

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká Fakulta**  
**Ústav pro životní prostředí**

Studijní program: Ekologie a ochrana prostředí

Studijní obor: Ochrana životního prostředí



**Liudmila Severgina**

Tunguská událost a jí způsobené environmentální změny

The Tunguska Event and related environmental changes

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Daniel Vondrák, Ph.D.

Praha, 2024

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 31. 7. 2024

.....

podpis

## **Poděkování**

Ráda bych vyjádřila svou vděčnost RNDr. Danielu Vondrákovi, Ph.D. za jeho cenné vedení, podporu a odborné rady během vypracovávání této bakalářské práce. Jeho neocenitelná pomoc a trpělivost byly klíčové pro úspěšné dokončení této práce. Děkuji mu za jeho čas a ochotu sdílet své znalosti, které mi pomohly překonat různé výzvy.

## **Abstrakt**

30. června 1908 došlo na území Sibíře k tzv. tunguské události, při které bylo zničeno velké území tajgy. Pravděpodobnou příčinou byla exploze vesmírného tělesa v atmosféře Země. Postižené území je dosud předmětem aktivního zájmu vědeckých organizací a expedic a je chráněno jako rezervace. Většina dosavadních výzkumů byla dosud upřena ke studiu procesů, které katastrofu způsobily, avšak velmi malá pozornost byla věnována studiu následků tunguské události. Během proběhlých expedic bylo shromážděno obrovské množství vzorků ze zasaženého území, z jichž řada nyní umožňuje zkoumat poškození životního prostředí, ke kterému tehdy došlo. Cílem této bakalářské práce je shrnout formou literární rešerše současné poznání o environmentálních dopadech tunguské události. Tato událost je považována za modelový příklad středně velké impaktní události (tj. kolize Země s jiným vesmírným tělesem), který je pro jeho nedávnost možné a důležité studovat. Obdobné impaktní události mají odhadovanou periodicitu několik set roků a představují tak velmi nebezpečný druh přírodní katastrofy. K menším událostem tohoto typu dochází ještě častěji. Tato práce shrnuje poznatky o důsledcích tunguské události získané z dochovaných svědectví současníků a z novodobého studia přírodních archivů, jako jsou letokruhy, jezerní sedimenty a rašelina. Poškození životního prostředí v blízkosti epicentra tunguské události bylo důsledkem několika procesů, především rozsáhlých požárů a poškození vegetace tlakovou vlnou. Území bylo také vystaveno kyselým dešťům, zvýšené depozici dusíku a změnám vegetačního krytu. Tyto procesy vedly nejen ke změnám terestrických ekosystémů, ale také ekosystémů vodních.

**Klíčová slova:** impakt, tajga, disturbance, vodní ekosystémy, jezerní sedimenty, paleoekologie

## **Abstract**

On June 30, 1908, the Tunguska event occurred in Siberia, devastating a large area of taiga. The probable cause was an explosion of a celestial object in Earth's atmosphere. The affected area remains of active interest to scientific organizations and expeditions and is protected as a nature reserve. Most research has focused on the processes that caused the disaster, with much less attention given to its consequences. Numerous samples collected during various expeditions now allow for the study of environmental damage caused by the event. This thesis aims to summarize current knowledge on the environmental impacts of the Tunguska event through a literature review. This event is considered a model example of a medium-sized impact event (i.e., a (i.e. collision of the Earth with another space body), which can be studied, and which is important to study, due to its recent occurrence. Similar impact events are estimated to have a periodicity of several hundred years and represent a very dangerous type of natural disaster. Smaller events of this type occur even more frequently. This work summarizes findings from contemporary witnesses and modern studies of natural archives such as tree rings, lake sediments, and peat. Environmental damage near the Tunguska event's epicenter was due to several processes, primarily extensive fires and vegetation damage from the shockwave. The area was also subjected to acid rain, increased nitrogen deposition, and changes in vegetation cover. These processes led to changes not only in terrestrial ecosystems but also in aquatic ecosystems.

**Keywords:** impact, taiga, disturbances, aquatic ecosystems, lake sediments, paleoecology

## Obsah práce

1. Úvod.....	7
2. Impaktní události a jejich vliv na život na Zemi.....	8
3. Tunguská událost a její možné příčiny.....	13
4. Tunguská událost dle pozorování očitých svědků.....	16
5. Současná ochrana území epicentra tunguské události.....	18
5.1. Právní rámec ochrany území.....	18
5.2. Praktická opatření pro ochranu území.....	18
5.3. Perspektivy a směřování ochrany přírody v Tunguské státní přírodní rezervaci.....	20
6. Možnosti využití paleoekologických metod pro studium environmentálních změn vyvolaných tunguskou událostí.....	21
7. Disturbance tajgy a lesní požáry způsobené tunguskou událostí.....	23
8. Acidifikace a kontaminace prostředí dusíkem jako možné důsledky tunguské události.....	26
9. Přítomnost chemických anomálií a tavenin v oblasti epicentra tunguské události....	28
10. Dopady tunguské události na životní prostředí – syntéza.....	30
11. Závěry.....	32
12. Seznam citované literatury.....	33

## 1. Úvod

Tunguská událost, která se odehrála 30. června 1908 v odlehlé oblasti centrální Sibíře, představuje jednu z nejzáhadnějších a nejdiskutovanějších přírodních katastrof moderní historie (Vasilyev, 1998). Exploze, která byla pravděpodobně způsobena explozí kosmického tělesa, zdevastovala přibližně 2 150 kilometrů čtverečních boreálního lesa a způsobila silné seismické a atmosférické vlny, které byly zaznamenány po celém světě (Longo, 2007). Přes svou intenzitu a rozsah nebyly v epicentru exploze nalezeny žádné krátery ani zbytky impaktoru, což přispělo k mnoha teoriím a spekulacím o povaze této události (Rubtsov, 2009).

K tunguské události došlo konkrétně v oblasti řeky Podkamenná Tunguska. Tento jev byl natolik silný, že jej zaznamenaly seismické stanice po celém světě a způsobil světelné jevy viditelné až v Evropě a Severní Americe. Přesný původ tělesa, které explozi způsobilo, zůstává předmětem debat; nejčastěji se uvádí, že šlo o fragment komety nebo meteorit, který explodoval ve výšce několika kilometrů nad zemí. Ačkoli se tunguské události věnovalo již mnoho výzkumů, většina dosavadních studií byla zaměřena na objasnění jejích příčin. Environmentálním dopadům a následkům, které tato událost způsobila, byla věnována mnohem menší pozornost. Dosud provedené expedice a z nejméně zasaženého území shromážděné vzorky poskytují unikátní příležitost ke studiu této problematiky. Studium environmentálních dopadů tunguské události je důležité, jelikož nám poskytuje cenné informace o okamžitých a dlouhodobých ekologických změnách způsobených impaktními událostmi. Takové znalosti mohou být klíčové pro pochopení toho, jak podobné události mohly v minulosti ovlivnit Zemi, včetně hromadných vymírání a změn klimatu. Studium impaktních událostí je klíčové i pro přípravu na možné budoucí kolize s kosmickými tělesy, které představují vážné nebezpečí pro život na Zemi.

Cílem této bakalářské práce je shrnout poznatky o environmentálních změnách způsobených tunguskou událostí prostřednictvím literární rešerše. Využité literární prameny prezentují jednak pozorování očitých svědků a z nich odvozené interpretace a modely, jednak poznatky získané za využití paleoekologických metod. Tyto metody zahrnují výsledky analýz vzorků z rašelinišť, jezerních sedimentů a letokruhů stromů, jež slouží jako přírodní archivy uchovávající důležité informace o impaktu i jeho následcích. Zkoumání těchto přírodních archivů poskytuje hlubší vhled do rozsahu a povahy změn, které tunguská událost způsobila v místních ekosystémech a přispívá k lepšímu porozumění možných ekologických důsledků impaktních událostí.

## 2. Impaktní události a jejich vliv na život na Zemi

Impaktní události (impakty) jsou jevem, při kterém vesmírné těleso dopadá na povrch jiného vesmírného tělesa. V případě kolize Země s větším vesmírným tělesem je ovlivněna její atmosféra, litosféra i biosféra. V důsledku tak dochází k dramatickým změnám v životním prostředí. Pokud dojde k dopadu vesmírného tělesa do moře, může být vyvolána tsunami, tedy jedna či nejčastěji série po sobě jdoucích vln, jež jsou způsobeny náhlým přemístěním velkého množství vody na velké ploše (Gisler et al., 2011). Tsunami tak představuje globální a velmi nebezpečný jev, může vyvolat řadu sekundárních katastrof (Mader a Gittings, 2002). Zásadní vlastností impaktních těles je ve vztahu k potenciálnímu poškození životního prostředí na Zemi jejich velikost (Grieve, 1991). U kosmických těles velkých rozměrů, tedy s průměrem větším než jeden kilometr, je při srážce se Zemí předpokládána katastrofa globálních rozměrů (Chesley et al., 2002). Dosavadní geologické výzkumy potvrzují, že ke srážkám s velkými tělesy docházelo v průběhu celé historie naší planety. Jeden z velkých impaktů meteoritů před asi 250 miliony roků pravděpodobně způsobil jedno z masových vymírání živých organismů (Raup a Sepkoski, 1982). Podle dnes široce uznávané hypotézy Luise Alvareze způsobil jiný meteorit vyhnutí řady druhohorních plazů před asi 66 miliony roky a ukončil tak období druhohor (Alvarez et al., 1980).

V současné době se stále více pozornosti věnuje skutečnosti, že i malá vesmírná tělesa mohou pro lidskou společnost Zemi představovat vážné nebezpečí (Chesley et al., 2002). V případě jejich impaktu dochází k uvolňování silné tlakové vlny a zahřívání oblasti epicentra na vysokou teplotu, které mohou způsobit destrukci podobnou následkům atomového výbuchu. K uvědomění si významu tohoto jevu došlo právě poté, co v roce 1908 došlo v řídké obydlené oblasti Sibíře k tunguzské události (Boslough a Crawford, 2008). V roce 2013 dále došlo na Uralu k incidentu, kdy bylo tlakovou vlnou, způsobenou pádem meteoritu, zraněno více než tisíc osob (Popova et al., 2013). Mnohé budovy v tehdy nejbližší situovaném městě Čeljabinsku byly poškozeny, nejčastěji rozbitím skleněných výplní oken. Tyto události potvrzují naléhavou potřebu věnovat pozornost hrozbě, kterou pro naši planetu představují kolize s jinými vesmírnými tělesy (Brown et al., 2013).

Při srážce dvou pevných vesmírných těles, např. při dopadu dostatečně velkého vesmírného tělesa (např. meteoritu či úlomku komety) na zemskou pevninu, dochází ke vzniku impaktních kráterů (obr. 1). Nejvíce kráterů vzniklo na Zemi v období jejího dotváření, tedy před asi 4,5 miliardami let. Stopy těchto impaktů však během historie Země smazaly geologické procesy (French a Koeberl, 2010). Moderní výzkum pozemských impaktních kráterů začal již



v prvních dekádách 20. století, kdy byla pozornost upřena na nápadný kráter nalezený v Arizoně (angl. Meteor Crater či Barringer Crater), jež byl zprvu studován Danielem Barringerem. Ve 20. letech 20. století jiný americký geolog Walter Bacher studoval několik dalších impaktních kráterů ve Spojených státech a vyslovil alternativní teorii „pulzace Země“, podle níž tyto krátery vznikají v důsledku explozivních událostí, které nemají extraterestrické příčiny (Cowie, 1991). V roce 1936 geologové John Boone a Claude Albritton na Bacherův výzkum navázali a, podobně jako D. Barringer, dospěli k závěru, že některé krátery na Zemi mají impaktní původ. Teorie impaktního původu kráterů však zůstala hypotézou až do 60. let 20. století, kdy studie Eugena Shoemakera a dalších vědců teorii plně podpořily (Shoemaker, 1960). Příčinou širokého akceptování původní hypotézy byly nálezy impakty pozměněných hornin (impaktitů), jakým je například šokově přeměněný křemen (Stöffler a Langenhorst, 1994).

Studiu potenciálních impaktních těles a impaktů v minulosti je v současné době z výše uvedených důvodů věnována velká pozornost (Bottke et al., 2002). Úroveň pozornosti směřovaná k problematice detekce potenciálně nebezpečných asteroidů a komet se začala silně zvyšovat od počátku 90. let 20. století (Jedicke et al., 2003). Organizace jako OSN, Sněmovna lordů Spojeného království, Kongres USA a Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj na tento problém upozornily a uspořádaly kvůli němu speciální vědecké a technické konference. Byla přijata řada předpisů a rezolucí, včetně rezoluce č. 1080 „O detekci asteroidů a komet potenciálně nebezpečných pro lidstvo“, kterou přijalo Parlamentní shromáždění Rady Evropy v roce 1996.

