujući brzu smrt životinja zbog produkcije toksina koji oštećuju crijeva i druge organe (Uzal i sur., 2016).

Izbijanja bolesti uzrokovanih *C. perfringens* mogu imati ozbiljne posljedice za stočarstvo. Smrt domaćih životinja može dovesti do značajnih ekonomskih gubitaka za poljoprivrednike. Uz to, kontaminacija hrane životinjskog porijekla, poput mesa i mliječnih proizvoda, može ugroziti sigurnost hrane i zdravlje ljudi (McClane, 2007).

Klimatske promjene koje uzrokuju otapanje permafrosta mogu povećati učestalost izbijanja bolesti jer oslobađaju drevne spore *C. perfringens*. Ovo predstavlja rizik ne samo za zdravlje životinja, već i za globalnu sigurnost hrane. Potrebno je provoditi kontinuirano praćenje permafrosta i rano otkrivanje bakterija kako bi se spriječilo širenje bolesti. Preventivne mjere uključuju poboljšanje sanitarnih uvjeta, kontrolu kontaminacije hrane i cijepljenje životinja (Uzal i sur., 2016).

5.1.5. *Salmonella*

Salmonella je rod bakterija koji uzrokuju bolesti kod ljudi i životinja. *Salmonella* može preživjeti u ekstremnim uvjetima, uključujući i zamrzavanje u permafrostu.

Izolirana je iz permafrosta na različitim lokacijama u Sibiru. Istraživanja su pokazala prisutnost ovih bakterija u uzorcima permafrosta koji su stari tisućama godina (Vishnivetskaya i sur., 2000). Ove bakterije mogle su preživjeti zahvaljujući sposobnosti stvaranja spora, koje su izuzetno otporne na nepovoljne uvjete.

Infekcija *Salmonellom* kod domaćih životinja poput goveda, svinja i peradi može uzrokovati teške gastroenteritise, smanjenje proizvodnje i povećanu smrtnost. Životinje koje su zaražene mogu širiti bakteriju putem izmeta, kontaminirajući okoliš i hranu.

Kod ljudi, *Salmonella* može uzrokovati salmonelozu, bolest koja se manifestira kao gastroenteritis sa simptomima poput proljeva, groznice i bolova u trbuhu. Infekcija može biti

ozbiljna, osobito kod djece, starijih osoba i imunokompromitiranih pojedinaca. Ljudi se mogu zaraziti konzumiranjem kontaminirane hrane ili vode, kao i kontaktom sa zaraženim životinjama ili njihovim proizvodima (Gal-Mor i sur., 2014).

Klimatske promjene i otapanje permafrosta povećavaju rizik od oslobađanja drevnih patogena u okoliš, uključujući *Salmonellu*. Poljoprivreda i stočarstvo mogu biti posebno pogođeni jer kontaminirana voda i stočna hrana mogu dovesti do širenja infekcije među životinjama, a posljedično i do ljudi kroz lanac ishrane.

5.1.6. *Listeria monocytogenes*

Listeria monocytogenes je bakterija koja uzrokuje listeriozu, ozbiljnu infekciju koja pogađa različite vrste životinja, uključujući domaće životinje. Listerioza može dovesti do pobačaja, encefalitisa i septikemije kod životinja, što predstavlja značajan problem za stočarstvo. Ova bakterija je pronađena u permafrostu na Aljasci i u Sibiru. Kako se permafrost topi zbog globalnog zagrijavanja, postoji rizik da će *L. monocytogenes* kontaminirati vodene izvore i hranu što može rezultirati širenjem infekcije među životinjama i ljudima koji konzumiraju kontaminirane proizvode. Zaključno, ova bakterija predstavlja ozbiljan rizik za javno zdravlje i sigurnost hrane (Rogers i sur., 2010).

5.1.7. *Escherichia coli*

Escherichia coli je bakterija koja je prirodni stanovnik crijevne flore mnogih životinja, ali određeni sojevi, poput *E. coli* O157:H7, mogu uzrokovati ozbiljne bolesti kod ljudi i životinja. Infekcije *E. coli* mogu dovesti do teških gastrointestinalnih bolesti, a u teškim slučajevima do hemolitičko-uremičkog sindroma, koji može biti smrtonosan. *E. coli* je izolirana iz permafrosta u Kanadi i Rusiji. Topljenje permafrosta može uzrokovati širenje ovih patogenih sojeva u okoliš, što povećava rizik od kontaminacije vode i hrane što dalje predstavlja značajnu prijetnju za zdravlje životinja i ljudi, osobito u regijama gdje su higijenski uvjeti lošiji (Smith i sur., 2004).

5.1.8. *Brucella* spp.

Brucella spp. uzrokuje brucelozu, bolest koja može zaraziti mnoge vrste životinja, uključujući goveda, ovce, koze i pse. Bruceloza kod životinja može uzrokovati pobačaje i smanjenje proizvodnje mlijeka, što može imati ozbiljne ekonomske posljedice za poljoprivredu. Ljudi se mogu zaraziti kontaktom sa zaraženim životinjama ili konzumacijom kontaminirane hrane. *Brucella* spp. su identificirane u permafrostu u različitim dijelovima Sibira. Postoji sve veća opasnost da će ove bakterije dospjeti u okoliš i zaraziti domaće i divlje životinje. Infekcija

navedenom patogenom bakterijom može uzrokovati ozbiljne zdravstvene probleme kod ljudi i životinja, što naglašava potrebu za stalnim nadzorom i preventivnim mjerama (Cutler i sur., 2005).

Deseci tisuća lokalnih domorodaca sudjeluje u uzgoju sobova, važnom sektoru arktičke ekonomije. Bruceloza kod uzgojenih sobova predstavlja ozbiljan zdravstveni rizik za radnike u ovoj industriji i za potrošače sobovog mesa. Divlji sobovi žive u malim populacijama od Murmanska do Čukotke, a bruceloza je zabilježena u mnogim područjima, uključujući Jamlj pa sve do Čukotke. Stopa infekcije među sobovima varira: od 0,9 % do 60 % u Tajmiru, 1,2 % do 12,4 % u Evenkijskom autonomnom okrugu, 1,0 % do 35,7 % u Čukotki te do 60 % u Jakutiji. U 11 od 14 administrativnih okruga Magadanske regije, utvrđen je visok rizik od bruceloze među sobovima. Za usporedbu, u Aljasci su infekciju *Brucellom* imali 7 % do 25 % karibua, 46 % vukova i 46 % tuljana (Revich i sur., 2012).

Sezonska migracija divljih sobova i intenzivan uzgoj stvaraju povećani rizik od infekcije za ljude. Poboljšana kontrola bruceloze u Tajmirskom općinskom okrugu znatno je smanjila stopu infekcije među sobovima. Bakterija *Brucella* je izrazito otporna na okolišne uvjete. U Jakutiji i na Dalekom istoku, 10,5 % do 23,0 % domorodaca koji rade u pogonima za preradu sobova bili su zaraženi *Brucellom* u prošlosti. Slična epidemiološka situacija zabilježena je u arktičkim područjima SAD-a i Kanade. Od 1970-ih, stopa bruceloze u Čukotki značajno je pala, s povremenim slučajevima registriranim od 1997. godine. U 2004. godini zabilježena su samo 2 slučaja bruceloze u Tajmiru, a 2002. godine 4 slučaja u Jakutiji. Također, u Jakutiji je postotak zaraženih među uzgajivačima sobova (4,8 % do 5,6 %) značajno veći nego među obrađivačima kože (1,2 % do 4,7 %) (Revich i sur., 2012).

Novi problem je otkriće ovog patogena u morskim sisavcima, što podiže mogućnost zaraze ljudi putem kontakta ili konzumacije mesa morskih sisavaca. U ruskom Arktiku stope registriranih slučajeva bruceloze zapravo mogu biti veće zbog nedostatne dijagnostike i odsutnosti laboratorijskih usluga u udaljenim regijama.

5.1.9. *Leptospira*

Leptospiroza je zoonoza čiji prirodni domaćini uključuju svinje, goveda, domaće pse te male sisavce poput štakora i miševa. U arktičkim i subarktičkim regijama poput Sibira i Aljaske, bakterije roda *Leptospira* su otkrivene i u permafrostu (Forsythe i sur., 2018). Najveći broj slučajeva među ljudima evidentiran je u Arkangelskoj regiji, gdje je stopa oboljenja dosezala 1,78 na 100 000 stanovnika 2008. godine, s varijacijama u drugim godinama.

Leptospiroza je prvi put zabilježena u Arkangelskoj regiji 1962.-1963. godine, kada su leptospire (serovar tj. serološka varijanta *Hebdomadis*) pronađene u serumu sobova i goveda. Serovar *Hebdomadis* je specifičan tip leptospire, odnosno podtip bakterije roda *Leptospira*. Svaki serovar se razlikuje po antigenim svojstvima, što omogućuje razlikovanje različitih sojeva leptospira.

