

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Barbora Bydžovská

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA EKOLOGIE

**KLIMATICKÉ DOPADY ERUPCE SOPKY
KRAKATOA**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jana Soukupová, Ph.D.

Bakalant: Barbora Bydžovská

Praha 2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Barbora Bydžovská

Aplikovaná ekologie

Název práce

Klimatické dopady erupce sopky Krakatoa

Název anglicky

Climate impacts of eruption Krakatoa volcano

Cíle práce

V literární rešerši popsat vliv vulkanismu na klima. Vlastní šetření bude zaměřeno na dvě největší erupce vulkánu Krakatoa, pravděpodobnou v roce 536 a novodobou v r. 1883 a jejich vliv na klima ve světě. V závěru práce bude nastíněn dopad velké erupce na současný moderní svět.

Metodika

- literární rešerše na dané téma

práce dle osnovy:

Úvod, cíl práce

Vznik vulkánu a jeho vliv na klima

Původní Krakatoa (rok 536)

- příčiny, následky

Nová Krakatoa (rok 1883)

Důsledky vulkanické činnosti sopky Krakatoa na podnebí

Možné dopady v současném světě a v budoucnu

Závěr

Student si může osnovu práce přizpůsobit svému výzkumu.

Doporučený rozsah práce

30

Klíčová slova

erupce, Krakatoa, klima, vulkanický popel, vzdušné proudění

Doporučené zdroje informací

Hovorka, D.: Sopky: vznik, produkty, důsledky. Bratislava (s. n.), 1990, 151 s.

Novák, J. A.: Smrtící sopky. Nakl. XYZ Praha, 2011, 336 s.

Oppenheimer, C.: Eruption that shook the World. Cambridge University Press, 2011

Symons, G. J.: The Eruption of Krakatoa and subsequent phenomena / report of the Krakatoa Committee of the Royal Society ; edited by G. J. Symons, F.R.S. London : Trübner & co., 1888.

Winchester, S.: Krakatoa: The day the world exploded : August 27, 1883 1st Harper Perennial Ed. Publ. 2005 Edition

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Jana Soukupová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 4. 12. 2016

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 12. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 07. 04. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Jany Soukupové Ph.D., a že jsem uvedla všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

V Praze 22.3.2017

.....

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na klimatické dopady erupce sopky Krakatoa v roce 1883, která se nachází mezi ostrovy Jávou a Sumatrou v Indonésii, a také na neznámou sopku z roku 536. Práce si klade za cíl potvrdit globální klimatické následky sopky.

První erupce sopky Krakatoa se udála roku 536, kdy došlo k výrazné změně klimatu období posledních dvou tisíciletí, což bylo prokázáno z ledovců a letokruhů po celém světě. Snížení teploty a doprovodné změny zapříčinily neúrodu, hladomor, epidemie a války. Výbuch v roce 1883 byl popisován nejen v publikacích všech druhů několik následujících měsíců po erupci, ale také v novodobé literatuře. Exploze měla za následek globální snížení teploty o 0,5 – 1°C a projevila se dalšími atmosférickými jevy.

Závěr práce shrne informace o nové sopce Anak Krakatoe a její činnosti v posledních letech. Sopka se na hladině objevila v roce 1927 a její aktivita stále pokračuje. Práce se pokusí nastínit nedozírné následky činnosti sopek, které se nemusí týkat jen pro obyvatel v přilehlém území.

Klíčová slova: vulkán, sopečná činnost, atmosférické jevy, Indonésie

Abstract

This dissertation aims at the climatic effect of Krakatoa eruption in the year 1883, this volcano was located in Indonesia, between Sumatra and Java islands, and also aims at an unknown volcano which erupted in year 536. The goal of this dissertation is to confirm global climatic effects of the eruption of Krakatoa.

The first eruption of Krakatoa took place in 536, and significant climatic changes, in terms of the last two thousand years. These climatic changes were confirmed by iceberg samples and annual ring all across the world. Temperature drop and other changes caused lack of food, famine, epidemics and wars. The eruption of Krakatoa in 1883 was described in all kinds of publications, not just in past, but also in newer literature. The eruption caused a global drop in temperature by 0,5 – 1°C and also other atmospheric phenomena.

Last part of the dissertation summarizes information about Anak Krakatoa volcano and its activity in recent past. Volcano appeared on the water surface in the year 1927 and its activity still not stopped. The dissertation will attempt to outline massive outcomes of volcanic activity, because these outcomes may have to concern bigger part of the population than just the people living in the vicinity.