Řada studií potvrzuje mimořádnou hojnost impaktních kráterů v celé Sluneční soustavě (Koeberl et al., 2013) což nepřímou dokládá, že i na Zemi musejí být velké impaktní události z pohledu geologického času poměrně běžné a časté. Parametry impaktních kráterů jsou dány mnoha faktory, přičemž nejvýznamnějším je energie impaktoru, která závisí na hmotnosti a rychlosti dopadajícího kosmického tělesa, dále hustota atmosféry, úhel dopadu a vlastnosti hornin materiálů, z nichž se impaktor a povrch většího tělesa skládají (Cowie, 1991). Co se úhlu dopadu týče, tangenciální impakty mají menší destruktivní sílu a jsou schopny vytvořit méně hluboké krátery, které mohou mít podlouhlý tvar připomínající brázdu. Příkladem takových kráterů je kráterové pole Rio Quarta v Argentině, které je staré jen asi 10 000 roků. V případě vertikální kolize vznikají krátery kruhovitěho tvaru, jejichž morfologie závisí na jejich průměru. Krátery o průměru 3–4 km mají jednoduchý miskovitý tvar se vzhůru vyvýšenými okraji v důsledku vyzdvižení podložních hornin. Pod nimi se nacházejí rozpučené původní horniny. Hloubka těchto kráterů odpovídá přibližně jedné třetině jejich průměru (0,33), což je odlišuje

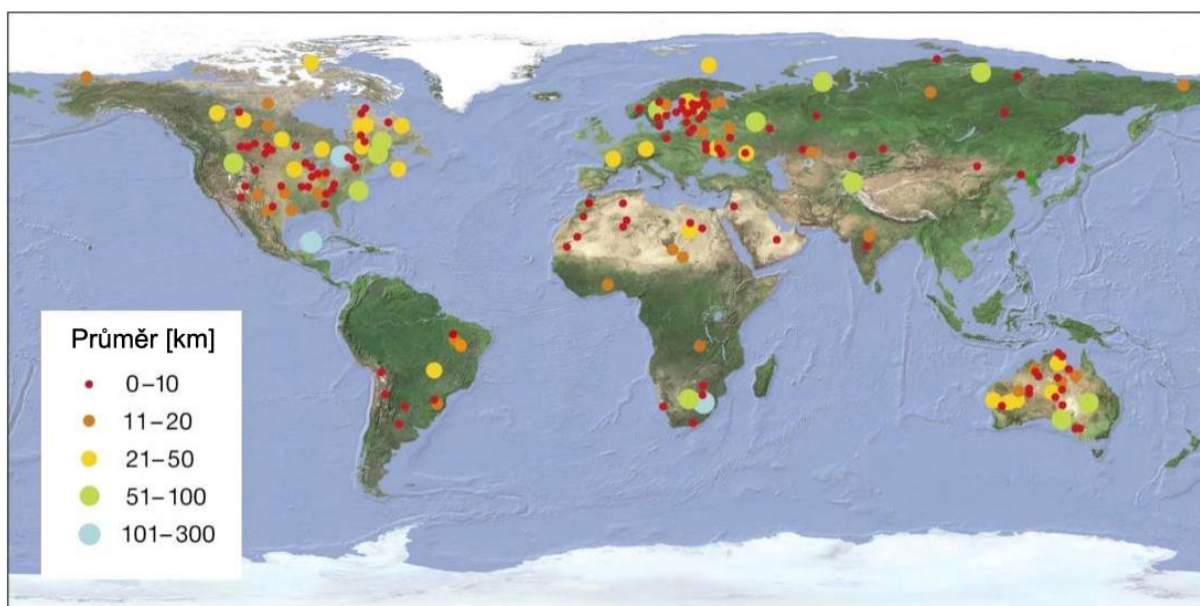
od podobných struktur vzniklých v důsledku vulkanické činnosti. Ty mají ještě strmější stěny, resp. poměr hloubky k průměru přibližně 0,4 (Chao et al., 1960). Se zvětšujícím se průměrem kráteru vzniká centrální malý kopec nad místem dopadu (Cowie, 1991).

V roce 1994 vypracovala Mezinárodní unie geologických věd mezinárodní klasifikaci impaktitů (impaktních hornin) na základě jejich složení, struktury a stupně impaktního metamorfismu. Podle této klasifikace se impaktity nalezené v impaktních kráterech dělí na tři hlavní skupiny (Coes, 1953). Do první skupiny patří impaktity, které jsou je slabě změněné šokovou vlnou a mají do značné míry zachované vlastnosti původních hornin (Grieve, 1991). Druhou skupinu tvoří taveninové impaktity vzniklé v důsledku ochlazení impaktní taveniny. Tyto horniny se vyznačují složením a strukturou odlišnou od původních hornin (Chao et al., 1960). Do třetí skupiny patří impaktní brekcie, což jsou klastické horniny vzniklé bez nebo s malým podílem impaktní taveniny. Tyto horniny se od ostatních skupin odlišují zvláštními vlastnostmi, zejména strukturními (Stöffler a Langenhorst, 1994).

Jednotlivé impakty mohou mít pro pozemský život dlouhodobé následky. Velké impakty mohou vést dokonce i k extinkčním událostem (Jansa et al., 1990; Grieve, 1991). Výše zmíněný impakt před 66 miliony roky, je dobře doložen díky přítomnosti na iridium bohaté vrstvy sedimentů oddělující období křídý od paleogénu (Alvarez et al., 1980; Gilmour a Boyd, 1988; Jansa et al., 1990). Přes jeho dramatický vliv na historii života na Zemi, byla obnova jím nejvíce zasažené oblasti, již byl impaktní kráter Chicxulub ležící v Mexickém zálivu, poměrně rychlá, jak dokládá rekolonizace mořskými organismy (Grieve, 1991). Vedle již rovněž zmíněného impaktu před 250 miliony roky (Raup a Sepkoski, 1982), bývá dále mezi impaktní událostí s velkým dopadem na život a životní prostředí zmiňována také impaktní událost Popigai. Kráter Popigai, nacházející se na Sibíři, je se svým průměrem přibližně 100 kilometrů jedním z největších známých impaktních kráterů na Zemi (Masaitis et al., 1994). Negativní vlivy na živé organismy, které mají všechny velké impakty, sumarizují na příkladu impaktní události na přelomu křídý a pelegénu Toon et al. (1997) (tabulka 1).

U středně velkých a malých impaktních událostí se vztah k vymírání druhů nepředpokládá, ale to neznamená, že nemohou velmi negativně ovlivnit konkrétní populace druhů a obecně životní prostředí. Destruktivní účinky byly doloženy i u několikametrových objektů a výrazně větší jsou předpokládány objektů s průměrem několika desítek metrů (Marks 2022). To platí i o impaktorech, které explodují již během svého průletu atmosférou (tzv. airburst) (Gladysheva 2019), impaktní kráter po sobě nezanechají a které jsou poměrně běžné (Firestone 2021). Impaktní událostí, která je klíčová pro detailnější poznání vlivu takového procesu na životní prostředí, je zejména tunguská událost. Důvodem je skutečnost, že se jedná

o nejmladší opravdu destruktivní impakt (a zároveň airburst), k němuž se navíc dochovala svědectví řady očitých svědků (Jenniskens et al. 2019).



**Obrázek 1:** Poloha a průměr asi 180 potvrzených impaktních struktur na Zemi (Reimold a Koeberl, 2014 na základě dat publikovaných Reimoldem a Jourdanem, 2012; převzato, upraveno a použito s dovolením vlastníka autorských práv, viz samostatná příloha této práce).

**Tabulka 1:** Impaktem spuštěné procesy, které pravděpodobně vedly k vymírání na hranici křída-paleogén před 66 miliony roky dle Toon et al. (1997, upraveno).

<b>Environmentální proces</b>	<b>Následky</b>	<b>Doba trvání</b>	<b>Geografické měřítko</b>
přísun prachu a aerosolů do atmosféry	ochlazení klimatu	roky	globální
	zastavení fotosyntézy	měsíce	globální
	ztráta možnosti využití zraku u živočichů	měsíce	globální
požáry	hoření	měsíce	globální
	ochlazení v důsledku přísunu uhlíkatých částic do atmosfér	měsíce	globální
	pyrotoxiny	měsíce	globální
	kyselá dešť	měsíce	globální
generování oxidů dusíku	úbytek ozonu ve stratosféře	roky	globální
	kyselá dešť	měsíce	regionální (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )
	ochlazení klimatu	roky	globální
rázová vlna	silný vítr	krátkodobá bezprostředně po impaktu	regionální (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )
zemětřesení	otřesy na povrchu	krátkodobá bezprostředně po impaktu	regionální (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )
tsunami	zatopení a destrukce na souši	krátkodobá bezprostředně po impaktu	regionální (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )
těžké kovy	otravy	roky	globální
uvolnění vodní páry a CO <sub>2</sub> do atmosféry	oteplení klimatu	desetiletí	globální
uvolnění SO <sub>2</sub> do atmosféry	ochlazení klimatu	roky	globální
	kyselá dešť	roky	globální

### 3. Tunguská událost a její možné příčiny

Tunguská událost je jev, ke kterému došlo ráno (7:15 ráno místního času) 30. června 1908 na jihovýchodě Krasnojarského kraje v dnešní Ruské federaci (60.874° N, 101.875° E) v neobydlené oblasti tajgy podél řeky Podkamenná Tunguska (rusky Подкаменная Тунгуска). Ve výšce 5–10 km nad povrchem tehdy došlo k explozi a následné destrukci velmi rozsáhlého území. Síla výbuchu je odhadována na 10 až 40 megatun trinitrotoluenu (TNT), což je zhruba 2000krát více než u atomové bomby, která byla svržena na japonskou Hirošimu v roce 1945 (15 kilotun TNT). Různí badatelé zkoumali příčiny této události, ale v této otázce stále nepanuje shoda (Toon et al., 1997; Vasilyev, 2013). Přesto existuje dochována řada svědectví svědků, kteří tunguskou událost zažili.

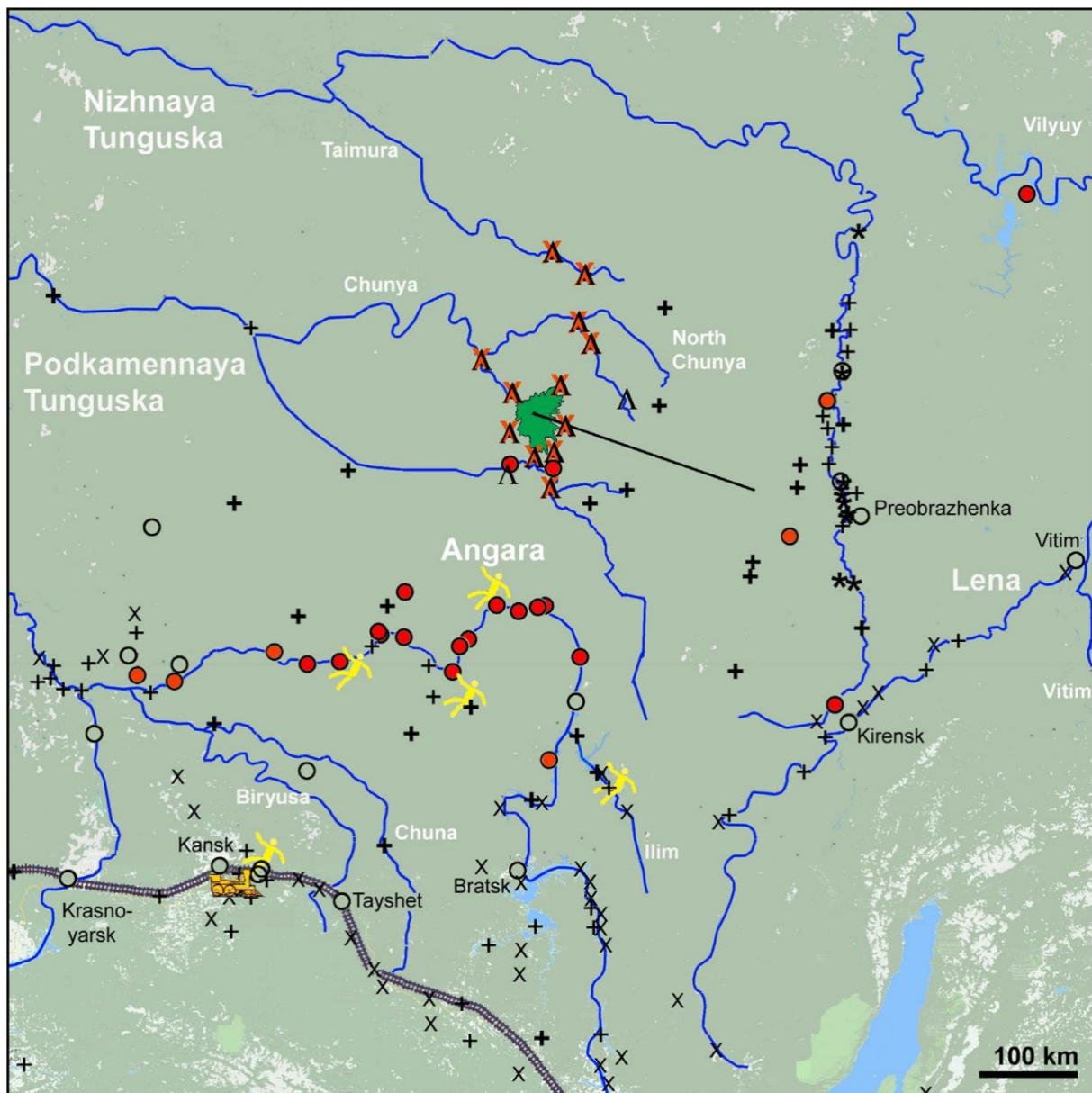
V ranních hodinách onoho dne byl v jižní části centrální Sibíře zaznamenán neobvyklý astronomický jev, který přitáhl pozornost tisíců svědků. Po obloze se přehnal obrovské jasně zářící těleso. Svědci popisovali úkaz různě: někteří viděli zářící koule, jiní svazek ohně. Takové ohnivě těleso se pohybovalo po obloze a zanechávalo za sebou světelnou stopu. Hlasité zvukové výbuchy doprovázející tento jev, které opět slyšely tisíce svědků v okruhu mnoha stovek kilometrů, vyvolaly na některých místech poplach a paniku (Longo, 2007).