Serovar *Hebdomadis* je identificiran kao uzročnik leptospiroze među sobovima i govedima u Arkangelskoj regiji u Rusiji i ova bakterija može izazvati infekciju kod domaćih životinja i u rijetkim slučajevima kod ljudi koji dolaze u kontakt s kontaminiranim tlima ili vodom gdje se leptospire nalaze.

U 1970-ima, prirodni rezervoar leptospire opisan je u poplavnim ravnicama ove regije, gdje su visoke stope infekcije zabilježene među poljskim miševima i vodenim voluharicama. Otapanje permafrosta može osloboditi leptospire natrag u okoliš, što predstavlja rizik za lokalno stanovništvo izloženo poplavnim područjima blizu naselja.

Daljnja istraživanja i praćenje su ključni za razumijevanje utjecaja klimatskih promjena na širenje leptospiroze u cirkumpolarnim regijama, gdje su uzgajivači sobova i lovci posebno izloženi riziku od infekcije (Forsythe i sur., 2018).

5.2. Otpornost bakterija na antibiotike

Postoji nekoliko izvještaja o prisutnosti gena za otpornost na antibiotike u permafrostnim bakterijama, što bi moglo učiniti poznate patogene problematičnijima. Otpornost na antibiotike predstavlja prijetnju ljudskom zdravlju smanjujući učinkovitost liječenja antibioticima.

Prema istraživanjima, otpornost na antibiotike je prisutna već tisućama godina. Konkretnije, istraživači su analizirali permafrost star 30 000 godina na Aljasci metagenomskim analizama koje proučavaju genetski materijal iz okolišnih uzoraka. Analize su otkrile prisutnost gena koji pružaju otpornost na različite antibiotike kao što su beta-laktami, tetraciklini i glikopeptidi.

Ovo otkriće je značajno jer pokazuje da su bakterije razvile mehanizme otpornosti na antibiotike davno prije nego što su ljudi otkrili i počeli koristiti antibiotike u medicinske svrhe. To znači da su geni za otpornost na antibiotike prirodno prisutni u okolišu i da su bakterije evoluirale te mehanizme kao odgovor na prirodne antibiotike koje proizvode drugi mikroorganizmi.

Dakle, permafrost može poslužiti kao rezervoar gena za otpornost na antibiotike. Prisustvo otpornosti na antibiotike u permafrostnim bakterijama vjerojatno je pojavno svojstvo za kompetitivnu prednost, a ne patogenost. Kako se permafrost otapa, postoji potencijal za povećanje broja bakterijskih populacija koje nose plazmide s genima otpornosti na antibiotike (D'Costa i sur., 2011).

5.3. Virusi permafrosta

5.3.1. Bakteriofagi

Virusi su najbrojnija skupina organizama na Zemlji. Nedavna istraživanja aktivnog sloja tla permafrosta identificirala su da su velika većina virusa dvolančane DNK (dsDNA) bakteriofagi (virusi koji inficiraju samo bakterije).

Većina bakteriofaga (i virusa općenito) su specifični za domaćina, što znači da mogu inficirati samo bakterije iste vrste i često samo isti soj. Unatoč tome što su bakteriofagi uglavnom specifični za bakterijske domaćine, čini se da su ključni faktori u strukturiranju zajednice koji podržavaju raznolikost mikrobiomu permafrosta. Raznolikost mikrobioma sprječava rast specifičnih bakterija (npr. ljudskih patogena) u velikom broju. To znači da, osim što bakteriofagi ubijaju patogene bakterije, čime štite ljudski organizam, mogu stvoriti ekosustav u kojem patogene bakterije manje vjerojatno postaju problem za ljude. S obzirom na trenutne dokaze o širokoj prisutnosti bakteriofaga u permafrostu, vrlo je malo vjerojatno da predstavljaju prijetnju ljudima.

Bakteriofagi su najintenzivnije proučavana vrsta virusa u okolišnim sustavima, dok je znanje o virusima s jednostrukom niti DNA (ssDNA) i RNA ograničeno, posebno u permafrostu.

Razlozi za to su:

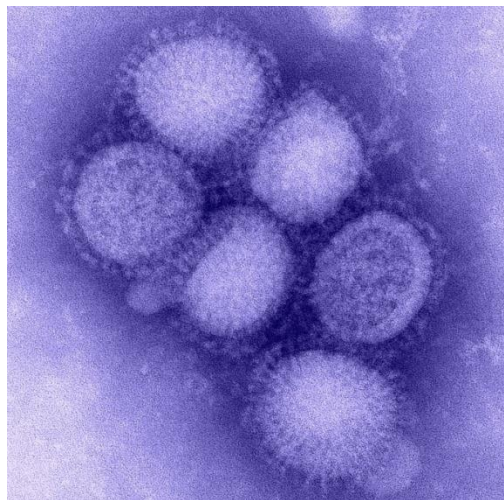
1. DsDNA bakteriofagi su sveprisutni i brojni
2. Uobičajene metode za izolaciju ssDNA ili RNA virusa onemogućuju kvantitativne ekološke zaključke ili ih isključuju (npr. metagenomi ne hvataju RNA viruse)
3. Većina ssDNA i RNA virusa inficira eukariote

Nedavno je razvijen protokol za bolje otkrivanje ssDNA virusa u permafrostnim tlima. Iako su otkriveni, oni čine mali dio virusne raznolikosti i brojnosti, a njihovi domaćini su bakterije ili mikro-eukarioti. Kao zaključak, globalna virusna raznolikost permafrosta još nije u potpunosti otkrivena.

5.3.2. H1N1

Virus influenzae H1N1 je RNA virus koji je uzrokovao pandemiju 1918. godine. RNA virus je manje stabilan u usporedbi s DNA virusom i skloniji degradaciji tijekom procesa ekstrakcije. Ovaj virus je usmrtio procijenjenih 50 milijuna ljudi, što je preopteretilo sahranjivanje zaraženih ljudi, rezultirajući masovnim grobnicama i neosiguranim tijelima. Ove masovne grobnice uglavnom su ostale neoznačene, što ostavlja mogućnost za interakciju ljudi s tim tijelima uslijed otapanja permafrosta. Tijekom 1990-ih, provedeni su eksperimenti rekonstruiranja ili oživljavanja virusa pandemije influenzae iz smrznutih uzoraka, ali su bili neuspješni jer je RNA bila visoko degradirana. Početkom 2000-ih, napredak tehnologije omogućio je uspješnu rekonstrukciju virusa H1N1 iz permafrosta, ali virus nije bio održiv. Potpuni geni hemaglutinina (HA), koji kodiraju proteinske veze za inicijaciju infekcije, detektirani su u rezervnim transkriptima RNA ekstrahiranih iz smrznutih plućnih tkiva žrtava influenzae iz 1918. godine, koje su bile pokopane u masovnoj grobnici u permafrostu. Iako bi se ovaj posljednji primjer mogao smatrati zabrinjavajućim, virusi nisu bili infektivni. Stoga, iako RNA virusi mogu biti očuvani u permafrostu, na temelju trenutnog znanja, rizik da ovi RNA virusi budu infektivni za ljude ili druge životinje je malen.

Svinje su posebno osjetljive na virus H1N1, poznat kao uzročnik svinjske gripe. Oslobođanje virusa H1N1 iz permafrosta moglo bi dovesti do infekcije svinja, što bi imalo negativne ekonomske i zdravstvene posljedice za stočarstvo. Svinje mogu poslužiti kao domaćini za različite sojeve virusa gripe, omogućujući rekombinaciju genetskog materijala i stvaranje novih, potencijalno opasnijih sojeva gripe (Easterday i Hinshaw, 1992).



Slika 5.3.2.1. Virus influenzae H1N1

Izvor: http://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQMpG18pyGa5L5f1PXTKGt1-mb-sTkiMK6M8wjrSanlTqPm1_t3_uC4jXR_u2shGi0xArc&usqp=CAU

5.3.3. *Rabies Lyssavirus*

Bjesnoća se uglavnom prenosi ugrizima divljih životinja (vukova, lisica, pasa) te se također javlja kod sobova, konja i krava. Klimatske promjene u staništima i migracijskim rutama divljih životinja mogu olakšati širenje ove infekcije.