Keywords: volcano, volcanic activity, atmospheric phenomena, Indonesia

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Cíl práce.....	9
3. Metodika	10
3.1 Dostupná literatura	10
3.2 Metody práce	10
4. Vznik vulkánu a jeho vliv na klima.....	11
4.1 Typy sopek podle vulkanické aktivity.....	12
4.2 Stupnice síly sopečných výbuchů.....	15
4.3 Frekvence erupcí	17
4.4 Vliv sopečných výbuchů na klima	18
4.5 Vulkanická zima.....	19
5. Neznámá sopka z roku 536.....	20
5.1 Důsledky výbuchu	22
6. Krakatoa v roce 1883	24
6.1 Před výbuchem	25
6.2 Průběh výbuchu	26
7. Následky výbuchu z roku 1883 a jeho vliv na klima.....	27
7.1 Vlna tsunami.....	27
7.2 Půda po erupci	28
7.3 Změna klimatu.....	28
7.4 Bishopův kruh	31
7.5 Noční svítící oblaka.....	33
7.6 Červené západy Slunce	35
7.7 Zabarvení Měsíce	36
7.8 Klima v Čechách v 19.století	37
7.9 Klimatické změny v USA.....	39
8. Erupce po roce 1883	41
9. Diskuze.....	44
10. Závěr.....	47
Seznam použité literatury	49
Přílohy.....	53

1. Úvod

Sopečná činnost je přirozený jev, který se projevuje díky pohybu litosférických desek a vyskytuje se na naší planetě Zemi od počátku její existence. Z našeho pohledu se jedná o přírodní katastrofu, která má zničující následky. Erupce sopky i jiné přírodní katastrofy mohou způsobit ohromné ztráty na lidských životech, rozsáhlé škody na majetku či zemědělské půdě, ale také velké nepříznivé změny klimatu na Zemi.

Můžeme se na to ale dívat i v pozitivním smyslu. Vulkanická činnost vždy měla a má důležitou úlohu ve vývoji a formování povrchu a atmosféry naší planety Země. Po silné vulkanické explozi dochází kolem sopky ke změně zemského povrchu a také do atmosféry proudí vulkanické plyny, které mohou ovlivnit klima. Díky výbuchům sopek se naše Země ochlazuje. Mnohokrát se divíme, že v okolí sopek je stále velké zalidnění, i přes značné riziko výbuchu. Zkušenosti však ukázaly, že v okolí sopek jsou velmi vhodné podmínky pro zemědělce, neboť půda sopečných oblastí je díky vysokému obsahu minerálních látek velice úrodná. Kolem sopek často můžeme pozorovat horké prameny, které slouží jako tepelná energie, což nejlépe využívají na Islandu. Využití najdou i vulkanické horniny, které jsou vyhledávaným stavebním materiálem.

2. Cíl práce

Cílem mé bakalářské práce je literární zpracování výbuchu sopky Krakatoa a její dopad na klima. Sopka Krakatoa je sopečný ostrov z lávy v Sundském průlivu mezi ostrovy Jáva a Sumatra v Indonésii. Krakatoa vybuchla v minulosti již několikrát, ale ve své bakalářské práci se budu věnovat především ničivému výbuchu z roku 1883 a původní nepotvrzené Krakatoe z roku 536. Byly to obrovské exploze, které ovlivnily klima na několik měsíců i let. Nikdo tehdy netušil, čím je nečekané počasí způsobeno. Zpracovány byly příčiny a především atmosférické následky této tragické erupce.

Zaměření bakalářské práce spočívá v tom, abychom lépe pochopili hrozbu, která může být způsobena sopkami a pomůže nám to i k rozpoznání jejích následků, které bychom někdy nemuseli přikládat erupci. Především pro nás v České republice, kde nemáme činné vulkány, nevidíme riziko, jež může vzniknout několik set kilometrů dál, ale přitom ohrožuje a má vliv i na nás.

Sopka Krakatoa je velice zajímavá v tom, že je nepředvídatelná a funguje nejspíše už celé tisíciletí. Od roku 1883, kdy nastal výbuch, který sebou vzal i celý ostrov, stále roste a můžeme se jen dohadovat, co by mohla způsobit v budoucnu.

3. Metodika

3.1 Dostupná literatura

Základem pro psaní této bakalářské práce byly rešerše odborných publikací. Většinu použitých zdrojů jsem měla v anglickém jazyce, menší část pak v jazyce českém. Pro obecné pochopení sopek a jejich vlivu jsem čerpala hlavně z českých zdrojů. Nejdůležitějším zdrojem o výbuchu sopky Krakatoy byly použity odborné cizojazyčné články, jelikož se touto tematikou zabývají spíše v zahraničí.