Obyvatelé žijící v oblasti epicentra tunguské události pak byli svědky oslnivého úkazu, většinou v severní části oblohy. Měl tvar koule, která se později změnila v jasný ohnivý sloup. Bezprostředně po tomto světelném úkazu se zdejší země začala silně třást, což doprovázela řada dunivých zvuků, které se několikrát ozvaly jako hrom. Tyto projevy byly velmi intenzivní a zvuk výbuchu se nesl do velké vzdálenosti, a to až 1200 kilometrů od epicentra. Událost byla také doprovázena mohutnou rázovou vlnou, která vyvrátila většinu dospělých stromů na ploše přes 2000 km<sup>2</sup>. K otřesům půdy, rozbití okenních skel a pádu osob docházelo i na místech vzdálených 600 km (Vasilyev, 2013; Jenniskens et al., 2019; obr. 2). Otřesy a jevy spojené s rázovou vlnou byly zaznamenány seismografickými přístroji v řadě ruských měst, ale i mimo Rusko (např. v Tbilisi v dnešní Gruzii, Jeně a Postupimi v Německu, Kodani v Dánsku, Londýně ve Spojeném království, Washingtonu v USA či v Jakartě v Indonésii) (Vasilyev, 2013). Na některých místech byla rázová vlna detekována dokonce dvakrát, jelikož oběhla naši planetu. Přibližně do čtyř hodin po výbuchu došlo k narušení magnetického pole Země. V noci z 30. června na 1. července byla obloha nad západní Sibíří, střední Asií, evropským Ruskem a západní Evropou neobvykle jasná a ve výšce asi 80 kilometrů byly mnoha svědky pozorovány světélkující mraky. Různé další světelné jevy v atmosféře byly pozorovány až do konce

července 1908. Zaznamenán byl i prudký úbytek ozonu v zemské atmosféře a výrazná destrukce ozonové vrstvy ve středních zeměpisných šířkách severní polokoule (Vasiljev, 2013).

K rozsáhlé destrukci tajgy došlo i díky masivním požárům, které bezprostředně následovaly po pozorování jasného světelného záblesku a uvolnění žhavých plynů. Plameny pokryly značnou plochu v okruhu několika desítek kilometrů od středu epicentra (Longo, 2007) (více viz kap. 7). Zraněn byl zjevně velký počet osob (přesný počet není znám), ale oběti byly pouze tři, což bylo důsledkem velkou odlehlostí epicentra od stálých lidských sídel (Jenniskens et al., 2019) (detaily viz kap. 4). Došlo nicméně k hromadným úhynům místními obyvateli (Evenky) chovaných sobů (Jenniskens et al., 2019). Pro srovnání lze uvést, že při výbuchu relativně malého meteoritu nad Čeljabinskem v Rusku 15. února 2013 bylo zraněno přibližně 1 500 lidí (oběť nebyla žádná), přestože i v tomto případě byla zasažena relativně málo obydlená oblast. Zranění byla v případě čeljabinského meteoritu nejčastěji způsobena sklem rozbitým rázovou (tlakovou) vlnou (Brown et al., 2013; Jenniskens et al., 2019). Pokud by se tedy tunguská událost odehrála v oblasti s velkou hustotou osídlení, byly by ztráty na životech obyvatel zjevně vysoké.

Ohledně příčin tunguské události existuje řada hypotéz, ať už vědeckých či spíše z oboru science fiction (Zotkin, 1970; Artemieva a Shuvalov, 2016). Jelikož dané téma není hlavním předmětem této bakalářské práce, jsou zde zmíněny jen dvě hypotézy, jež byly nejčastěji zmiňovány v odborné literatuře z posledních let, a to impaktní událost (resp. airburst) vyvolaná meteoritem a impaktní událost (resp. airburst) vyvolaná úlomkem komety (např. Gladysheva et al., 2020; Khrennikov et al., 2020). V současné době je dále uvažováno, že explozi v atmosféře způsobilo hned několik velkých fragmentů nějakého kosmického tělesa (Gladysheva et al., 2020), což má podporu i v některých pozorováních svědků události (Vasiliev, 1976). Skutečnost, že žádný z těchto velkých fragmentů pravděpodobně nedopadl na až zem, ilustruje skutečnost, že nebyl nikým doložen jednoznačný nález impaktního kráteru (např. Vasiliev, 2004; Rogozin et al., 2017; Kavková et al., 2022). Airbursty podobného rozsahu jako tunguská událost pravděpodobně nejsou v historii lidstva ojedinělé. Dokládají to třeba nedávné poznatky o přírodních katastrofách, které se odehrály před asi 1 700 (Tankersley et al., 2024) a 3 600 roky (Bunch et al., 2021).



**Obrázek 2:** Mapa lokací, ze kterých pocházejí dochované zprávy očitých svědků o tunguské události, kde každý symbol představuje jednu nebo více výpovědí (Jenniskens et al., 2019; převzato a použito s dovolením vlastníka autorských práv, viz samostatná příloha práce). Legenda: červené kolečko – poškození okenních skel, černé kolečko bez výplně – otřesy okenních skel bez jejich poškození,  $\Delta$  – zničení evenských stanů (=čumů), oranžové X – vnímání vysoké teploty a upadnutí do bezvědomí, symbol osoby – zprávy o pádu lidí. Pozice očitých svědků tunguské události vycházejí z prací Vozněsenského (1925) (černé X), Krinova (1966) (+), Konenkina (1967) (\*) a Vasiljeva et al. (1981) (+).

#### 4. Tunguská událost podle očitých svědků

S ohledem na velký rozsah tunguské události a relativně nedávné době, kdy k ní došlo, se dochovala řada svědectví obyvatel střední Sibíře. Šlo o různé osoby, např. dělníky zapojené do prací na nalezištích zlata v severovýchodní části Jenisejska, místní rybáře a rolníky či domorodé Evenky, kteří se v nejvíce postižené oblasti věnovali lovu a chovu sobů. Část svědectví byla zaznamenáno krátce po katastrofě, zejména v místních novinách, řada jiných však byla zapsána až s větším časovým odstupem. Jejich význam spočívá i v tom, že první přírodovědné výzkumy v oblasti epicentra byly vzhledem k logistickým a politickým důvodům provedeny až v druhé polovině 20. let 20. století, tedy s časovým odstupem asi dvou dekád. Pro účely této práce bylo vybráno jen několik pozorování, která jsou zajímavá v kontextu enviromentálních dopadů události.

Jedno ze zajímavých svědectví na tunguskou událost přináší výpověď Evenka Ilji Potapoviče (Ljuchetkana). Popisuje, že v čumu (stanu), kde žili tři Evenkové, došlo k náhlému otřesu, který mezi přítomnými vyvolal paniku a křik. Tito Evenkové vylezli ze spacáků a postavili se na nohy, avšak nestačili udělat ani krok, jelikož čum se opět otrásl a všichni padli na zem. Najednou se objevilo jasné světlo (objevila oslnivá světelná skvrna jako druhé slunce a působila bolest v očích) a foukal silný vítr. Mnoho stromů přišlo o větve a listy a mnoho pokácených stromů najednou leželo na zemi. Na zemi dále hořelo suché dřevo, větve a na kožešinách Evenků byla spálená srst a kůže (Vasiliev, 1976). Oheň, který předtím zuřil, postupně ustupoval a na mnoha místech zůstalo jen několik ohnisek. Průstup krajinou blokovaly popadané a nakloněné stromy. Mnohé z nich byly ohořelé a na pozorovali též doutnající mech a rašelinu (Vasiliev, 1976). I další očitá svědectví shodně popisují vlnu žáru a následné požáry, obojí ke zraněním v podobě popálenin. Tyto požáry pak byly pozorovatelné ze vzdálenosti mnoha kilometrů (Jenniskens et al., 2019).

Některá svědectví popisovala v souvislosti s tunguskou událostí více hromových úderů (i více než tři) v různých časových odstupech, z nichž část byla některými autory interpretována jako ozvěna (Vasiliev, 1976, 2004). Na základě rozboru mnohých svědectví očitých svědků zkoumal jako první profesionální badatel oblast epicentra události Leonid Alexejevič Kulik, avšak až ve 20. letech 20. století. Existence impaktních kráterů vyplněných jezery se však nikdy nepotvrdila (Rogozin et al., 2017; Kavková et al., 2022).

Zajímavým fenoménem udávaným v souvislosti s tunguskou událostí, je rychlé zotavování vegetace v epicentru. Předpokládá se, že bylo podpořeno zvýšenou dostupností živin. Podle těchto představ se díky této události uvolnilo do půdy velké množství živin, které



pocházely z popela, rozpadlých kmenů stromů a dalších zbytků vegetace. Rychlá kolonizace některými druhy mohla být podpořena i sníženou mírou kompetice. Očitá svědectví i analýzy letokruhů a půdních vzorků ukazují, že růst nové vegetace byl mimořádně rychlý a byliny měly neobvykle velkou biomasu (Edwards, 2014). Zotavování ekosystémů po tunguské události je tak i fascinujícím příkladem přirozené obnovy přírody po velké ekologické disturbanci. Uvolnění živin do vývraty stromů a ohněm poškozené půdy vedlo k rychlému růstu nové vegetace. Tento proces ukazuje na obdivuhodnou schopnost přírody obnovovat se i po výrazných narušeních.

## **5. Současná ochrana území epicentra Tunguské události**

Tunguská událost přilákala pozornost vědců a badatelů z celého světa nejen kvůli svému záhadnému původu, ale také kvůli svým dramatickým důsledkům pro místní ekosystém (Krinov, 1949; Longo, 1990). Oblast epicentra je proto nyní předmětem různých ochranných opatření (Rubtsov, 2009). Tato kapitola je věnována problematice současné ochrany území epicentra události, přičemž představuje její právní rámec, praktická opatření a aktuální výzvy.

Jedním z hlavních problémů ochrany přírody v blízkosti epicentra tunguské události je doposud obnova vegetace a ekosystémů (Zolotov, 1995). Území, které bylo přírodní katastrofou poškozeno, se totiž ani po více než století ještě plně nezotavilo do původního stavu (Andreev et al., 2010). Současná ochranná opatření zaměřena i na zachování autenticity a neporušenosti tohoto historicky důležitého místa (Vereshchagin, 1992).