Epizootijske stope bjesnoće su porasle na poluotoku Taymyr od 2003. godine. Slučajevi bjesnoće opisani su među arktičkim lisicama, vukovima, psima i sobovima. Sličan trend primijećen je i u Nenetskom autonomnom okrugu, gdje je epizootska bjesnoća prvi puta dokumentirana 1938. godine, istovremeno s uspostavom veterinarske službe (Ivanov, 2010). Bjesnoća je pronađena među 13 vrsta životinja te je 80 % divljih sisavaca zaraženo bjesnoćom u sjevernoj Jakutiji. U Nenetskom autonomnom okrugu, 4,9 % običnih lisica i 9,8 % arktičkih lisica ima ovu bolest. Od 2007. godine, Republika Komi je navedena među regijama visokog rizika s obzirom na bjesnoću, a povremeni slučajevi ljudske bjesnoće prijavljeni su u okrugu Yamalo-Nenetski, Jakutiji, Magadanu i drugim regijama ruskog Sjevera. Između 1946. i 2006. godine, registrirano je 259 smrtnih slučajeva od ove bolesti u Sibiru i Dalekom istoku (Sidorov, 2014).

5.3.4. *Mammalian Orthoreovirus (MRV)*

Mammalian orthoreovirus (MRV) je skupina dvostruko lančanih RNA virusa koji mogu inficirati različite sisavce, uključujući stoku. Istraživanja su pokazala da MRV može preživjeti u ekstremnim uvjetima te ova sposobnost preživljavanja čini MRV potencijalnom prijetnjom za stočarstvo.

MRV je otkriven u uzorcima permafrosta koji datiraju nekoliko tisuća godina unazad. S obzirom na njegovu otpornost, postoji zabrinutost da bi se oslobađanje ovih virusa moglo dogoditi s topljenjem permafrosta, što bi moglo dovesti do novih izbijanja bolesti kod stoke (Smith, 2015). Zaraza MRV-om kod stoke može uzrokovati respiratorne i gastrointestinalne bolesti, što može rezultirati smanjenom proizvodnjom mlijeka i mesa, kao i povećanom stopom smrtnosti među zaraženim životinjama (Brown i Jones, 2017).

Globalno stočarstvo suočava se s potencijalno velikim rizicima ako se MRV virusi oslobode iz permafrosta. Širenje virusa moglo bi ugroziti zdravlje životinja i prouzročiti značajne ekonomske gubitke u industriji stočarstva. Potrebno je provesti daljnja istraživanja kako bi se bolje razumjeli mehanizmi prijenosa i potencijalne metode prevencije širenja ovih virusa (Ivanov, 2018).

5.3.5. Virus krpeljnog encefalitisa (TBEV)

Krpeljni encefalitis, bolest koju prenose zaraženi krpelji, ima ciklički karakter s periodima povećane i smanjene pojavnosti. Prirodne varijacije u gustoći populacija domaćih životinja i vektora krpelja, razina otpornosti životinja na infekciju te genetska svojstva virusa igraju ključnu ulogu u ovim cikličkim fluktuacijama (World Health Organization, 2021).

Na područjima arktičkog sjevera Rusije, kao što su Arhangeljski kraj, Komijska i Karelijska republika, primjećuje se porast slučajeva krpeljnog encefalitisa. Ovi trendovi mogu se objasniti utjecajem klimatskih promjena koje sve više utječu na populacije ixodičnih krpelja, glavnih vektora za infektivne agense kao što su krpeljni encefalitis i borelijoza.

Ixodes persulcatus, vrsta krpelja koja prenosi krpeljni encefalitis, proširila se na područja kao što je Jakutija, što je rezultat povećanih temperatura i produženja sezonskog razdoblja aktivnosti krpelja (Centers for Disease Control and Prevention, 2023).

Područje Tjumena u Rusiji je endemsko za krpeljni encefalitis, s godišnjim brojem prijavljenih slučajeva koji se približava 100, dok je godišnji broj dokumentiranih ugriza krpelja *Ixodes* oko 17 500 (European Centre for Disease Prevention and Control, 2020).

Simptomi krpeljnog encefalitisa kod domaćih životinja uključuju groznicu, neurološke probleme poput koordinacijskih poteškoća i paralize, što može imati značajne ekonomske i zdravstvene posljedice za stočarstvo (Centers for Disease Control and Prevention, 2023).

Važnost poduzimanja preventivnih mjera kao što su redovito tretiranje životinja protiv krpelja, korištenje zaštitne opreme i vakcinacija, ključne su u smanjenju rizika od krpeljnog encefalitisa među domaćim životinjama na područjima permafrosta (European Centre for Disease Prevention and Control, 2020).

5.3.6. *Variola virus*

Variola virus uzrokuje velike boginje kod ljudi. Može biti prisutan u permafrostu, ali nije otkriven u dovoljnim količinama ili dovoljno kvalitetan da bi predstavljao prijetnju. Budući da DNA virusi koevoluiraju i repliciraju se u prisutnosti svojih domaćina, za prisutnost patogenih ljudskih virusa u dovoljnim količinama da uzrokuju infekciju, ljudski/životinjski ostaci morali bi biti sačuvani u stanju koje omogućuje preživljavanje virusa. Međutim, to je vrlo malo vjerojatno. Na primjer, godine 2004., francuski i ruski tim identificirao je nekoliko arheoloških nalazišta u sjeveroistočnom Sibiru (u Republici Sakha, Ruska Federacija). Svako mjesto sastojalo se od smrznutih drvenih grobova zakopanih u permafrostu datiranih iz kasnog 17. do početka 18. stoljeća. Jedan od tih grobova sadržavao je pet smrznutih mumija. Pronađene su žrtve velikih boginja mumificirane u permafrostu, ali DNA *Variola* virusa bila je visoko degradirana i stoga virus nije bio infektivan. Ovo otkriće bilo je vrlo neobično, budući da je u Jakutiji u to vrijeme bila standardna praksa pojedinačnog pokapanja tijela. Dakle, iako se ljudski DNA patogeni virusi mogu otkriti u permafrostu, rizik od infekcije je zanemariv i zabrinjavajući samo kada je virus netaknut i prisutan u dovoljnim količinama da uzrokuje bolest (Balzter i sur., 2004).



Slika 5.3.6.1. Pet žrtava velikih boginja mumificiranih u sibirskom permafrostu

Izvor: http://www.nejm.org/cms/10.1056/NEJMc1208124/asset/ba15499f-c175-48b2-a38a-85757281a864/assets/images/large/nejmc1208124_f1.jpg

5.4. Ostali virusi

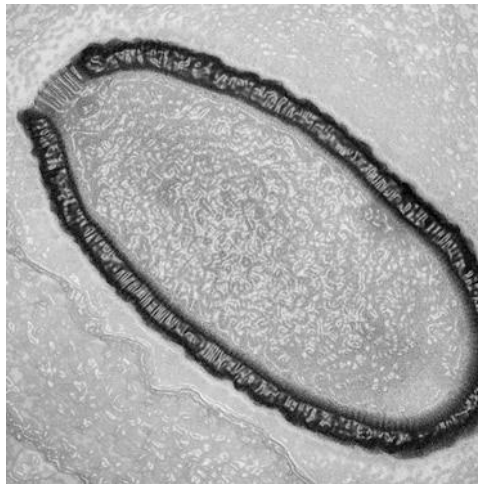
5.4.1. *Pithovirus sibericum*

Pithovirus sibericum jedan je od najvećih virusa ikada pronađenih. Dug oko 1,5 mikrometara, otprilike je veličine male bakterije i pripada skupini poznatoj kao "divovski virusi", dvolančanim DNA virusima koji su (uz neke iznimke) vidljivi pod svjetlosnim mikroskopom. *P. sibericum* ima ovalan oblik s debelim stijenkama i otvorom na jednom kraju, prekriven strukturom nalik na čep (Legendre i sur., 2014).

Znanstvenici u potrazi za nepoznatim patogenima otkrili su *P. sibericum* duboko u jezgri drevnog sibirskog permafrosta izvađenog 2000. godine iz Kolyme, na ruskom Dalekom istoku te su oživili taj 30 000 godina star virus izlaganjem uzorka permafrosta amebama, jedinim poznatim domaćinima *P. Sibericum*. Naime, virus je bezopasan za ljude i druge životinje (Legendre i sur., 2014).

"Naš protokol je staviti kulture ameba (u laboratoriju) u kontakt s različitim uzorcima, u nadi da će sadržavati viruse koji mogu zaraziti amebe", rekao je Jean-Michel Claverie (Legendre i sur., 2014).

Znanstvenici su virus nazvali prema grčkoj riječi "pithos", koja se odnosi na velike posude ili amfore koje su stari Grci koristili za pohranu vina i hrane.



Slika 5.4.1.1. *Pithovirus sibericum*

Izvor: <http://cdn.mos.cms.futurecdn.net/ZCRtQnJnPAyfX3qHTo354V-970-80.jpg>

5.4.2. *Mollivirus sibericum*

Mollivirus sibericum pronađen je smrznut u istom 30 000 godina starom uzorku sibirskog permafrosta kao i *P. Sibericum*, no čestice virusa *M. sibericum* (duljine 0,6 do 1,5 mikrometara) manje su od čestica *P. sibericum*, ali su također vidljive pod svjetlosnim mikroskopom te se kvalificiraju kao divovski virusi. Ovaj grubo okrugli virus okružen je dlakavim zaštitnim slojem i može proizvesti te otpustiti 200 do 300 novih virusnih čestica iz svake amebe koju zarazi (Legendre i sur., 2015).