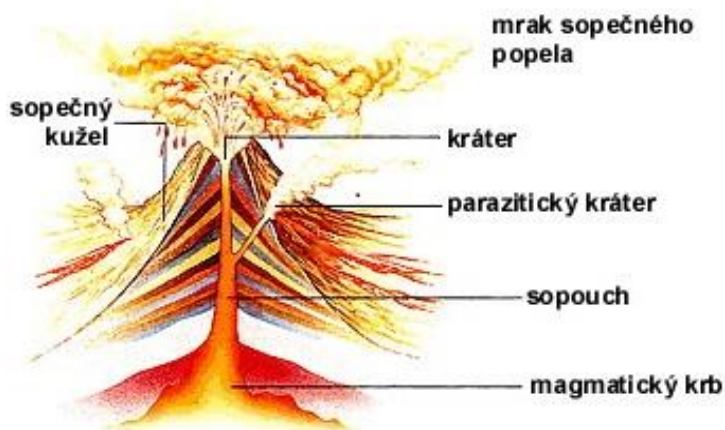
3.2 Metody práce

Odborné publikace byly vyhledávány převážně na Web of Science, kde máme přístup k databázím pomocí přihlášení přes Českou zemědělskou univerzitu v Praze. Také byly použity internetové databáze Science Direct, JSTOR, Google Scholar a další. Při zpracování textu bakalářské práce jsem používala textový editor Microsoft Word. Tabulky a obrázky byly převzaty z relevantních elektronických zdrojů a článků a upraveny pro potřeby práce. Tabulky byly tvořeny a upravovány v programu Microsoft Excel a obrázky v programu Malování.

4. Vznik vulkánu a jeho vliv na klima

Činná sopka je ta, o které víme, že v historické době soptila. Pokud taková historická zkušenost u sopky není, jde o sopku vyhaslou. Sopečná činnost je termín širšího významu, sopka by měla být hora, kopec nebo vyvýšenina, kdežto k sopečné činnosti může dojít, i když se země rozestoupí a z pukliny se vytéká láva. Sopka to není, ale sopečná činnost ano. Sopka vzniká teprve později, až se nahromadí tolik lávy, že vznikne kopec. O každé sopce, která v historické době explodovala, musíme předpokládat, že by mohla vybuchnout znovu. Je otázkou, po jaké době neaktivní sopku můžeme pokládat za vyhaslou? Vulkanologové se shodují v tom, že pokud sopka spí posledních milion nebo dva miliony let, už nikdy soptit nebude (Kukal, 1983).

Většina činných sopek se nachází na rozhraní litosférických desek. Tvar sopek i typ výbuchu závisí na složení magmatu. Magma, které je lehčí než okolní horniny, vystupuje pomalu k povrchu, kde mu brání horniny uložené nad ním, častěji se ale hromadí v tzv. magmatickém krbu, jak vidíme na *obr. 1*, v hloubce 10 až 30 kilometrů. Zde může magma, kterého se do magmatického krbu vejdou desítky kilometrů krychlových, zůstat celá staletí. Povrchu dosahuje podél zlomů nebo komíny (sopouchy). Pokud je magma pod velkým tlakem, stoupá daleko rychleji. Tlak v magmatickém krbu se zvyšuje působením plynů obsažených v magmatu (vodních par, oxidu uhličitého, fluoru, chloru, atd.). Je-li tlak dost vysoký, dojde k výbuchu. (Larousse, 1998). Proto se tvrdí, že je daleko lepší, když u sopek dochází k pravidelným mírným výbuchům, kdy magma postupně vytéká, než když je delší dobu neaktivní a hromadí se tlak. Poté může dojít k obrovské explozi.



Obr.1: Popis průřezu sopkou

Magmatem nazýváme roztavené tekuté hmoty, které vznikají v zemské kůře nebo ve svrchním plášti a vytvářejí po ztuhnutí vyvřelé horniny. Sopečné výbuchy bývají provázeny zemětřesením, akustickými jevy, vývěry plynů, tsunami apod. Při výbuších dosahuje vyvrhování plynů, vodních par a popele výšky až několika desítek kilometrů. Sopečný popel vyvržený do ovzduší může být příčinou změn množství sluneční radiace dopadající do krajinné sféry. Vulkanické pochody mají často katastrofický ráz a mění celý vzhled reliéfu. Bývají i příčinou socioekonomické sféry. Přesto sopečné krajiny bývají hustě osídlené, protože zejména v teplém podnebí vulkanické horniny rychle zvětrávají a mění se v úrodné půdy (Demek, 1985).