### **5.1. Právní rámec ochrany území**

Oblast epicentra tunguské události je chráněna na základě několika právních předpisů, které byly přijaty s cílem zachovat její ekologickou a historickou hodnotu. Hlavním právním dokumentem je rozhodnutí vlády Ruské federace z roku 1995, kterým byla zřízena Tunguská státní přírodní rezervace (Rozhodnutí vlády RF, 1995). Tato rezervace se rozkládá na ploše 2 960 km<sup>2</sup> a zahrnuje nejen samotné epicentrum (resp. oblast vyvrácených stromů), ale i okolní území, které bylo také zasaženo explozí. Podle zákona o ochraně přírody Ruské federace mají státní přírodní rezervace status zvláště chráněných území (Zákon o ochraně přírody RF, 1991). To znamená, že jakékoliv hospodářské činnosti, které by mohly negativně ovlivnit ekologickou rovnováhu, jsou v těchto oblastech přísně zakázány. Toto ustanovení zahrnuje těžbu dřeva, těžbu nerostných surovin, výstavbu infrastrukturních projektů a další podobné aktivity.

### **5.2 Praktická opatření pro ochranu území**

Jedním z hlavních aspektů ochrany území je pravidelný monitoring a vědecký výzkum. Tunguská státní přírodní rezervace (rusky Тунгусский заповедник) spolupracuje s různými vědeckými institucemi, které provádějí dlouhodobé studie zaměřené i na pochopení ekologických dopadů tunguské události. Vědci sledují změny v biodiverzitě, dynamice lesních porostů, hydrologických podmínkách a dalších klíčových parametrech. Například výzkumy zaměřené na analýzu letokruhů stromů (dendrochronologie) poskytují cenné informace o vlivu události na růst a regeneraci lesů. Zotavení lesa po velkých disturbancích totiž mohou trvat i déle než jedno století, což je dáno třeba eliminací vzrostlých stromů, poškozením půdy,

změnami mikroklimatu a narušením předchozích ekosystémových rovnováh (Fritts 1976). Vedle letokruhů jsou analyzovány sedimenty z rašelinišť a jezer, které poskytují informace o dlouhodobých změnách v životním prostředí (Battarbee, 2000; více viz kap. 6).

Za jedno z největších rizik pro oblast epicentra jsou považovány lesní požáry. Tunguská událost sama o sobě vyvolala rozsáhlé požáry, které zničily velké plochy lesa, přesto i dnes zůstává území dál náchylné k požárům, a to zejména v suchých letních měsících. S ohledem na to byla zavedena řada preventivních opatření, která zahrnují pravidelný monitoring pomocí satelitních snímků, instalaci pozorovacích věží a vyškolení speciálních hasičských jednotek, které jsou připraveny v případě požáru zasáhnout (Shishkin, 2007).

Důležitou součástí ochranných opatření je také vzdělávání veřejnosti a zvyšování povědomí o významu ochrany této oblasti. Tunguská státní přírodní rezervace pořádá různé vzdělávací programy, semináře a výstavy, které informují veřejnost o historii tunguské události, jejích ekologických důsledcích a potřebě ochrany přírody. Tyto aktivity pomáhají zvýšit povědomí a podporu veřejnosti pro ochranu této oblasti (webová stránka Tunguské státní přírodní rezervace).

Jednou z hlavních výzev, kterým dnes území rezervace a jeho ochrana čelí, jsou klimatické změny. Zvyšující se teploty a změny v srážkových vzorcích mohou mít významný dopad na zdejší ekosystémy. Oteplování urychluje tání permafrostu, což může vést k uvolňování skleníkových plynů a dalšímu zhoršení klimatických podmínek. Degradace permafrostu a oteplování klimatu dále vede ke změnám hydrologických podmínkách, jež mají negativní dopady na rašeliniště a další mokřadní ekosystémy, které jsou klíčové pro udržení ekologické rovnováhy (Grosse et al., 2016; Chadburn et al., 2017). Ochrana území Tunguské události vyžaduje integrovaný přístup, který zohledňuje vlivy změny klimatu a degradace permafrostu na místní ekosystémy. Např. Woo et al. (2016) ukazují monitoring permafrostu jako jeden z hlavních kroků současného výzkumu dopadu klimatických změn. Ten může využívat techniky jako je dálkový průzkum Země, různá geofyzikální měření, a hydrologická měření.

I když je oblast chráněna před většinou hospodářských činností, stále čelí mnoha antropogenním tlakům. Nelegální těžba dřeva, pytláctví a turistika mohou mít negativní dopad na místní ekosystémy. Proto je nezbytné neustále monitorovat a regulovat tyto aktivity, aby byla zajištěna dlouhodobá ochrana oblasti. Správa Tunguské státní přírodní rezervace se proto zaměřuje na monitorování a ochranu flóry a fauny i v kontextu antropogenních vlivů. V důsledku toho jsou omezovány turistické aktivity, výzkumná činnost je regulována a pro běžnou stavební činnost platí zákaz (Jenniskens et al., 2019).

### 5.3 Perspektivy a směřování ochrany přírody v Tunguské státní přírodní rezervaci

Navzdory mnoha výzvám existují pozitivní perspektivy pro ochranu území epicentra Tunguské události. Pokračující vědecký výzkum a technologický pokrok např. nabízejí nové možnosti pro efektivního monitorování za využití dronů a dálkového průzkumu Země. Tyto moderní přístupy mohou výrazně zlepšit schopnost sledovat ekologické změny a identifikovat potenciální hrozby (Jensen, 2007). Dále je důležité pokračovat v mezinárodní spolupráci a výměně informací mezi vědeckými institucemi, ochranářskými organizacemi a vládními agenturami. Společné projekty a výzkumné iniciativy mohou přinést nové poznatky a zdroje pro ochranu této unikátní oblasti (Smith et al., 2019).

Ochrana území epicentra Tunguské události je nejen důležitá z hlediska zachování jeho ekologické a historické hodnoty, ale také poskytuje příležitost pro vědecký výzkum a získání nových cenných poznatků. Udržení tohoto území jako modelového příkladu pro studium ekologických dopadů katastrofických událostí a následného zotavování může přispět k lepšímu porozumění a ochraně podobných ekosystémů po celém světě (Peterson, 2012). Současná ochrana území epicentra tunguské události proto staví na komplexním přístupu, který kombinuje právní ochranu, praktická opatření, výzkum a vzdělávání. Společným úsilím vědců, ochranářů a veřejnosti může být zajištěna dlouhodobá ochrana a zachování tohoto cenného území pro budoucí generace (Williams et al., 2021).

Navzdory těmto skutečnostem je zřejmé, že máme jen velmi limitovanou představu o tom, čím vším je území Tunguské státní přírodní rezervace díky katastrofě v roce 1908 výjimečné. Environmentální dopady impaktem způsobené exploze byly zřejmě daleko komplexnější než jen všeobecně dobře známá disturbance lesního ekosystému. Jelikož se o řadě možných aspektů těchto dopadů nedozvídáme z výpovědí očitých svědků, ani z nejstarších výzkumů, které měly od tunguské události ještě relativně malý časový odstup, je třeba studovat přírodní archivy (viz kap. 6), které mají potenciál naše poznání v daném ohledu doplnit.

## **6. Možnosti využití paleoekologických metod pro studium environmentálních změn vyvolaných tunguskou událostí**

Paleoekologické metody jsou techniky určené pro studium minulých ekosystémů a změn v životním prostředí v minulosti založené na analýzách přírodních archivů. Těmito přírodními archivy jsou nejčastěji různé sedimentární záznamy obsahující fosilní či subfosilní zbytky organismů. V kontextu ochrany přírody a životního jsou využívány např. ke studiu klimatických změn, disturbancí ekosystémů, změn diverzity či historie chráněných území. Tyto metody jsou klíčové i pro studium změn způsobených tunguskou událostí, resp. historie nynější Tunguské státní přírodní rezervace. V prostředí tajgy se pro účely studia environmentálních změn v posledních dvou staletích nabízejí především přírodní archivy představované letokruhy stromů, rašeliníšti a jezerními sedimenty (Berglund 1986).

Analýza letokruhů stromů (dendrochronologie) umožňuje studium růstu stromů rok po roce. Letokruhy mohou odrážet různé environmentální stresy, včetně teplotních výkyvů, změn v dostupnosti vody a dalších stresových faktorů (Fritts, 1976). Stromy, které přežily tunguskou událost, mohou vykazovat abnormální letokruhy pro roky bezprostředně následující po explozi, což může naznačovat šokové podmínky a následnou obnovu (Shishkin, 2007). Zkoumání šířky letokruhů, jejich hustoty a chemického složení může poskytnout podrobné informace o tom, jaký vliv měla událost na lokální vegetaci. Například snížená šířka letokruhů může naznačovat stresové podmínky způsobené poškozením nebo změnou klimatu (Rudenko, 2010). Analýza chemického složení letokruhů může také odhalit přítomnost specifických prvků souvisejících s událostí, jako jsou těžké kovy (Fritts, 1976).

Historie změn vegetačního krytu, tedy včetně bylin a dalších rostlin, je obvykle studována prostřednictvím rašelin a jezerních sedimentů, kterých se většinou velmi dobře zachovávají pylová zrna, větší zbytky (makrozbytky) rostlin, fytolity a uhlíky (Battarbee, 2000; Smol et al., 2001; Mackay et al., 2011). Oba typy přírodních archivů akumulují v čase materiál, který nese informace o době svého uložení. V kontextu tunguské události mohou rašeliníště a jezerní sedimenty obsahovat vrstvy popela, sazí a jiných částic, které byly vymrštěny do atmosféry při explozi a následně deponovány (Vasiliev et al., 1999). Tyto vrstvy lze analyzovat pomocí různých metod, mezi něž patří třeba mikroskopické, chemické či izotopové analýzy, které mohou poskytovat informace o složení a původu zkoumaných objektů (Mackay et al., 2011). Přítomnost specifických prvků, jako jsou těžké kovy nebo izotopy, může ukázat na intenzitu a dosah výbuchu, stejně jako na jeho vliv na místní ekosystémy. Například zvýšené koncentrace platiny a iridia mohou naznačovat mimozemský původ materiálu (Rudenko, 2010).

Jezerní sedimenty někdy poskytují velmi podrobné a komplexní přírodní archivy, jelikož jsou obvykle jemnozrné a ukládají se kontinuálně.

Pokud jsou výše uvedené metody zkombinována s metodami datovacími (radiouhlíkové datování a zejména datování pomocí  $^{210}\text{Pb}$  a  $^{137}\text{Cs}$ ) lze doložit i procesy jako změny rychlosti depozice materiálu či odhalit indikátory, které poukazují na vysokou teplotu a tlak, např. v důsledku impaktu (Vasiliev et al., 1999; Last a Smol, 2001). Analýza vrstev rašeliny a jezerních sedimentů může také poskytnout důležité informace o zdrojích uložených částic. Užitečná je např. analýza mikroskopických uhlíků, jež indikují požárovou dynamiku, a to dlouhodobou či spojenou s nějakou konkrétní událostí (Mackay et al., 2011).

Lze rovněž provádět studie různých geologických akumulací (sedimentů), tedy nejen jezerních sedimentů, ale i sedimentů říčních, půd apod., které mohou teoreticky obsahovat stopy po tunguské události. Krom chemických signálů může jít třeba o přítomnost různých impaktních tavenin. Takové analýzy nám mohou pomoci odhalit řadu detailů o tehdejší katastrofě a jejich následcích (Gasparini, 2014).

Častým předmětem studia bývají vrchoviště. Tento typ rašelinišť má vypouklý tvar a mocnost rašeliny běžně dosahuje 2–3 metry, ale může dosahovat až 6–10 metrů. Vrchoviště se vyskytují ve všech severních oblastech evropské a asijské části Ruské federace a typická jsou např. pro lesní zónu Západosibiřské nížiny. Na střední a východní Sibíři zaujímají spíše menší plochy, ale i taj jsou početná (Muldiyarov a Lapshina, 1983; Lapshina a Blykhorchuk, 1986). Každý typ přírodního archivu uchovává trochu jiné informace, takže jen výzkum více těchto typů může poskytnout opravdu komplexní obraz o dopadech tunguské události na životní prostředí (Rudenko, 2010). Studium těchto archivů umožňuje také porovnání s jinými podobnými událostmi a poskytuje důležité údaje pro predikci budoucích dopadů podobných katastrofických událostí v budoucnosti (Gasparini, 2014).

## 7. Disturbance tajgy a lesní požáry způsobené tunguskou událostí

Hlavními environmentálními důsledky tunguzské události bylo vyvrácení vzrostlých stromů v tajze rázovou (tlakovou) vlnou a bezprostřední vznik lesních požárů (Vasilyev, 2013). Vyvrácené či zlomené kmeny byly orientovány směrem od epicentra. Rázová vlna doprovázená silným výbuchem tak zároveň disturbovala lesní půdy a vedla k jejich erozi (Vasilyev, 1998).