Iako *M. sibericum* ne predstavlja opasnost za ljude i druge životinje, otkriće dvaju drevnih virusa u jednom uzorku dokazuje da uspavani patogeni često mogu vrebati u permafrostu.

Legendre i sur. (2015) u svom istraživanju navode kako se ne može isključiti da bi se udaljeni virusi drevnih sibirskih ljudskih ili životinjskih populacija mogli ponovno pojaviti kako se arktički slojevi permafrosta tope i/ili budu poremećeni industrijskim aktivnostima.

5.4.3. *Pithovirus mammoth*

Pithovirus mammoth je drugi zabilježeni soj Pithovirusa, izoliran iz 27 000 godina stare okamenjene vune mamuta iskopane na obalama rijeke Yana na ruskom Dalekom istoku. *P. mammoth* ima veliku i izduženu česticu koja mjeri 1,8 mikrometara u duljinu, a struktura mu je slična kao kod *P. sibericum*. Amebe su jedini poznati domaćin ovog virusa.

Naime, iz sibirskog su permafrosta, čak tri virusa - *P. mammoth*, *Megavirus mammoth* i *Pandoravirus mammoth* - otkriveni u istom pretpovijesnom uzorku koji je sadržavao mamutovu vunu (Legendre i sur., 2015).

5.4.4. *Pandoravirus mammoth*

Pandoravirus mammoth, otkriven je u uzorcima mamutove vune starim 27 000 godina s obale rijeke Yana te u okamenjenom sadržaju želuca mamuta starom 28 600 godina na otočju Lyakhovsky u sjeveroistočnoj Rusiji. Pandoravirusi su poznati po svojoj veličini, s česticama u obliku amfore koje mogu doseći duljinu do 1,2 mikrometra. Istraživači su testirali ovaj virus na kulturama ameba te na stanicama ljudi i miševa kako bi provjerili njegovu sposobnost infekcije. Nalazi ukazuju da ovaj virus ne može zaraziti stanice sisavaca, što je važno za procjenu potencijalnih prijetnji od virusa koji se bude iz dugotrajnog mirovanja u permafrostu (Abergel i sur., 2014).

5.4.5. *Pandoravirus yedoma*

Pandoravirus yedoma predstavlja najstariji virus koji je do sada pronađen u permafrostu, sa starošću procijenjenom na 48 500 godina. Istraživači su otkrili ovaj patogen, koji zaražuje amebe, u ledenim naslagama ispod jezera u Yukechi Alasu, na ruskom Dalekom istoku. Ovaj virus u obliku jajeta mjeri 1 mikrometar u duljinu (Legendre i sur., 2023).

Datiranje virusa zaključanih u permafrostu provodi se pomoću metode radiokarbonskog datiranja, koja se temelji na radioaktivnom raspadu ugljika-14. Ova metoda omogućuje precizno određivanje starosti organskih materijala do približno 50 000 godina. Međutim, u uzorcima starijim od 50 000 godina, preostala količina radioaktivnog ugljika postaje toliko mala da trenutne tehnike ne mogu točno datirati materijal (Genty i sur., 2006).

5.4.6. *Megavirus mammoth*

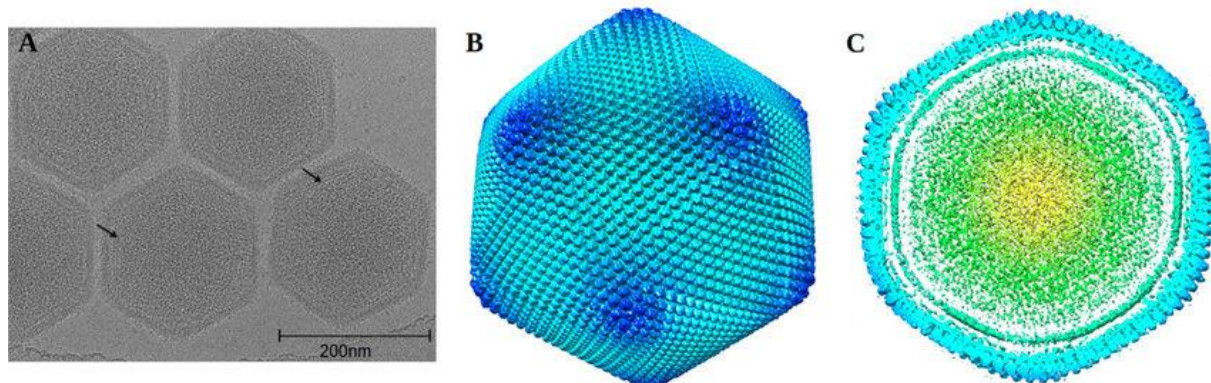
Megavirus mammoth, pripadnik obitelji *Mimiviridae*, prvi je virus otkriven u permafrostu koji pripada ovoj obitelji. Mimivirusi su bili prvi klasificirani divovski virusi, otkriveni 1992. godine u vodi rashladnog tornja u Bradfordu, Engleska. Ovi virusi inficiraju amebe i imaju čestice promjera 0,5 mikrometara (La Scola i sur., 2003).

Istraživači su izolirali *Megavirus mammoth* iz 27 000 godina starog leda i mamutove vune otkrivene na obali rijeke Yana u sjeveroistočnoj Rusiji (Legendre i sur., 2014).

5.4.7. *Pacmanvirus lupus*

Pacmanvirusi su nedavno otkrivena skupina virusa koji inficiraju amebe i koji su u dalekom srodstvu s virusom afričke svinjske kuge iz obitelji *Asfarviridae*. Nazvani su prema video igrici "Pac-Man" jer kada se razbije, proteinski omotač izgleda kao navedeni lik iz video igrice. *Pacmanvirus lupus* je treći zabilježeni član ove skupine i prvi soj izoliran iz permafrosta. Ovaj soj je pronađen u 27 000 godina starim smrznutim crijevnim ostacima sibirskog vuka (*Canis lupus*), na lokaciji Yana u sjeveroistočnoj Rusiji (Abergel i sur., 2023).

Pacmanvirusi su klasificirani kao divovski virusi, ali novootkriveni soj, *P. lupus*, dug je samo 0,2 mikrometra i nevidljiv je pod svjetlosnim mikroskopom. Unatoč svojoj veličini, ovi virusi predstavljaju značajnu znanstvenu zanimljivost zbog svog evolucijskog odnosa s drugim velikim virusima i potencijalnih utjecaja na ekosustave pri otapanju permafrosta (Legendre i sur., 2014).



Slika 5.4.7.1.

- (A) Cryo-EM mikrograf pacmanvirusa pokazuje jasnu unutarnju membranu (strelice)
 (B) Cryo-EM rekonstrukcija pacmanvirusa
 (C) Poprečni presjek prikazuje jasnu unutarnju membranu na cryo-EM karti gustoće

Izvor:

<http://www.researchgate.net/publication/316523750/figure/fig4/AS:576574546247680@1514477492201/Cryo-EM-3D-reconstruction-of-pacmanvirus-A23-A-Cryo-EM-micrograph-of-pacmanvirus.png>

5.4.8. *Cendratvirus lena* i ostali

Istraživači su izdvojili *Cendratvirus lena* iz permafrosta na muljevitim obalama rijeke Lene na ruskom Dalekom istoku. Novootkriveni soj ima izduženu česticu duljine 1,5 mikrometara koja podsjeća na *P. sibericum*, ali ima dvije strukture nalik plutu na svakom kraju umjesto jedne (Abergel i sur., 2023).

Tim je sakupio još dva soja *Cendratvirusa* na ruskom Dalekom istoku: *C. kamchatka*, iz smrznutog tla na poluotoku Kamčatka i *C. duvanny*, iz mulja koji teče u rijeku Kolymu kao rezultat otapanja permafrosta različitih godina.

5.5. Gljivični patogeni u permafrostu

Nedavna istraživanja permafrosta u Sibiru otkrila su prisutnost različitih gljiva, uključujući potencijalne biljne patogene poput vrsta iz rodova *Geomyces*, *Cladosporium*, *Aspergillus* i *Penicillium*. Otapanje permafrosta također je rezultiralo povećanjem biljnih patogena poput *Galerina paludosa* i *Hyaloscypha* u termokarstnim močvarama.

Osim biljnih patogena, identificirani su i gljivični patogeni insekata, što sugerira prisutnost raznolikih vrsta insekata i drugih životinja u prošlim vremenima. Iako istraživanja ukazuju na prisutnost DNK gljivičnih patogena, nije jasno jesu li ovi patogeni još uvijek aktivni. Gljive iz

permafrosta često formiraju male konidije što može biti mehanizam preživljavanja pod ekstremnim uvjetima.

Iako direktni dokazi aktivnih gljivičnih patogena koji inficiraju životinje u permafrostu nisu potvrđeni, mogućnost njihovog buđenja zbog klimatskih promjena i otapanja permafrosta zahtijeva daljnja istraživanja (Lydolph i sur., 2005).

5.6. Mehanizmi prilagodbe mikroorganizama na ekstremne uvjete permafrosta

Brojna laboratorijska istraživanja pružila su primjere kako mikroorganizmi u permafrostu podnose okolišne stresove poput smrzavanja, niskih temperatura, nedostatka hranjivih tvari i slično te kako neznatna količina tekuće slane otopine doprinosi zaštiti stanica u permafrostu. Tijekom prirodnog procesa smrzavanja koji se odvija malom brzinom, mikroorganizmi u tlu doživljavaju fiziološke prilagodbe i adaptivna ponašanja (Walker i sur., 2006), koja mogu uključivati smanjenje volumena stanica, modifikacije lipida i masnih kiselina za održavanje fluidnosti membrane, akumulaciju poliola (proteina koji vežu led) i antifriznih proteina, sintezu proteina za hladni šok i enzima koji su aktivni na niskim temperaturama, adaptacije genoma i sl. Stanična membrana, koja je prva pogođena promjenama u okolišu, pokazuje brzi porast monozasićenih masnih kiselina i smanjenje zasićenih masnih kiselina, kao što je to slučaj kod bakterija permafrosta uzgojenih na 4 °C u odnosu na 15 °C. Metodom diferencijalne stanične kolorimetrije, isti autori nisu dokazali stvaranje unutarstaničnog leda u stanicama koje su bile podvrgnute polaganom smrzavanju na temperaturama čak do -150 °C, iz čega su zaključili da mikroorganizmi u permafrostu mogu sadržavati ne smrznutu unutarstaničnu otopinu kada su inokulirani u smrznuti permafrost (McGrath i sur., 1994). Uvjeti rasta prije smrzavanja mogu značajno poboljšati kriotoleranciju i preživljavanje. Tako je *Exiguobacterium sibiricum*, izoliran iz permafrosta, uzgojen u tekućem mediju na niskoj temperaturi ili na agarom mediju. Bakterija je pokazala sposobnost rasta na temperaturama ispod 0 °C, s optimalnim rastom na temperaturama blizu 10 °C, što potvrđuje njenu kriotoleranciju (Vishnivetskaya i sur., 2007).

Da bi se prilagodile uvjetima niske temperature i niske aktivnosti vode u permafrostu, bakterije pokazuju značajne promjene u staničnom energetske metabolizmu. Na primjer, mikroorganizmi mogu usporiti metabolizam i postati reverzibilno dormantni. Tako su eukariotski mikroorganizmi (filamentozne gljive *Geomyces* spp. i kvasci *Leucosporidium* spp.) nakon kratkog razdoblja rasta na temperaturama niskim kao -35 °C pokazali pad metaboličke aktivnosti na nulu i ušli u stanje reverzibilne dormancije (Panikov i Sizova, 2007). Slična sposobnost ulaska u dormantno stanje uočena je kod nesporulirajućih bakterija permafrosta roda *Arthrobacter* i *Micrococcus*. Ove bakterije su bile sposobne proizvesti ekstracelularni faktor odgovoran za prijelaz stanica u anabiozu (Mulyukin i sur., 2001) što je omogućilo poboljšano preživljavanje u nepovoljnim uvjetima tijekom dugotrajne izloženosti

temperaturama ispod nule, niskoj aktivnosti vode i nedostupnosti hranjivih tvari (Soina i sur., 2004). Druge bakterije, na primjer, permafrost bakterija *Exiguobacterium sibiricum* uzgojena na 4 °C i *Psychrobacter cryohalolentis* K5 iz kriogena uzgojena na ili ispod 4 °C pokazale su smanjenje regulacije enzima uključenih u glavne metaboličke procese (glikoliza, fermentacija, metabolizam šećera itd.) te povećanje regulacije staničnih proteina i enzima uključenih u transport elektrona, popravak DNA/RNA i iskorištavanje degradirane DNA za sintezu nukleotida. *Psychrobacter cryohalolentis* K5 pokazao je porast koncentracije staničnog ATP-a i ADP-a s padom temperatura između 22 i -80 °C (Amato i Christner, 2009). Ovi rezultati sugeriraju da neke bakterije održavaju ograničenu metaboličku aktivnost u permafrostu. Podaci podržavaju mišljenje da mikroorganizmi doživljavaju strukturne i metaboličke promjene tijekom procesa smrzavanja te da te promjene mogu dovesti do različitih strategija preživljavanja – dormantnog ili neaktivnog stanja i anabioze ili jako smanjenog metabolizma.

5.7. Rast i metabolička aktivnost pri subnultim temperaturama

Laboratorijska istraživanja pružaju primjere kako mikroorganizmi iz permafrosta i permafrostom zahvaćenih tala mogu rasti na temperaturama znatno ispod nule. Na primjer, permafrostne suspenzije na hranjivom agar mediju omogućile su rast bakterija i gljiva na -10 °C unutar 4 tjedna (Gilichinsky i sur., 1992).

Planococcus halocryophilus je pokazao sposobnost rasta na -15 °C u Tryptic sojin agar mediju s dodatkom 18 % NaCl-a i 7 % glicerola. S druge strane, *Psychrobacter arcticus* je rastao na -10 °C u morskom bujonu s 3 % morske soli, 0.5 % triptona (koristi se za određivanje sposobnosti bakterija da proizvode indol pomoću deaminacije triptofana) i 0,1 % ekstrakta kvasca, dok je *Exiguobacterium sibiricum* rastao na -6 °C u Tryptic sojin agar mediju s 0.7 % ekstrakta kvasca (Mykytczuk i sur., 2013).

Ispitivanja uzoraka prikupljenih iz kriopega – leća nezaleđene solne otopine okružene morskim permafrostom formiranim prije 100-120 tisuća godina, pokazala su da je njihova izvorna bakterijska populacija mogla usvojiti glukozu otprilike 100 puta više na -15 °C u usporedbi s bakterijama iz neslanih sedimenata. Ovo pruža dokaze za in situ metaboličku aktivnost (Gilichinsky i sur., 2003).

Potencijalna metabolička aktivnost pod in situ uvjetima permafrosta može se pretpostaviti na temelju pozitivne korelacije između koncentracije metana i prisutnosti metanogenih arheja, fosfolipida i ukupnog organskog ugljika. Koncentracija metana nije korelirala s dobi permafrosta već s paleoklimatskim uvjetima tijekom formiranja permafrosta (Holm i sur., 2020).

Izvorna mikrobna zajednica permafrosta, pokazala je uključivanje radioaktivnog ugljika iz acetata u lipide na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ tijekom 550 dana, s procijenjenim vremenom udvostručavanja od oko 160 dana. Proizvodnja ugljikovog dioksida na $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ iznosila je između 0,142 i 0,794 mikrograma po gramu dnevno u uzorcima starim do 600 000 godina, dok u uzorcima starim 740 000 godina nije otkriven ugljikov dioksid. Permafrostni treseti s prosječnom godišnjom temperaturom od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ pokazali su proizvodnju metana na $-16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Opsežan pregled procijenio je da stopa metabolizma na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ iznosi oko 10 obrtaja staničnog ugljika po milijardu godina (Johnson i sur., 2007).

6. Mogućnosti i rješenja

Globalno zatopljenje i otapanje permafrosta predstavljaju ozbiljnu prijetnju zdravlju ljudi i životinja, budući da se drevni mikroorganizmi oslobađaju i mogu izazvati nove ili povratne bolesti. Suočavanje s ovim izazovom zahtijeva sveobuhvatni pristup koji uključuje praćenje, istraživanje, preventivne mjere i međunarodnu suradnju.

6.1. Ublažavanje klimatskih promjena

Najvažniji dugoročni cilj u sprječavanju širenja patogena iz permafrosta je smanjenje emisije stakleničkih plinova i ublažavanje klimatskih promjena. Globalni napori u smanjenju emisija plinova, prelazak na obnovljive izvore energije i zaštita prirodnih staništa mogu usporiti otapanje permafrosta i smanjiti rizik od oslobađanja opasnih mikroorganizama. Međunarodni sporazumi poput Pariškog sporazuma igraju ključnu ulogu u koordinaciji ovih napora na globalnoj razini (UNFCCC, 2015).