Požáry všech vegetačních pater a svrchní organické vrstvy půdy zasáhly plochu přibližně 2000 km<sup>2</sup> (Vasilyev, 2013). Později se v oblasti vyvrácených stromů objevila nová ohniska požáru, zatímco ve stojící části lesa (stromy v úplném epicentru totiž zůstaly stát, měly však poškozené větve; Nesvetaljo, 1998) nebyla pozorována žádná ohniska požáru. Odhadovaná plocha tajgy ovlivněné oběma disturbancemi je pak odhadována na 2150 km<sup>2</sup> (Vasilyev, 2013). Hranice požáru byly určeny V. G. Berežným a G. I. Drapkinem během expedice v roce 1961 a na většině míst odpovídaly hranici hromadného pádu stromů. Oblast poškozená tlakovou vlnou měla nekruhový tvar, který je připodobňován k tvaru motýla s osou symetrie orientovanou západním nebo jihozápadním směrem (obr. 3). Požár vznikl současně na více místech. Suché počasí, které katastrofě předcházelo, napomohlo poměrně rovnoměrnému hoření lesa a také šíření ohně (Vasilyev, 2013).

Studii stromů, které katastrofu přežily, provedli mezi prvními L. A. Kulik, A. G. Iljin, V. A. Vorobjov, B. L. Škuta (Berežný a Drapkina, 1964). Bylo zjištěno, že mimo střed epicentra šlo většinou o mladé stromy, které se při rázové vlně mohly ohnout, aniž se vyvrátily či zlomily (Tsynbal a Schnittke, 1988). Větve těchto mladých stromů obvykle nebyly tlakovou vlnou poškozeny, kdežto velká plocha větví (včetně jehlic či listů) u starších stromů se spolupodílela na jejich zlomení či vyvrácení. Zdá se, že rázová vlna do značné míry prvotní požár tajgy limitovala a vedla k tomu, že zasažené území nebylo hořením postiženo rovnoměrně. Dalším charakteristickým rysem byl tvar vyhořelého lesa, který byl interpretován tak, že k uvolnění energie (výbuchu) došlo opakovaně, což potvrzují i výpovědi očitých svědků (Kurbatsky, 1975).

Značná pozornost byla od prvních výzkumů epicentra tunguské události věnována měření azimutů padlých stromů s cílem určit směr pohybu a sílu rázových vln (Nekrasov a Emeljanov, 1963). Opakovaně byla doložena orientace padlých kmenů směrem od epicentra a asymetrický tvar zasaženého území. Území nejvíce postižené požáry mělo ještě méně pravidelný tvar a nacházelo uvnitř území s padlými kmeny. Oblast v okruhu asi 5 až 10 km od středu epicentra byla navíc neobvykle rychlým zotavováním vegetačního krytu (Berežný a Drapkina, 1964; Vasilyev, 1998).

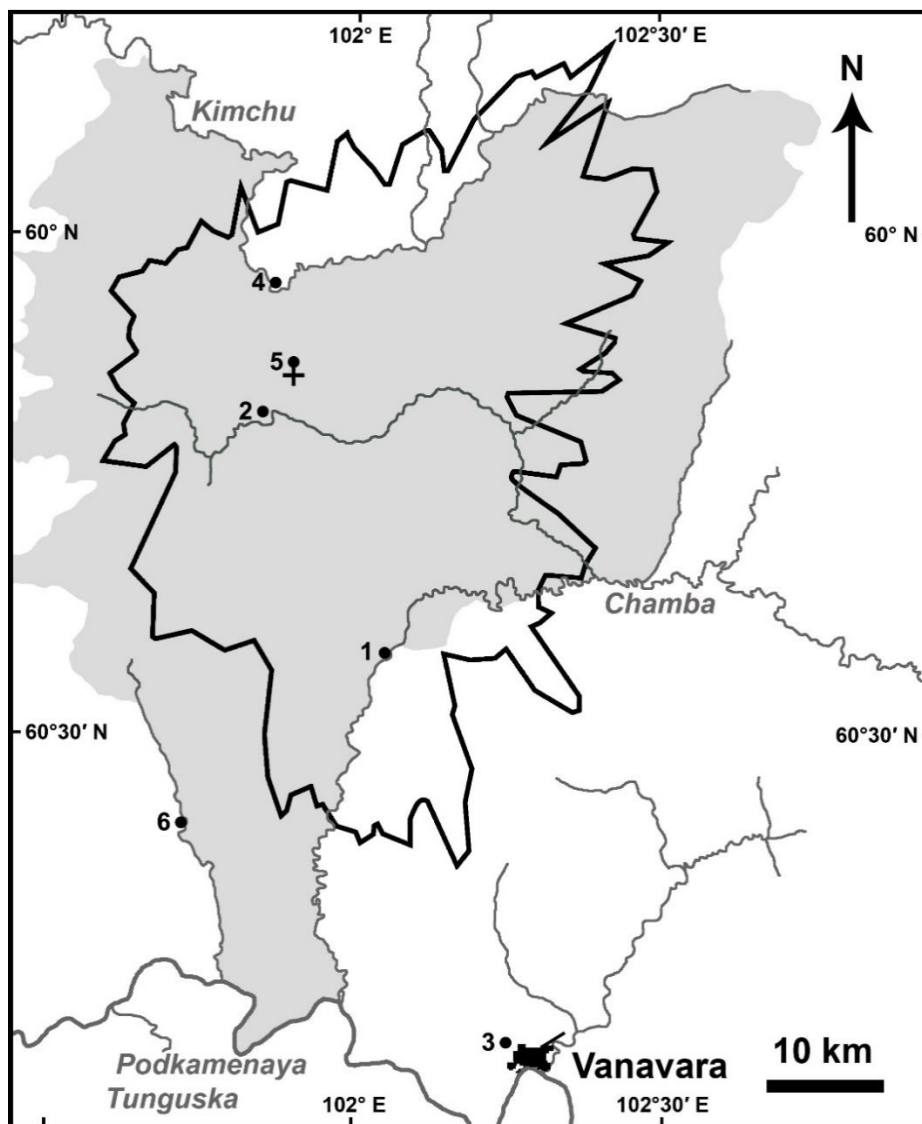
Jednou z hypotéz vysvětlujících neobvykle intenzivní růst vegetace během zotavování území blízkého středu epicentra je pozitivní vliv požárů (akumulace uhlíků do půdy) a přítomnosti mrtvého dřeva, které změnilo vlastnosti povrchové vrstvy půd a mikroklima (Vasilyev, 1998; Thompson, 2020). Spolupodílet se mohla i snížená kompetice mezi jedinci (Fantucci et al., 2015). Alternativní hypotéza staví na tom, že toto území neodpovídá rozsahem tomu, jež bylo požárem zasaženo (je nápadně menší a má jiný tvar), a obnova tajgy byla v některých ohledech mnohem rychlejší než po běžném požáru. Z toho důvodu předpokládá, že růst vegetace byl podpořen látkami uvolněnými při explozi impaktoru (Kirova a Zaslavskaja, 1966; Vasilyev, 1998). Podpurný účinek pak mohly mít do půdy explozí rozptýlené stopové prvky (jmenovitě jsou uváděny prvky vzácných zemin a dusík), které mohou působit jako hnojivo či stimulanty růstu (Vasiliev et al., 1980; Vasiliev 1998). Nadprůměrný růst byl pozorován nejen u jehličnanů, ale u listnatých stromů, bylin a mechů. Jehličnaté stromy se zotavovaly s mírným zpožděním oproti listnatým. Mladé modřiny vyrostlé v okolí středu epicentra již ve věku 45 roků dohnaly velikostí staré stromy o věku 250–300 roků (Berežný a Drapkina, 1964). Zvažován byl i vliv ozáření vegetace a půdy na růst rostlin v době zotavování (Vasiliev et al., 1980).

Vegetační změny v důsledku tunguské události dokládají i palynologické studie (např. Tositti et al., 2006). Na zotavování vegetačního krytu se pravděpodobně z velké části podílela semena, která přežila v půdě (Berežný a Drapkina, 1964; Sharma, 2017; Thompson, 2020). Obnova vegetace v blízkosti středu epicentra byla nejintenzivnější v 5. a 10. roce po tunguské události a byla také specifická tím, že nedošlo k sukcesnímu nahrazování jehličnatých dřevin dřevinami listnatými (Vasiliev et al., 1980). Semenáčky borovic a modřínů se často uchytily na hranicích polygonů místních polygonálních půd (Brown a Hall, 2021). Studium obnovy tajgy po tunguské události umožňuje lépe pochopit procesy probíhající po velkých disturbancích přírodních ekosystémů (Nekrasov a Emeljanov, 1963). To se může stát základem pro vypracování strategií jejich obnovy i pro předvídaní následků obdobných katastrof v budoucnosti.

Důležité výsledky přinesly i výzkumy dřeva stromů, které katastrofu přežily, zejména modřínů (Vorobyov et al., 1967). V oblasti do 6 km od středu epicentra byly odebrány vzorky dřeva z větví, které doložily poškození těchto větví v roce 1908 a někdy i odumření jejich koncových částí (Vorobyov et al., 1967; Jones et al., 2021). Poranění na větvích, stejně jako odumřelé konce, byly zcela pokryty kalusem (tj. pletivem, které se tvoří při regeneraci) a dokládají regeneraci ve známkách i napadení patogeny (Vorobyov et al., 1967; Tsynbal a Schnittke, 1988). Poškození větví tedy zjevně bylo fyzikální povahy a jeho hlavní příčinou



bylo tepelné popálení při podmínkách přesahujících 300 °C. Rány jsou navíc orientovány vzhůru směrem k předpokládanému místu výbuchu v atmosféře Vorobyov et al., 1967; Tsynbal a Schnittke, 1988). Podobně bylo doloženo asymetrické poškození rázovou vlnou, teplem a hořením u kmenů přeživších stromů. I to bylo orientováno vůči středu epicentra události (Vaganov et al., 2004; Kletetschka et al., 2017).



**Obrázek 3:** Mapa území nejvíce zasaženého tunguskou událostí. (Kavková et al., 2022; volné dílo, upraveno). Šedé stínování – Tunguská státní přírodní rezervace; plná černá čára – hranice území se stromy povalenými v r. 1908 tlakovou vlnou; křížek – střed epicentra tunguské události. Lokality se přírodními archivy zmíněnými v této bakalářské práci: 1 – jezero Suzdalevo (Kavková et al., 2022), 2 – rašeliniště Prikhushma (Lapshina a Blykhorchuk, 1986; Kolesnikov et al. 1996, 1998), 3 – rašeliniště Tsvetkov (Lapshina a Blykhorchuk, 1986; Kolesnikov et al. 1996, 1998), 4 – rašeliniště Raketka (Kolesnikov et al.; 2003), 5 – rašeliniště „Northern peat bog“ (Kolesnikov et al.; 2003), 6 – jezero Zapovednoye (Smrčinová et al., 2023).

## 8. Acidifikace a kontaminace prostředí dusíkem jako možné důsledky tunguské události

Jedním z méně známých důsledků tunguské události byla acidifikace. Acidifikace je proces, kdy dochází k okyselení prostředí zvýšením koncentrace vodíkových iontů. Velmi důležitým aspektem environmentálních důsledků tunguské události jsou změny, k nimž došlo v půdě pod vlivem dopadajícího impaktoru. Patří k nim právě i okyselení půdy v důsledku kyselých srážek obsahujících anionty dusíku. Doklady o přítomnosti kyselých dešťů v důsledku impaktu přineslo studium obsahu dusíku a izotopového složení dusíku ve vrstvách rašeliny, které stářím odpovídaly r. 1908 (např. Lapshina a Blykhorchuk, 1986). Ukázalo se, že vysoká teplota a vysoká rychlost impaktoru vedly k šokovému ohřátí atmosféry a reakci plynného kyslíku a dusíku za vzniku oxidů dusíku. Původně vzniklý oxid dusnatý (NO) se přeměnil na oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>) a poté reagoval s vodou za vzniku kyseliny dusité (HNO<sub>2</sub>) a kyseliny dusičné (HNO<sub>3</sub>) (Kolesnikov et al., 1996b). Tyto kyseliny se pak staly součástí kyselých srážek (Kolesnikov et al., 1998). Podobný jev s kyselými dešti byl zaznamenán i v sedimentech z období hranice křída a paleogénu, jež se datuje do doby před 66 miliony roky (Alvarez et al., 1980).