6.2. Unapređenje praćenja i nadzora mikroorganizama

Sljedeći korak u borbi protiv širenja bolesti je uspostava učinkovitih sustava za praćenje i nadzor mikroorganizama u permafrostu. Potrebno je uspostaviti mrežu nadzornih postaja u arktičkim regijama koje će kontinuirano prikupljati podatke o temperaturi tla, brzini otapanja permafrosta i prisutnosti patogena. Uz to, važno je razviti napredne tehnologije za brzu identifikaciju mikroorganizama i njihovu genetsku analizu kako bi se pravovremeno detektirale potencijalne prijetnje (Walke i sur., 2018).

6.3. Istraživanje i razumijevanje patogena

Temeljito istraživanje mikroorganizama pronađenih u permafrostu ključno je za razumijevanje njihovih karakteristika i potencijalne opasnosti. Znanstvenici trebaju provoditi detaljne genomske analize kako bi identificirali patogene koji mogu zaraziti ljude i životinje te razviti modele za predviđanje njihovog ponašanja u novim uvjetima. Također je važno proučavati mehanizme preživljavanja i otpornosti ovih mikroorganizama kako bi se razvile strategije za njihovu kontrolu (Jansson i Tas, 2014).

6.4. Preventivne mjere

Jedan od ključnih aspekata u suzbijanju širenja bolesti je implementacija preventivnih mjera. To uključuje razvoj i primjenu rigoroznih protokola za rukovanje uzorcima permafrosta kako bi se spriječilo oslobađanje patogena tijekom istraživanja i industrijskih aktivnosti. Također je potrebno educirati lokalne zajednice i radnike u arktičkim područjima o rizicima povezanim s otapanjem permafrosta i mjerama zaštite, uključujući korištenje zaštitne opreme i higijenskih praksi (Aarestrup, 2020).

Kako postoji zabrinutost da bi patogeni iz permafrosta mogli zaraziti stoku i zatim prenijeti bolest na ljude, potrebno je i provoditi mjere sigurnosti usmjerene na životinje.

Nordijci su doveli ovce na Grenland kada su naselili otok oko 1000. godine, no i životinje i Nordijci su nestali do 1450. godine. S klimatskim promjenama, Grenland očekuje ponovno uzgajanje ovaca. Ovo predstavlja značajan rizik jer potencijalno uvodi populaciju životinja koja nije potpuno imuna na lokalne patogene (Aarestrup, 2023.)

Ova situacija može dovesti do izbijanja bolesti među životinjama, koje bi se potom mogle prenijeti na ljude. Stoga je ključno pažljivo pratiti zdravstveno stanje stoke i implementirati preventivne mjere kako bi se smanjio rizik od širenja zaraza.

6.5. Razvoj cjepiva

S obzirom na potencijalnu opasnost od novih bolesti, ključno je ulagati u istraživanje medicinskih tretmana za patogene iz permafrosta i razvoj cjepiva. To uključuje brzo sekvenciranje genoma patogena i proizvodnju prototipova cjepiva koja mogu biti brzo prilagođena u slučaju izbijanja bolesti. Međunarodna suradnja i razmjena podataka među znanstvenicima, javnozdravstvenim agencijama i farmaceutskim tvrtkama također su od ključne važnosti za brz i učinkovit odgovor na nove prijetnje (Fauci i sur., 2018).

Na primjer, izbijanje antraksa u Rusiji stvorilo je novu opasnost koja bi mogla sve više utjecati na zemlje Globalnog juga, posebno na afrički kontinent i jugoistočnu Aziju. Migracijske ptice mogle bi zarazu prenijeti na lokalne populacije divljih ptica, kao i na domaće piliće i drugu stoku, stvarajući značajne izazove. Klanje velikih populacija životinja bilo bi izuzetno riskantno jer bi ugrozilo sigurnost hrane i prihode lokalnog stanovništva.

Podrška zemljama Globalnog juga također uključuje razvoj i široku distribuciju cjepiva. Potrebna su nova cjepiva kako za životinje tako i za ljude. Farmaceutske kompanije u Sjedinjenim Državama i EU traže pristup izvoru bakterijske infekcije – otapanju permafrosta u Rusiji – kako bi razvile potrebna cjepiva. Strahuju da bi kineske kompanije mogle dobiti privilegirani pristup ruskoj tundri i uspostaviti monopol za proizvodnju cjepiva. Nakon pandemije Covid-19, bila je značajna rasprava tijekom pregovora o Pandemijskom sporazumu o "Pristupu i dijeljenju koristi". Navedena rasprava fokusirala se na pristup patogenima i

podacima o sekvenciranju u zamjenu za medicinske mjere protiv pandemije i financijsku kompenzaciju.

Iako Pandemijski sporazum regulira pravedno dijeljenje koristi cjepiva za ljude, ratificiran je samo od strane nekoliko država. Stoga, brzi pristup novom patogenu mora se osigurati putem drugih sredstava ako Rusija zahtijeva recipročnost. Jedna mogućnost bila bi osigurati Moskvi da će određeni dio proizvoda razvijenih na temelju podijeljenih patogena biti dostupan po cijeni proizvodnje (Bayerlein i sur., 2024).

6.6. Koncept “Jedno zdravlje“

Stručnjaci ističu potrebu za većom suradnjom između različitih sektora. Dr. Bernstein predlaže da bi ranu prevenciju mogla olakšati veća suradnja između zaštitnika životinja, veterinaru i javnozdravstvenih službenika (Bernstein, 2021).

Ovaj pristup, poznat kao koncept "jednog zdravlja", naglašava integraciju različitih disciplina i sektora kako bi se postigla optimalna zdravstvena zaštita za ljude, životinje i okoliš. Suradnja između vlada, znanstvenih tijela i nevladinih organizacija mogla bi igrati ključnu ulogu u sprječavanju pandemija uzrokovanih novim ili ponovno otkrivenim patogenima iz permafrosta (World Health Organization, 2017). Globalne inicijative, poput onih koje promiču Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) i Organizacija za hranu i poljoprivredu (FAO), mogu pomoći u uspostavljanju standarda i smjernica za suradnju između različitih sektora (Gibbs, 2014).

7. Zaključak

Patogeni mikroorganizmi iz permafrosta predstavljaju zanimljiv i potencijalno zabrinjavajući aspekt klimatskih promjena. Permafrost, trajno smrznuto tlo, čuva širok spektar mikroorganizama, uključujući bakterije, viruse, mikroskopske gljive i protozoe, koje mogu biti aktivirane uslijed zagrijavanja i otapanja permafrosta. Premda je mogućnost njihove infekcije i izazivanja bolesti kod ljudi i životinja mala, potencijalni rizik i dalje postoji. Posebno su zabrinjavajuće posljedice za domaće životinje koje mogu biti izložene patogenima iz permafrosta jer to može utjecati na stočarstvo i lokalne ekonomije. Zbog toga je važno kontinuirano pratiti i istraživati te mikroorganizme kako bi se razumjela njihova ekologija, potencijalna prijetnja i način prijenosa u novim okolišnim uvjetima.

Politički preokret zaustavio je prikupljanje novih uzoraka permafrosta. Zbog rusko-ukrajinskog rata, sva suradnja sada je zaustavljena, no laboratoriji će nastaviti proučavati mikroorganizme koje imaju. Također se nadaju da će tvrtke koje postavljaju operacije bušenja i rudarenja na sibirskom permafrostu obratiti pozornost i nastaviti s oprezom, na primjer praćenjem neobičnih bolesti i postavljanjem odgovarajućih karantenskih objekata.

Zaključno, potrebno je detaljnije istražiti utjecaj klimatskih promjena na mikroorganizme u okolišu. Također, važno je poboljšati praćenje i dijagnostiku zoonotskih infektivnih bolesti, educirati javnost i zdravstvene djelatnike o preventivnim mjerama te povećati svijest o populacijama s povećanim rizikom od infekcije. Na primjer, posebnu pažnju treba posvetiti praćenju lokacija za pokapanje goveda zaraženih antraksom.

Ove mjere su ključne za javno zdravlje i zaštitu ljudi i životinja. Jačanje epidemiološkog nadzora i implementacija novih dijagnostičkih metoda od presudne su važnosti za učinkovito upravljanje rizicima koje donose klimatske promjene. Borba protiv širenja bolesti uzrokovanih mikroorganizmima iz otapajućeg permafrosta zahtijeva multidisciplinarni pristup koji uključuje znanstvena istraživanja, praćenje, preventivne mjere, razvoj medicinskih tretmana i globalnu suradnju. Samo zajedničkim naporima možemo smanjiti rizik od širenja bolesti i zaštititi zdravlje ljudi i životinja u uvjetima sve većih klimatskih promjena.

Integracija pristupa "Jednog zdravlja" predstavlja učinkovitu strategiju za sprječavanje širenja bolesti uzrokovanih mikroorganizmima iz otapajućeg permafrosta. Suradnja između različitih sektora, uključujući zaštitu životinja, veterinarstvo i javno zdravlje, ključna je za pravovremenu identifikaciju i odgovor na nove prijetnje. Međunarodne inicijative i globalna suradnja mogu dodatno osnažiti ove napore i doprinijeti očuvanju zdravlja planeta i njegovih stanovnika.

8. Popis literature

1. Aarestrup F. M. (2020). Protecting Health through Preventive Measures: Protocols and Practices. *Journal of Environmental Health*, 82(6), 8-12.
2. Aarestrup F. M. (2023). Livestock and Emerging Pathogens in Greenland: Historical Context and Future Risks. *Arctic Health*, 15(2), 101-109.
3. Abergel C., Legendre M. i Claverie J.-M. (2023). Resurrecting ancient viruses from permafrost: Discovery of Pacmanvirus lupus. *Viruses*.
4. Amato P. i Christner B. C. (2009). Metabolic changes in permafrost bacteria: Evidence from temperature effects on enzymatic activity. *Environmental Microbiology Reports*, 1(3), 243-249.
5. Balzter H., Bozhinova K. i Robinson T. (2004). Variola virus and ancient permafrost: Implications for historical epidemiology and modern-day risk. *Journal of Archaeological Science*, 31(7), 1063-1070.
6. Bayerlein M., Böttcher M., Rudloff B. i Villarreal P. A., 2024. Foresight: Pathogens from the Permafrost. Combating the Spread of an Animal-borne Disease with or without Russia. Dostupno na: <file:///C:/Users/user/Downloads/rusija%20permafrost.pdf> Pristupljeno: 17. srpnja 2024.
7. Bernstein M. (2021). Rana prevencija kroz suradnju između zaštitnika životinja, veterinarara i javnozdravstvenih službenika. *Journal of One Health*, 9(3), 156-162.
8. Brown J. (2000). Circumpolar Active-Layer Monitoring (CALM) Program: Description and Data. *Polar Geography*, 24(3), 166-258.
9. Brown T. i Jones D. (2017). The impact of MRV infection in livestock: Clinical symptoms and economic consequences. *Veterinary Microbiology*, 207, 1-12.
10. Bünz S., Berndt C., Petersen C. J., Mienert J. i Vanneste M. (2023). Submarine permafrost dynamics and seismic activity on the Arctic shelf. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 120(15), e2212469120.
11. Centers for Disease Control and Prevention. (2023). Tick-borne Encephalitis. Dostupno na: <https://www.cdc.gov/tickborneencephalitis/index.html> Pristupljeno: 17. srpnja 2024.
12. Claverie J.-M., 2024. Ancient viruses in permafrost: Risks and implications. *Live Science*. Dostupno na: <https://www.livescience.com/ancient-viruses-permafrost-risks> Pristupljeno: 11. srpnja 2024.

13. Cutler S. J., Fooks A. R. i Van der Poel W. H. (2005). Public health threat of new, reemerging, and neglected zoonoses in the industrialized world. *Emerging Infectious Diseases*, 16(1), 1-7.
14. D'Costa V. M., McGrann K. M., Hughes D. W. i Wright, G. D. (2011). Sampling the antibiotic resistome. *Science*, 331(6019), 275-278.
15. Easterday B. C. i Hinshaw V. S. (1992). Swine Influenza. In: Webster, R. G., & Granoff, A. (Eds.), *Encyclopedia of Virology*. London: Academic Press, pp. 416-422.
16. European Centre for Disease Prevention and Control. (2020). Tick-borne encephalitis - Annual Epidemiological Report for 2020. Dostupno na: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/tick-borne-encephalitis-annual-epidemiological-report-2020> Pristupljeno: 17. srpnja 2024.
17. European Space Agency (2021) Permafrost thaw could release bacteria and viruses. Dostupno na: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Permafrost_thaw_could_release_bacteria_and_viruses Pristupljeno: 15. srpnja 2024.
18. European Space Agency (2024) Will climate change turn the Arctic green? Dostupno na: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/CryoSat/Will_climate_change_turn_the_Arctic_green Pristupljeno: 15. srpnja 2024.
19. Fauci A. S., Lane H. C. i Redfield R. R. (2018). Covid-19 — Navigating the Uncharted. *New England Journal of Medicine*, 382, 1268-1269.
20. Fedorov-Davydov D. G., Rivkina E. M., Abramov A. A., Pogoda E. N., Laurinavichus K. S. i Shcherbakova V. A. (2018). Microbial community in the ancient permafrost. *Geosciences*, 8(10), 364.
21. Forsythe S. J., Dickins B. i Jolley K. A. The elusive leptospira: mechanisms of adaptation to the environment. *Front Microbiol.* 2018;9:2036.
22. Francuski L. J. (2007). Recent advances in studies of permafrost and periglacial processes. *Geological Quarterly*, 51(1), 13-24.
23. Gal-Mor O., Boyle E. C. i Grassl G. A. (2014). Same species, different diseases: how and why typhoidal and non-typhoidal *Salmonella enterica* serovars differ. *Frontiers in Microbiology*, 5, 391.
24. Genty D., Blamart D., Ghaleb B., Plagnes V., Causse C., Bakalowicz M. i Zouari K. (2006). Timing and dynamics of the last deglaciation from European and North African $\delta^{13}\text{C}$ stalagmite profiles—comparison with Chinese and South Hemisphere stalagmites. *Quaternary Science Reviews*, 25(17-18), 2118-2142.

25. Gibbs E. P. J. (2014). The evolution of One Health: a decade of progress and challenges for the future. *Veterinary Record*, 174(4), 85-91.
26. Gilichinsky D. A. i Kochetkova A. M. (2003). Metabolic activity of ancient bacteria from permafrost and its implications for the study of life in extreme conditions. *Microbiology*, 72(5), 653-661.
27. Gilichinsky D. A., Kurnosov A. A. i Khlobystin K. I. (1992). Growth of microorganisms from permafrost on nutrient agar at subzero temperatures. *Cryobiology*, 29(4), 448-453.
28. Holm N. G. i Pomeroy K. (2020). The role of methanogenic archaea and other microbes in permafrost methane production: Insights from geochemical and isotopic studies. *Geobiology*, 18(2), 159-176.
29. Hugh-Jones M. i Blackburn J. (2009). The ecology of *Bacillus anthracis*. *Molecular Aspects of Medicine*, 30(6), 356-367
30. Intergovernmental Panel on Climate Change (2019) Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Dostupno na: <https://www.ipcc.ch/srocc/> Pristupljeno: 15. srpnja 2024.
31. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
32. International Permafrost Association (2023) What is Permafrost?. Dostupno na: <https://www.permafrost.org/what-is-permafrost/> Pristupljeno: 15. srpnja 2024.
33. Ivanov V. (2010). "Epizootologiya i profilaktika beshenstva u severnykh regionakh Rossii." *Veterinariya*.
34. Ivanov I. (2018). Risks and management of emerging viral threats from thawing permafrost: A focus on MRV. *Journal of Animal Health and Production*, 12(4), 200-210.
35. Johnson S. L., Kieft T. L. i Martin J. P. (2007). Carbon metabolism and microbial activity in ancient permafrost soils: A review of research and findings. *Permafrost and Periglacial Processes*, 18(3), 221-238.
36. La Scola B., Audic S., Robert C., Jungang L., de Lamballerie X., Drancourt M. i Raoult D. (2003). A giant virus in amoebae. *Science*, 299(5615), 2033.
37. Legendre M., Arslan D., Abergel C. i Claverie J.-M. (2014). Pandoravirus: Amoeba viruses with genomes up to 2.5 Mb reaching that of parasitic eukaryotes. *Science*, 341(6143), 281-286.
38. Legendre M., Arslan D., Abergel C. i Claverie J.-M. (2023). Cedratvirus: Newly identified amoeba viruses from Siberian permafrost. *Science*, 341(6143), 281-286.