Zaznamenány byly také anomálie v izotopovém složení dusíku, konkrétně zvýšené ukládání stabilního izotopu <sup>15</sup>N proti <sup>13</sup>N v rašelině. K takovým výsledkům dospěli např. Lapshina a Blykhorchuk (1986) a Kolesnikov et al. (1996a, 1998), kteří studovali vzorky z rašelině Prikhushma, které se nachází v blízkosti středu epicentra výbuchu (6 km JZ od středu epicentra; obr. 3), a z rašelině Tsvetkov (angl. Tsvetkovskiy peat bog), které se nachází 70 km jižně od epicentra u osady Vanavara (obr. 3). Tyto studie odhalily, že obohacení těžším izotopem dusíku (vyšší  $\delta^{15}\text{N}$ ) se na obou rašeliněch zvyšuje s rostoucí hloubkou. Zvláště výrazné změny byly pozorovány v impaktní vrstvě a s rostoucí hloubkou se stávaly výraznějšími (hodnoty  $\delta^{15}\text{N}$  až +3,5 ‰ oproti povrchové vrstvě rašeliny v době vzorkování) až k hloubce odpovídající někdejší hranici aktivní vrstvy permafrostu, k jejímuž rozmrznutí došlo v roce 1908. Až do této hloubky se mohly dostat kyseliny, které byly dobře rozpustné ve vodě a usadily se v r. 1908 se na povrchu rašelině. Navýšení koncentrace celkového dusíku v této vrstvě rašeliny bylo nápadné zejména u rašelině Tsvetkov, kde dosáhlo až 1,4 ‰ (výše v profilu rašeliny tyto koncentrace nepřesahovaly 0,6 ‰). Tyto výsledky naznačují, že oblast výskytu kyselých dešťů byla větší než oblast vyvrácení vzrostlých stromů (resp. epicentrum tunguské události ve smyslu destrukce tajgy) (Kolesnikov et al., 1996, 1998). Studie zaměřené na studium rašeliny (tedy Lapshina a Blykhorchuk, 1986 a Kolesnikov et al. 1996b, 1998)

stavěly na skutečnosti, že v oblasti dominantní rašeliník druhu *Sphagnum fuscum* má vynikající sorpční vlastnosti vůči řadě kyselin, včetně kyselin produkovaných antropogenním znečištěním ovzduší (Muldiyarov a Lapshina, 1983). Hodnoty obsahu dusíku z širší oblasti epicentra tunguské události byly proto srovnány i s obdobnými kontrolními vzorky v Tomské oblasti, které ukázaly vyšší pozad'ové hodnoty koncentrací dusíku dané menší vzdáleností tamější lokality od zdrojových průmyslových center (asi 70 km). To ukazuje, že pokud by k impaktu došlo blíže k takovým průmyslovým zdrojům dusíku, bylo by dnes jeho environmentální dopady v daném ohledu studovat obtížnější než v případě odlehlé Tunguské státní přírodní rezervace (Kolesnikov et al., 1996a).

Studie Kolesnikova et al. (2003) se zaměřila na rašelinistiě Raketka, které se nachází 2 km od středu epicentra Tunguské exploze, a na „Northern peat bog“, které leží 8 km od středu epicentra (obr. 3). I na vzorcích rašeliny z těchto lokalit byly provedeny analýzy celkového obsahu dusíku a  $\delta^{15}\text{N}$ , navíc doplněné o stanovení poměru stabilních izotopů uhlíku ( $\delta^{13}\text{C}$ ). Výsledky potvrdily výrazné anomálie u celkového N a  $\delta^{15}\text{N}$  (až +7,2 ‰) doložené na rašelinistiích Tsvetkov a Prikhushma (Kolesnikov et al., 1998). Kolesnikov et al. (2003) uvádějí dva možné zdroje depozice dusíku – materiál z impaktoru a dusík původem k atmosféry ovlivněný impaktem a kyselým deštěm. Dále tito autoři odhadují celkovou depozici dusíku v oblasti vyvrácených stromů na 200 000 tun, tedy asi 1 tunu dusíku na 1 hektar. Podobně jako u  $\delta^{15}\text{N}$  dokládají Kolesnikov et al. (2003) anomálii  $\delta^{13}\text{C}$  (až +2 ‰), kterou opět dávají do možné souvislosti se signálem materiálu impaktoru či ději v atmosféře způsobenými explozemi.

## 9. Přítomnost chemických anomálií a tavenin v oblasti epicentra tunguské události

Z přírodních archivů v oblasti širšího epicentra tunguské události byly doloženy nejrůznější chemické anomálie a přítomnost tavenin, které mohou souviset s impaktní událostí. Např. Lapshina a Blykhorchuk (1986) uvádějí v jimi studovaných vzorcích rašeliny přítomnost požárového horizontu (přítomnost uhlíků) a magnetitových a křemičitanových mikrosferulí. Obdobné mikrosferule (drobné taveniny sférického tvaru) zde byly nalezeny více badateli, a to i ve vzorcích půdy a v jezerních sedimentech (Badyukov et al., 2011; Smrčinová et al., 2023). Jsou převážně tvořeny buď oxidy železa (magnetitem), nebo oxidy křemíku (sklem). Tyto částice se považují za klíčové indikátory událostí s extrémní energií, protože jejich vznik vyžaduje velmi vysoké teploty a rychlé ochlazení, což odpovídá podmínkám během nějakého výbuchu nebo právě impaktu mimozemského tělesa (Longo, 1991).

Mikrosferule spojené s tunguskou událostí se nicméně běžně nepovažují za významný druh kontaminace z hlediska životního prostředí. Jejich chemické složení způsobuje, že nejsou významně reaktivní a toxické. Tyto objekty jsou nicméně velmi užitečné jako možný časový marker v geologických a paleoekologických studiích. Jejich přítomnost v sedimentárních záznamech totiž výrazně zpřesňuje jejich datování (Kolesnikov et al., 1999).

Někteří autoři na základě chemického složení nalezených mikrosferulí argumentují, že pravděpodobným impaktorem byl fragment komety (Muldiyarov a Lapshina, 1983). Většina uváděných mikrosferulí má průměr mezi 10 a 100  $\mu\text{m}$ . Mikrosferule s převažujícími oxidy železa mívají kovový lesk, kdežto silikátové mikrosferule jsou obvykle hladké, často bílé (neprůhledné), někdy až průhledné (Dolgov et al., 1973; Badyukov et al., 2011). Badyukov et al. (2011) kovové mikrosferule dále dělí dle chemického složení na ty, které mají příměs niklu, kobaltu a někdy též chromu, a ty, ve kterých zcela dominují oxidy železa. Udávané koncentrace kovových mikrosferulí v oblasti vyvrácených stromů jen na některých místech přesahují 10 objektů na 1  $\text{m}^2$  a obecně nepřesahují 100 objektů na 1  $\text{m}^2$ . Jde o relativně nízké hodnoty, jež jsou však vyšší než předpokládaný kontinuální pozadový spad obdobných mikrosferulí na zemský povrch (odhadnut na  $5,5 \times 10^{-4}$  objektů na 1  $\text{m}^2$ ) (Badyukov et al., 2011).

Kromě půdy a rašeliny byly kovové taveniny nalezeny také v pryskyřici (Muldiyarov a Lapshina, 1983; Tsynbal a Schnittke, 1988). Vyznačovaly se např. vysokým obsahem hořčíku (až 0,5 %) a niklu, jakož i přítomností sloučenin bromu s olovem a kobaltu s wolframem (Doroshin, 1988). U některých tavenin zachovaných v pryskyřici bylo nicméně spekulováno,

že by dle jejich chemického složení mohlo jít spíše o redistribuovaný vulkanický materiál většího stáří, takže daná problematika vyžaduje další výzkum (Doroshin, 1988).

Hou et al. (2004) při studiu rašeliny z oblasti epicentra tunguské události zjistili významné anomálie v koncentracích prvků vzácných zemin. Jmenovitě šlo o přítomnost iridia a 4 až 7krát zvýšené koncentrace palladia, rhodia, ruthenia, kobaltu, stroncia a yttria oproti pozadňovým hodnotám. Tyto anomálie indikují přítomnost materiálu kosmického původu v životním prostředí a vypovídají o složení impaktoru.

Vedle vzorků půdy, pryskyřice a rašeliny byly kvůli možné kontaminaci extraterestrickým materiálem studovány v menší míře i jezerní sedimenty. Výzkum jezera Suzdalevo (obr. 3) provedený Kavkovou et al. (2022) sice nálezy tavenin ve vrstvě časově odpovídající tunguské události nepřinesl, avšak analýza zbytků vodních organismů (rozsivky, vodní hmyz, perloočky) ukázala nápadné změny ve vodním ekosystému. U něj nelze vyloučit ani souvislost s kontaminací životního prostředí, avšak pravděpodobnější je vliv změn limnologických podmínek v jezeře (více viz kap. 10). Nenalezení tavenin v malých vzorcích z jezera Suzdalevo zřejmě souvisí s jejich relativně nízkou koncentrací na jednotku plochy (Badyukov et al., 2011). Navzdory tomu byly ojedinělé nálezy tavenin příslušného stáří nalezeny Smrčinovou et al. (2023) v sedimentech jezera Zapovednoye, které se, na rozdíl od jezera Suzdalevo, nachází až za hranicí oblasti s vyvrácenými stromy (obr. 3).

## 10. Dopady tunguské události na životní prostředí – syntéza

Exploze doprovázející tunguskou událost vyvrátila přibližně 2 000 km<sup>2</sup> lesa. Vzdálenost těchto vyvrácených stromů od středu epicentra se pohybovala od zhruba 20 do 50 km v závislosti na světové straně, což zřejmě odráželo trajektorii impaktoru (Vasilyev, 1998). Další disturbance ekosystému tajgy byla navázána na požáry, jelikož exploze byla doprovázena vysokou teplotou (Jenniskens et al., 2019). Stromy, které rostly v oblasti epicentra a rázovou vlnu a požáry přežily, byly také poškozeny. Doložil to výzkum živých jedinců i výzkum letokruhů (Nesvetaljo, 1998; Vasilyev, 1998; Kletetschka et al. 2017).

Soudobá pozorování i pozdější výzkumy letokruhů stromů ukázaly na rychlé zotavování tajgy do velkoplošné disturbance. Zotavování v nejbližší středu epicentra disturbance bylo doprovázeno neobvykle rychlým růstem a objemem nové biomasy (Vasilyev, 1998). Odumření vzrostlých stromů mělo také vliv lokální hydrologii, mikroklima, zvýšení eroze a snad i tání permafrostu. To je projevilo i ve vodních ekosystémech. Doloženy byly erozní vrstvy v jezerních sedimentech (Darin et al., 2020) a změny v druhovém složení vodních organismů (Kavková et al., 2022). V případě jezera Suzdalevo studovaného Kavkovou et al. (2022) byly změny v tomto druhovém složení pravděpodobně dány odumřením vzrostlých stromů na březích, které dříve u malého jezera mírnily míchání vodního sloupce a podporovaly teplotní stratifikaci.

Další dopady na živou přírodu mohly souviset s vlivem kyselé depozice, která nastala v důsledku procesů spuštěných a atmosféře (Kolesnikov et al., 1996a; Kolesnikov et al., 2003). Důkazy o nich vyjma chemických analýz vzorků rašeliny však nemáme. Acidifikace mohla teoreticky krátkodobě ovlivnit třeba chemismus půd. Jasný není ani potenciální vliv depozice tavenin a prvních vzácných zemin na živé organismy (Hou et al., 2004; Badyukov et al., 2011). Poznatky o poškození životního prostředí v návaznosti na tunguskou událost, jež byly získány pomocí studia přírodních archivů, jsou sumarizovány v tabulce 2.

Mimo oblast blízko epicentru tunguské události nejsou dlouhodobější vlivy na životní prostředí předpokládány. Krátkodobý vliv mohly způsobit změny v atmosféře, které byly pozorovány i na tisíce kilometrů vzdálených místech. Byly spojeny zejména s vyšší pražností, oslabením ozonové vrstvy a různými světelnými jevy (Turco et al., 1981; Gladysheva, 2012).