39. Legendre M., Bartoli J., Shmakova L., Jeudy S., Labadie K., Adrait A. i Claverie J. M. (2014). Thirty-thousand-year-old distant relative of giant icosahedral DNA viruses with a pandoravirus morphology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(11), 4274-4279.
40. Legendre M., Bartoli J., Shmakova L., Jeudy S., Labadie K., Adrait A. i Claverie J. M. (2015). Thirty-thousand-year-old distant relative of giant icosahedral DNA viruses with a pandoravirus morphology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(38), E5327-E5335.
41. Legendre M., Santini S., Rico A., Abergel C. i Claverie J.-M. (2023). Resurrecting Pandoraviruses from permafrost: A 48,500-year-old zombie virus. *Viruses*.
42. Mackelprang R., Saleska S. R., Jacobsen C. S., Jansson J. K. i Tas N. (2017). Permafrost Meta-Omics and Climate Change. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 45, 67-95.
43. McClane B. A. (2007). *Clostridium perfringens*. In M. P. Doyle & L. R. Beuchat (Eds.), *Food Microbiology: Fundamentals and Frontiers* (pp. 423-444). ASM Press.
44. McGrath J. W. i Williams C.J. (1994). Ice formation in microorganisms from permafrost: Evidence from differential cell colorimetry. *Cryobiology*, 31(6), 562-568.
45. Mulyukin A. L., Netrusov A. I. i Dmitriev S. E. (2001). Dormancy and survival strategies of permafrost bacteria: A review. *Microbiology*, 70(4), 407-414.
46. Mykytczuk N. C. S., Blais J. M. i Miteva V. (2013). Psychrophilic and psychrotolerant microorganisms from the permafrost: Isolation, characterization, and biotechnological potential. *Extremophiles*, 17(2), 257-271.
47. NASA (2024) What is Permafrost? Dostupno na: <https://climatekids.nasa.gov/permafrost/> Pristupljeno: 10. srpnja 2024.
48. National Geographic Society (2023) Permafrost. Dostupno na: <https://education.nationalgeographic.org/resource/permafrost/> Pristupljeno: 14. srpnja 2024.
49. Natural Resources Defense Council (2023) Permafrost: Everything You Need to Know. Dostupno na: <https://www.nrdc.org/stories/permafrost-everything-you-need-know#sec-whatis> Pristupljeno: 15. srpnja 2024.
50. Overland J. E., Dethloff K., Francis J. A., Hall R. J., Hanna E., Kim S. J. i Vihma T. (2015). Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic. *Nature Climate Change*, 6(10), 992-999.
51. Panikov N. S. i Sizova M. V. (2007). Metabolic responses of soil eukaryotes to freezing temperatures and low water activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(7), 1611-1621.

52. Parkinson A. J., Evengard B. i Semenza J. C. (2014). Climate change and infectious diseases in the Arctic: establishment of a circumpolar working group. *International Journal of Circumpolar Health*, 73(1), 25163.
53. Paull C. K. (2022). The Role of Submarine Permafrost in Arctic Methane Release. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 119(43), e2212312119.
54. Phys.org (2018) Permafrost: a climate time bomb?. Dostupno na: <https://phys.org/news/2018-12-permafrost-climate.html> Pristupljeno: 10. srpnja 2024.
55. Polyakov I. V., Alexeev V. A., Ashik I. M., Bacon S., Beszczynska-Möller A., Carmack E. C., Dmitrenko I. A., Fortier L., Gascard J. C., Hansen E., Ivanov V. V., Laxon S., Mauritzen C., Perovich D., Shimada K., Simmons H. L., Sokolov V. T., Steele M. i Timokhov L. A. (2010). Arctic Ocean Warming Contributes to Reduced Polar Ice Cap. *Journal of Physical Oceanography*, 40(12), 2743-2756.
56. Rachold V., Are F., Atkinson D. E., Cherkashov G. i Solomon S. (2007). Arctic Coastal Dynamics (ACD): An introduction. *Geo-Marine Letters*, 27(6), 187-188.
57. Revich B. i Podolnaya M. (2011). Thawing of permafrost may disturb historic cattle burial grounds in East Siberia. *Global Health Action*, 4(1), 8482.
58. Revich B., Shapovalov A. i Nechitailo T. (2012). Brucellosis in reindeer and its impact on indigenous Arctic populations. *International Journal of Circumpolar Health*, 71(1), 18794.
59. Revich B., Tokarevich N. i Parkinson A. J. (2012). Climate change and zoonotic infections in the Russian Arctic. *International Journal of Circumpolar Health*, 71, 18792.
60. Rogers S. O. (2010). Listeria and enteric bacteria from Alaskan and Siberian ice cores. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 37(12), 1153-1161.
61. Romanovsky V. E., Smith S. L. i Christiansen H. H. (2010). Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007-2009: a synthesis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(2), 106-116.
62. Roux J., Pavlov D., Filippova L., Gergova I. i Legendre M. (2007). Discovery of variola DNA in Siberian permafrost. *New England Journal of Medicine*, 357, 2116-2118.
63. Schmid B. V., Büntgen U., Easterday W. R. (2015). Climate-driven introduction of the Black Death and successive plague reintroductions into Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(10), 3020-3025.
64. Schuur E. A. G., McGuire A. D., Schädel C., Grosse G., Harden J. W., Hayes D. J., Hugelius G., Koven C. D., Lorantý M. M., Mazhitova G., O'Donnell J. A., Romanovsky

- V. E., Tarnocai C., Treat C. C. i Walz K. (2022). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 591, 663-668.
65. ScienceDirect (n.d.) Permafrost. Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/permafrost> Pristupljeno: 15. srpnja 2024.
 66. Screen J. A., Simmonds I. (2010). The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 464(7293), 1334-1337.
 67. Serreze M. C., Barrett A. P., Stroeve J. C., Kindig D. N. i Holland M. M. (2009). The emergence of surface-based Arctic amplification. *The Cryosphere*, 3(1), 11-19.
 68. Serreze M. C. i Barry R. G. (2011). Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change*, 77(1-2), 85-96.
 69. Sidorov A. (2014). "Statistika zabolevaniya beshenstvom v Sibiri i Dalnem Vostoke." *Zdravookhranenie Rossii*.
 70. Simon J. (2022). Estimating the extent and carbon content of submarine permafrost in the Arctic. *Nature Communications*, 13(1), 5500.
 71. Smith N. R. (2004). *Escherichia coli* in permafrost. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(5), 2595-2597.
 72. Soina V. S. i Tikhonovich I. A. (2004). The role of microbial dormancy in the survival of permafrost bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 96(5), 974-981.
 73. Stenseth N. C., Atshabar B. B., Begon M. (2008). Plague: past, present, and future. *PLoS Medicine*, 5(1), e3.
 74. Stroeve J., Markus T., Boisvert L. i Kouraev A. (2024). Trends in Arctic sea ice algae and implications for the marine ecosystem. *Nature Climate Change*, 14(1), 43-51.
 75. UNFCCC. (2015). Adoption of the Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. Dostupno na: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf> Pristupljeno: 16. srpnja 2024.
 76. Uzal F. A., Freedman J. C., Shrestha A. (2016). Towards an understanding of the role of *Clostridium perfringens* toxins in human and animal disease. *Future Microbiology*, 9(3), 361-377.
 77. Vishnivetskaya T. A., Lies D. P. i Tiedje J. M. (2007). *Exiguobacterium sibiricum*: A new member of the permafrost microbiome. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(12), 3845-3852.

78. Vishnivetskaya T. A., Petrova M. A. i Urbance J. (2000). Clostridia isolated from ancient permafrost: Identification and confirmation of their antiquity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(16), 8368-8373.
79. Walke J. B., Belden L. K., DiRenzo G. V., Harris R. N. i Roode J. C. (2018). Monitoring and Surveillance of Microorganisms in Permafrost: Establishing Effective Systems. *Environmental Microbiology*, 20(2), 485-496.
80. Walker D. A., Arnborg T. i Peirson D. (2006). Physiological adaptations of microorganisms to permafrost environments: Insights from environmental and laboratory studies. *Cold Regions Science and Technology*, 46(2-3), 149-162.
81. Wired (2023) Underwater permafrost is a big, gassy wild card for the climate. Dostupno na: <https://www.wired.com/story/underwater-permafrost-is-a-big-gassy-wild-card-for-the-climate/> Pristupljeno: 12. srpnja 2024.
82. World Health Organization (2017). Managing zoonotic public health risks at the human-animal-ecosystem interface. Dostupno na: <https://www.who.int/zoonoses/resources/managingzoonoticpublichealth/en/> Pristupljeno: 17. srpnja 2024.
83. World Health Organization. (2021). Tick-borne encephalitis. Dostupno na: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/tick-borne-encephalitis> Pristupljeno: 17. srpnja 2024.
84. Wu J., Liang W., Li J., Zhang H., Wang Y. i Yang Y. (2022). Diversity and functional potential of microbial communities in permafrost: Evidence from metagenomics and metatranscriptomics. *Nature Communications*, 13(1), 5748.
85. Wu R., Trubl G., Tas N. i Jansson J. K., 2022. Permafrost as a potential pathogen reservoir. *One Earth*, Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.03.010> Pristupljeno: 10. srpnja 2024.

Životopis

Kalista Mastella rođena je 23. rujna 2002. godine u Zagrebu. Završila je Osnovnu školu Dugave, nakon koje je 2017. godine upisala Prirodoslovnu školu Vladimira Preloga u Zagrebu, smjer Ekološki tehničar. Srednjoškolsko obrazovanje završila je 2021. godine te iste godine upisala Agronomski fakultet u Zagrebu, smjer Animalne znanosti.

Tijekom osnovne i srednje škole učila je engleski, njemački i talijanski jezik. Od sportskih aktivnosti, bavila se košarkom, plivanjem, jahanjem, streljaštvom i trenutno plesom, a u osnovnoj školi često je sudjelovala u natjecanjima iz šaha.