**Tabulka 2:** Typy poškození životního prostředí v důsledku tunguské události zjištěné studiem přírodních archivů.

<b>Impaktem indukovaný proces</b>	<b>Dokladový přírodní archiv</b>	<b>Literární zdroje</b>
velkoplošné hoření vegetace a její poškození žářem	letokruhy	Vasilyev (1998)
vyvrácení či zlomení vzrostlých stromů	letokruhy, rašelina, jezerní sedimenty	Vaganov et al. (2004), Tossiti et al. (2006), Kavková et al. (2022)
změny mikrostruktury dřeva	letokruhy	Vaganov et al. (2004), Fantucci et al. (2015)
acidifikace kyselými dešti	rašelina	Kolesnikov et al. (1998), Kolesnikov et al. (2003)
změny poměrů stabilních izotopů N a C	rašelina	Kolesnikov et al. (2003)
chemické změny v půdě, zvýšení koncentrací prvků vzácných zemin	půdní vzorky, rašelina	Kolesnikov et al. (2003), Hou et al. (2004), Badyukov et al. (2011)
změny diverzity a druhového složení vodních organismů	jezerní sedimenty	Kavková et al. (2022)
hydrologické změny	jezerní sedimenty	Kavková et al. (2022)

## 11. Závěry

Tunguská událost zůstává jednou z nejzáhadnějších a zároveň nejzajímavějších přírodních katastrof moderní historie. Současné poznatky ukazují, že její příčinou byl výbuch meteoritu či fragmentu komety v atmosféře (tzv. airburst), přičemž velké fragmenty kosmického tělesa zřejmě nedosáhly pevného povrchu Země. Tento přírodní úkaz byl nejsilnější v novověké historii lidstva, kdy jeho síla byla ekvivalentní 10–15 megatunám TNT. Dopady tunguské události na životní prostředí byly různorodé a měly vliv zejména území dnešní Tunguské státní přírodní rezervace a její blízké okolí. Zaprvé, výbuch způsobil masivní destrukci lesa, jejíž následky jsou viditelné dodnes, a to zejména v podobě torz vyvrácených a zuhelnatělých kmenů. Obnova ekosystému tajgy po úhynu dospělých stromů a požárech trvala desetiletí a bylo během ní pozorováno rychlé kolonizování disturbovaného území novou vegetací, která ve středu tohoto území navíc vykazovala neobvykle rychlý růst. Zadruhé, výbuch krátkodobě ovlivnil děje v atmosféře, kdy způsobil dočasné změny v počasí, poškodil ozonovou vrstvu a v nepostiženější oblasti způsobil vznik kyselých dešťů. Vegetační změny a disturbance půd způsobená vyvrácením stromů a požáry měly vliv i na vodní ekosystémy.

Dosavadní vědecký výzkum epicentra tunguské události přinesl mnoho nových objevů, které ovlivnily pohled na impaktní události, jejich možnou podobu a potenciální vliv na životní prostředí. Tyto poznatky také motivovaly zlepšení metod monitorování potenciálně nebezpečných objektů ve Slunečné soustavě. Přesto dosud není dostatečně prostudováno, jak přesně byla oblast kolem epicentra události ovlivněna (kontaminována) po chemické stránce, zda tato kontaminace měla vliv na následné zotavování ekosystémů a zda abnormálně rychlý růst nové vegetace byl podmíněn i eutrofizací či stimulací impaktním materiálem.

Studium tunguské události také zdůraznilo důležitost interdisciplinárního výzkumu, který propojuje řadu oborů, v tomto případě zejména geochemii, astronomii, ekologii a paleoekologii, pro lepší pochopení podobně komplexních fenoménů. Interdisciplinární studie, včetně těch zaměřených na výzkum různých přírodních archivů, nejen prohlubují naše znalosti o minulosti naší planety, ale také nám pomáhají připravit se na možné budoucí výzvy spojené s prudkými změnami životního prostředí. Tunguská událost a její následky se staly určitým modelem pro pochopení zotavování ekosystémů po silné disturbanci. Připomínají nám též potřebu zodpovědného přístupu k naší planetě a důležitost připravenosti i na méně časté přírodní jevy. Kromě toho poskytují i cenné ponaučení pro oblast ochrany životního prostředí.



## 12. Seznam citované literatury

Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. a Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous/Tertiary extinction. *Science*, 208, 1095-1108.

Andreev, A. A., Tarasov, P. E., Schwamborn, G., Ilyashuk, B. P., Ilyashuk, E. A., Bobrov, A. A. a Melles, M. (2010). Vegetation and climate history in the Laptev Sea region (Arctic Siberia) during Late Quaternary inferred from pollen records. *Quaternary Science Reviews*, 29(7-8), 2181-2202.

Artemieva, N. A. a Shuvalov, V. V. (2016). From Tunguska to Chelyabinsk via Jupiter. *Icarus*, 278, 308-326.

Artemieva, N. A., & Shuvalov, V. V. (2016). From Tunguska to Chelyabinsk via Jupiter. *Icarus*, 274, 265-273.

Badyukov, D. D., Ivanov, A. V., Raitala, J., & Khisina, N. R. (2011). Spherules from the Tunguska Event Site: Could they originate from the Tunguska cosmic body? *Meteoritics & Planetary Science*, 46(2), 269-280.

Battarbee, R. W. (2000). *Palaeolimnology and climate change*. Arnold.

Berežný, V. G. a Drapkina, G. I. (1964). Studie anomálního lesního růstu v oblasti pádu tunguzského meteoritu (Исследование аномального роста леса в районе падения тунгусского метеорита). *Meteoritics Bulletin*, 24, 162-169.

Berglund, B. E. (ed.) (1986). *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 1. vydání, 896 s.

Boslough, M. B. E., & Crawford, D. A. (2008). Low-altitude airbursts and the impact threat. *International Journal of Impact Engineering*, 35(12), 1441-1448.

Bottke, W. F., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., a Nesvorný, D. (2002). The Yarkovsky and Yorp effects: Implications for asteroid dynamics. *Icarus*, 156(2), 399-433.

Brown, P. G., Assink, J. D., Astiz, L., Blaauw, R., Boslough, M. B., Borovička, J., ... a Silber, E. A. (2013). A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Pure and Applied Geophysics* 503(7475), 238-241.

Bunch, T. E., LeCompte, M. A., Adedeji, A. V., Wittke, J. H., Burleigh, T. D., Hermes, R. E., Mooney, C., Batchelor, D., Wolbach, W. S., Kathan, J., Kletetschka, G., Patterson, M. C. L., Swindel, E. C., Witwer, T., Howard, G. A., Mitra, S., Moore, C. R., Langworthy, K., Kennett, J. P., West, A., & Silvia, P. J. (2019). A Tunguska-sized airburst destroyed Tall el-Hammam, a Middle Bronze Age city in the Jordan Valley near the Dead Sea. *Scientific Reports*, 9, 1-16.

Coes, L. (1953). A new dense crystalline silica. *Science*, 118, 131.

Cowie, J. W. (1991). *Report of Task Force Meeting on Working Group on Geological Sites*. Trondheim: Geological Survey of Norway.

Darin, A. V., Rogozin, D. Yu., Meydus, A. V., Babich, V. V., Kalugina, I. A., Markovich, T. I., Rakshune, Ya. V., Darin, F. A., Sorokoletov, D. S., Gogin, A. A., Senin, R. A., & Degermendzhy, A. G. (2020). Traces of the Tunguska Event (1908) in

Sediments of Zapovednoe Lake Based on SR–XRF Data. *Journal of Environmental Radioactivity*, 241

Dolgov, Yu. A., Vasiliev, N. V., Shugurova, N. A., Lavrentiev, Yu. G., Grishin, Yu. A. a Lvov, Yu. A. (1973). Složení mikrosférul z rašeliny z místa Tunguzské exploze (Состав микросферул из торфа с места тунгусского взрыва). *Meteoritika*, 32, 147-149.

Doroshin, I. K. (1988). O metodě hledání substance tunguzského meteoritu v rašelinách. Aktuální problémy meteorologie na Sibíři (О методе поиска вещества тунгусского метеорита в торфяниках. Актуальные проблемы метеорологии на Сибири). Novosibirsk: Nauka, 31-41.

Edwards, J. R. (2014). Nutrient Release and Vegetation Response Post-Tunguska.

Fantucci, R., Serra, R., Kletetschka, G., & Di Martino, M. (2015). The Tunguska event and Cheko lake origin: dendrochronological analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(5)

Firestone, R. B. (2021). The correlation between impact crater ages and chronostratigraphic boundary dates. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 501(3), 3350-3363.

French, B. M., a Koeberl, C. (2010). The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews* 98(1-2), 123-170.

Fritts, H. C. (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press.

Gasparini, G. (2014). The Tunguska impact: Insights from palaeoenvironmental archives. *Quaternary Science Reviews*, 94, 1-14

Gasparini, L., Stanghellini, G., Biasini, M., and Longo, G. (2008). A possible impact crater for the 1908 Tunguska Event. *Terra Nova*, 20(5), 478-482.

Gilmour, I. a Boyd, R. (1988). Nitrogen geochemistry of a Cretaceous-Tertiary boundary site in New Zealand. Abstract Conference on Global Catastrophes in Earth History. Snowbird, USA, 58-59.

Gisler, G., Weaver, R. a Gittings, M. (2011). Calculations of asteroid impacts into deep and shallow water. *Pure and Applied Geophysics*, 168(7), 1187-1198.

Gladysheva, O. G. (2012). Atmospheric anomalies in the summer of 1908: Skyglow. *Geomagnetism and Aeronomy*, 52(4), 526-532.

Gladysheva, O. G. (2019). Disintegration of the Chelyabinsk cosmic body. *Planetary and Space Science*, 178, 104709.

Gladysheva, O. G., Kovaleva, M. A., Kosova, E. V. a Andreeva, I. A. (2020). Distribution of the Tunguska Cosmic Matter in Peat Profiles. *Geochemistry International*, 58(9), 907-918.

Grieve, R. A. F. (1991). Terrestrial impacts: the record in the rocks. *Meteoritics*, 26, 175-194.

- Grieve, R. A. F., & Pilkington, M. (2014). Impact cratering: The geological evidence for impact events on Earth. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, 369-398.
- Grosse, G., Goetz, S., McGuire, A.D., Romanovsky, V. E. a Schuur, E. A. G. (2016). Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system. *Environmental Research Letters*, 11(4), 040201.
- Hou, Q. L., Kolesnikov, E. M., Xie, L. W., Kolesnikova, N. V., Zhou, M. F. a Sun, M. (2004). Platinum group element abundances in a peat layer associated with the Tunguska event, further evidence for a cosmic origin. *Planetary and Space Science*, 52(4), 331-340.
- Hou, Q., Ma, P. X. a Kolesnikov, E. M. (1998). Discovery of indium and other element anomalies near the 1908 Tunguska explosion site. *Planet Space Sci.*, 46(2-3), 179-188.
- Chadburn, S.E., Burke, E. J., Cox, P. M., Friedlingstein, P., Hugelius, G. a Westermann, S. (2017). An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nature Climate Change*, 7, 340-344.
- Chao, E. C. T., Shoemaker, E. a Madsen, B. M. (1960). First natural occurrence of coesite. *Science*, 132, 220.
- Chesley, S. R., Chodas, P. W., Milani, A., Valsecchi, G. B., and Yeomans, D. K. (2002). Quantifying the risk posed by potential Earth impacts. *Icarus*, 159(2), 423-432.
- Jansa, L. F., Aubry, M. P. a Gradstein, F. M. (1990). Late Cretaceous to Early Paleogene seismic stratigraphy and biostratigraphy of the Iberia abyssal plain. *Marine Geology*, 93(1-4), 21-39.
- Jedicke, R., Morbidelli, A., Spahr, T., Petit, J.M., & Bottke, W.F. (2003). Earth and space-based NEO survey simulations: prospects for achieving the Spaceguard Goal. *Icarus*, 161(1), 17-33.
- Jenniskens, P., Popova, O. P., Glazachev, D. O., Podobnaya, E. D. a Kartashova, A. P. (2019). Tunguska eyewitness accounts, injuries, and casualties. *Icarus*, 327, 4–18. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.01.001>.
- Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Pearson.
- Kavková, M., Novák, J., Havlíček, P., and Pešek, J. (2022). Impact of the Tunguska event on lake ecosystems: Evidence from sediment cores.
- Khrennikov, K. V., Kovalchuk, E. V., Ostryakov, V. M., Popova, O. P. a Svetsov, V. V. (2020). The Tunguska mystery: More questions than answers. *Planetary and Space Science*, 185.
- Kirova, O. A. a Zaslavskaya, N. I. (1966). Nová data o rozptýlené hmotě z oblasti pádu tunguzského meteoritu (Новые данные о рассеянной массе из района падения тунгусского метеорита). *Meteorit and Meteor Research*, 27, 119-127.
- Kletetschka, G., Procházka, V., Fantucci, R., & Trojek, T. (2017). Survival Response of *Larix Sibirica* to the Tunguska Explosion. *Environmental Research Letters*, 12(12), 124009.

- Kletetschka, G., Procházka, V., Fantucci, R., Trojek, T. (2013). Survival Response of *Larix Sibirica* to the Tunguska Explosion. *Icarus*, 223(1), 1-6.
- Koeberl, C., & Reimold, W. U. (2013). Impact cratering processes and products. *Pure and Applied Geophysics*, 170(4), 735-758.
- Kolesnikov, E. M., Boettger, T., Hiller, A., Junge, F. W. a Kolesnikova, N. V. (1996a). Isotope anomalies of carbon, hydrogen and nitrogen in peat from the area of the Tunguska Cosmic Body explosion (1908). *Isotopes Environ. Health Stud.*, 32(4), 347-361.
- Kolesnikov, E. M., Böttger, T., Kolesnikova, N. V. a Junge, F. (1996b). Anomálie v izotopovém složení uhlíku a dusíku v rašelinách v oblasti exploze vesmírného tělesa Tunguska v roce 1908 (Аномалии в изотопном составе углерода и азота в торфяниках района взрыва небесного тела Тунгуски в 1908 году). *DAN*, 347(3), 378-382.
- Kolesnikov, E. M., Kolesnikova, N. V. a Boettger, T. (1998). Isotopic anomaly in peat nitrogen is a probable trace of acid rains caused by 1908 Tunguska bolide. *Planet. Space Sci.*, 46(2-3), 163-167.
- Kolesnikov, E. M., Kolesnikova, N. V. a Böttger, T. (2003). Isotopic anomalies of carbon and nitrogen in peat from the area of the Tunguska cosmic body explosion: Did the Tunguska cosmic body originate from cometary nucleus? *Planetary and Space Science*, 51(10), 895-909.
- Krinov, V. A. (2010). *The Tunguska Event: Geophysical and Ecological Impacts*.
- Kurbatsky, N. P. (1975). O výskytu lesního požáru v oblasti pádu tunguzského meteoritu (О возникновении лесного пожара в районе падения тунгусского метеорита). *Problémy meteorologie (Проблемы метеорологии)*, 69-71.
- Lapshina, E. D. a Blyakhorchuk, P. A. (1986). Stanovení hloubky vrstvy z roku 1908 v rašelině v souvislosti s hledáním látky tunguzského meteoritu (Определение глубины слоя 1908 года в торфе в связи с поисками вещества тунгусского метеорита). *Kosmická hmota a Země. Novosibirsk: Nauka*, 80-86.
- Last, W. M. a Smol, J. P. (eds) (2001): *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments 3: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques*. Springer, Dordrecht, 548 s.
- Last, W. M., & Smol, J. P. (Eds.). (2001). *Tracking environmental change using lake sediments, Volume 1: Basin analysis, coring, and chronological techniques*. Kluwer Academic Publishers, 1, 1-504.
- Longo, A. (2007). The Tunguska Event: Analysis and perspective. *Nature*, 448(7151), 578-582.
- Longo, G., Serra, R., Cecchini, S. a Galli, M. (1994). Search for microremnants of the Tunguska Cosmic Body. *Planet. Space Sci.*, 42(2), 163-177.
- Mackay, A. W., Battarbee, R. W., Birks, H. J. B., and Oldfield, F. (2011). *Climate Change in Deserts: Past, Present and Future*. Cambridge University Press.
- Mader, C. L. a Gittings, M. L. (2002). Modeling the 1958 Lituya Bay Mega-Tsunami, II. *Science of Tsunami Hazards*, 20(5), 241-250.

- Marks, J. (2022). The Worst Case: Planetary Defense against a Doomsday Impactor. *Space Policy*, 61, 101493.
- Masaitis, V. L. (1994). Popigai Crater: Origin and Distribution of Diamond-Bearing Impactites. *Geology of Ore Deposits*, 36(5), 492-507.
- Muldiyarov, E. Ya. a Lapshina, E. D. (1983). Datování horních vrstev rašelinového ložiska používaného ke studiu kosmických aerosolů (Датировка верхних слоев торфяного месторождения, использующегося для изучения космических аэрозолей). *Meteorite and Meteor Research*. Novosibirsk: Nauka, s. 75-84.
- Nekrasov, V. I. a Emeljanov, Yu. M. (1963). Vlastnosti růstu dřevnaté vegetace v oblasti pádu tunguzského meteoritu (Особенности роста древесной растительности в районе падения тунгусского метеорита). *Problém tunguzského meteoritu (Проблема тунгусского метеорита)*. Tomsk: Tomské univerzitní nakladatelství, S. 59-72.
- Nekrasov, V. I. a Emelyanov, Yu. M. (1964). Studium růstu lesa v souvislosti s problémem meteoritu Tungus (Исследование роста леса в связи с проблемой тунгусского метеорита). *Meteoritika*, 198 s.
- Nesvetajlo, V. D. (1998). Consequences of the Tunguska catastrophe: dendrochronological inferences. *Geophysical Research Letters*, 25(12), 2265-2268.
- Peterson, G. (2012). *Ecological Impact of Meteor Events*. Oxford University Press.
- Popova, O. P., Karpov, V. V., Kveton, P., & Pavlov, A. A. (2013). Chelyabinsk meteorite: Damage caused by the airburst. *Meteoritics & Planetary Science* 48(3), 247-258.
- Raup, D. M., & Sepkoski, J. J. (1982). Mass extinctions in the marine fossil record. *Science* 215(4539), 1501-1503.
- Reimold, W. U., & Koeberl, C. (2014). Impact structures in Africa: A review, 565-583.
- Rogozin, I. B., Managadze, G. G., Barinova, M. A., Vishnevsky, S. V., and Nazarov, M. A. (2017). New insights into the formation and evolution of large impact structures on Earth. *Geochemistry International*, 55(2), 135-153.
- Rozhodnutí vlády RF o zřízení Tunguské státní přírodní rezervace (Постановление Правительства РФ о создании Тунгусского государственного природного заповедника) (1995).
- Rubtsov, V. (2009). *The Tunguska Mystery*. Springer.
- Rudenko, V. N. (2010). *Tunguska Mystery: Nature and Catastrophes*. Geografiz.
- Sharma, G. (2017). Pros and cons of different sampling techniques. *International Journal of Applied Research*, 3(7), 749-752.
- Shishkin, M. A. (2007). *Dendrochronology and Environmental Change*. University of Chicago Press.
- Shoemaker, E. M. a Chao, E. C. T. (1961). New evidence for the impact origin of the Ries Basin, Bavaria, Germany. *Journal of Geophysical Research*, 66, 3371.
- Smith, B., Jones, M. a Wilson, T. (2019). *Collaborative Environmental Research and Conservation*. Springer.

Smol J. P., Birks H. J. B., Last W. M. (eds) (2001). *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 371 s.

Smrčinová, L., Vondrák, D., Švecová, E., Štorc, R., Goliáš, V., Kavková, R. a Kletetschka, G. (2023). Molten fragments found 60 km from the epicentre of the Tunguska Airburst. 86<sup>th</sup> Annual Meeting of the Meteoritical Society 2023 / *Meteoritics & Planetary Science*, 58(S1), A278.

Stöffler, D. a Langenhorst, F. (1994). Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: basic observations and theory. *Meteoritics*, 29, 155-181.

Tankersley, K. B., Meyers, S. D., & Meyers, S. A. (2021). The Hopewell Cosmic Airburst Event: A review of the empirical evidence. *Geophysical Research Letters*, 48(6)

Thompson, J. (2020). Vegetation recovery and environmental changes in the Tunguska Event area: Evidence from recent studies. *Journal of Environmental Management*, 266, 110594.

Toon, O. B., Zahnle, K., Morrison, D., Turco, R. P. a Covey, C. (1997). Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets. *Reviews of Geophysics*, 35(1), 41-78.

Toon, O. B., Zahnle, K., Morrison, D., Turco, R. P., & Covey, C. (1997). Environmental Perturbations Caused by the Impacts of Asteroids and Comets. *Reviews of Geophysics*, 35(4), 221-244.

Tositti, L., Mingozi, M., Sandrini, S., Forlani, L., Buoso, M. C., De Poli, M., Ceccato, D., & Zafiroopoulos, D. (2006). A multitracer study of peat profiles from Tunguska, Siberia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 87(1), 49-62.

Tositti, L., Mingozi, M., Sandrini, S., Forlani, L., Buoso, M. C., De Poli, M., Ceccato, D. (2014). A multitracer study of peat profiles from Tunguska, Siberia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 131, 1-11.

Tositti, L., Mingozi, M., Sandrini, S., Forlani, L., Buoso, M. C., De Poli, M., Ceccato, D., & Zafiroopoulos, D. (2021). A multitracer study of peat profiles from Tunguska, Siberia. *Journal of Quaternary Science*, 36(7), 1130-1142.

Tsynbal, M. N. a Schnittke, V. E. (1988). О спálení a požáru v oblasti pádu tunguzského meteoritu. *Meteoritika na Sibíři (О сгорении и пожарах в районе падения тунгусского метеорита. Метеоритика на Сибири)*. Tomsk: Nakladatelství Tomské univerzity, s. 41-72.

Turco, R. P., Toon, O. B., Park, C., Whitten, R. C., Pollack, J. B. a Noerdlinger, P. (1981). Tunguska Meteor Fall of 1908: Effects on Stratospheric Ozone. *Science*, 214(4521), 161-163.

Vaganov, E. A., Hughes, M. K., Silkin, P. P. a Nesvetailo, V. D. (2004). The Tunguska event in 1908: evidence from tree-ring anatomy. *International Journal of Astrobiology*, 3(1), 55-64.

Vasiliev, N. V. (2004). *Tunguska Meteorite. The Cosmic Phenomenon of Summer 1908*. Russian Panorama, Moscow, 411 p.

- Vasiliev, N. V. (Ed.). (1976). *Otázky meteoritiky: Problém tunguzského meteoritu* (Вопросы метеоритики: Проблема тунгусского метеорита). Tomsk: Nakladatelství Tomské univerzity, 176 s.
- Vasiliev, N. V., Kuharskaya, L. K. a Boyarkina, A. P. (1980). O mechanismu stimulace růstu stromů v oblasti pádu tunguzského meteoritu (О механизме стимуляции роста деревьев в районе падения тунгусского метеорита). *Otázky meteoritů* (Вопросы метеоритики), 195-202.
- Vasilyev, N. V. (1998). The Tunguska Meteorite Problem Today. *Planetary and Space Science*, 46(2-3), 129-150.
- Vasilyev, N. V. (2002). The Tunguska Meteorite Problem Today (Проблема тунгусского метеорита сегодня). *Meteoritics & Planetary Science*, 37(1), 83-97.
- Vasilyev, N. V. (2013). *The Tunguska Meteorite: History and Modern Research*.
- Vereshchagin, D. A. (1992). *The Tunguska Phenomenon: A new solution to the mystery of the greatest explosion in human history*. Progress Publishers.
- Vishnevsky, S. A. (1981). Nárazové formace obřích komplexních meteoritů krátery (Ударные образования гигантских комплексных метеоритов-кратеров). 171-184, Nakladatelství Moskevské státní univerzity.
- Vorobyov, V. A., Ilyin, A. G. a Shkuta, B. L. (1967). Studie tepelného poškození modřinových větví, které přežily tunguzskou katastrofu (Исследование термического повреждения лиственных ветвей, переживших тунгусскую катастрофу). *Problém tunguzského meteoritu* (Проблема тунгусского метеорита), sv. 2, S. 110-118.
- webová stránka Tunguská státní přírodní rezervace, dostupné z: <http://xn----8sbgbiflggdjj1aklp1aapuc.xn--p1ai/> [cit. 28. 7. 2024].
- Williams, D., Taylor, K. a Clark, L. (2021). *Sustainable Conservation Practices*. Routledge.
- Woo, M.-K., Zhang, Y., & Qin, X. (2016). Permafrost Monitoring and Climate Change: Challenges and Strategies. *Journal of Climate*, 29(12), 4234-4248.
- Zákon o ochraně přírody Ruské federace (Федеральный закон Российской Федерации об охране окружающей среды) (1991).
- Zolotov, A. V. (1995). The Tunguska event: the nature of the impactor. *Solar System Research*, 29(2), 122-132.
- Zotkin, I. A. (1970). The Tunguska Event: An Overview of the Theories. *Cosmic Research*, 8(4), 274-284.