Ze světového hlediska je sopečnou činností ohroženo přibližně desetkrát méně obyvatel než zemětřesením. Asi dvě stě milionů lidí žije v nebezpečné blízkosti činných sopek. Podle statistik UNESCO zahynulo za posledních 500 let na 200 tisíc obětí právě sopečnými výbuchy nebo jejich následky. Podle jiné statistiky by to mělo být 175 tisíc lidí za posledních 400 let (Kukal, 1983).

4.1 Typy sopek podle vulkanické aktivity

Po různých úpravách a doplněních se používají tyto typy vulkanické aktivity: vulkánský, strombolský, havajský, peleánský, islandský, vesuvský a katmajský. Rozdělení vyplývá z vnějších projevů sopečné aktivity (Hovorka, 1990).

Vulkánský typ erupce

Označení pochází z malého vulkanického ostrova Vulcano ve Středozezemním moři, který je součástí Liparského souostroví v Itálii. Podle tohoto ostrovního vulkánu se nazývá jeden z oborů geologických věd- vulkanologie.

Vulkánský typ erupce je známý svou vysokoexplozivní aktivitou, která se odehrává po období delšího klidu. Dojde k vyvrhnutí vulkanických bomb, trosek a vulkanického popela. Pro erupci je také charakteristický vznik tmavých oblaků nad samotným kráterem, které mají vysoký obsah vulkanického popela. Ten je vyvrhnut

vertikálním směrem. Lávy jsou středně zásadité a poměrně husté. Vulkánský typ také často doprovází silné dunění, ne však zemětřesení (Hovorka, 1990).

Vesuvský typ erupce

Vesuv je pravděpodobně nejstudovanější a nejznámější vulkán na Zemi, jelikož je pozorovaný posledních dva tisíce let. Je to činný stratovulkán na Apeninském poloostrově v Itálii a dosahuje výšky až 1281 m. Na jeho vrcholu bylo už v roce 1845 zřízená vulkanologická laboratoř, která se stala modelem pro podobné laboratoře na dalších aktivních vulkánech.

Vulkanická aktivita pro tento typ je charakterizována jako extrémně silná. Jednotlivé výbuchy následují po určitém období klidu. V průběhu 19. a 20. století aktivita Vesuvu následovala v intervalech 30 - 40 let. Při těchto erupcích byly pozorovány tendence k vyprazdňování kráteru od lávy. Láva je při explozích vymršťována do ovzduší v podobě oblaku, který vystupuje poměrně vysoko, a pohyb lávy v magmatickém krbu je před samotnou erupcí doprovázen silnými zemětřeseními (Hovorka, 1990).

Typ erupce Mt. Pelé

Jedním z nejničivějších vulkanických aktivit 20. století byl výbuch sopky Mt. Pelé na ostrově Martinique v Malých Antilách v Karibském moři. Hlavní výbuch proběhl 8. května 1902 a podle tohoto vulkánu byly nazvané extrémně explozivní typy erupcí.

Charakteristický znak pro tento typ erupce je bočně orientovaný průběh, ne vertikální. Další projevy erupce je kyselé málo tekoucí magma a kráter vulkánu je zpravidla ucpaný ztuhnutou lávou, která má funkci mohutné zátky. Proto plyny a vodní páry unikají bočními puklinami na svazích vulkanického kuželu (Hovorka, 1990).

Strombolský typ erupce

Malý sopečný ostrov Stromboli, který se nachází v Tyrhénském moři a patří do skupiny Liparských ostrovů v Itálii, je tvořen stejnojmennou aktivní sopkou. Vulkán tohoto ostrova dal název charakteristickému typu vulkanické erupce a s Vulcanem je důkazem toho, že v rámci jedné skupiny vulkánů mohou existovat různé formy aktivity. Nedosahuje výšky ani 1000 m a je nejvyšším aktivním vulkánem Evropy, na dně moře se tyčí do výšky 3500 m. Stromboli má téměř ideálně kuželovitý tvar. Ostrov je poměrně osídlený (kolem 1000 obyvatel).

Charakteristická je světlá barva oblaků, které tvoří převážně vodní pára a nízký obsah sopečného popela. Oblaka nedosahují velkých výšek a jednotlivé úniky páry doprovází mírný sykot. Je zde mírná, zato stálá, aktivita vulkánu. Ta trvá v podstatě nepřetržitě už dva a půl tisíciletí, proto je z celosvětového hlediska unikátní. Do této skupiny se také zařazuje vulkán Paricutín v Mexiku svou aktivitou v roce 1943 (Hovorka, 1990).

Islandský typ erupce

Vzorem pro oblast vulkanické aktivity tohoto typu je Island, ostrov ledu a ohně, který leží v severní části Atlantského oceánu s asi 250 000 obyvateli. Plochu ostrova tvoří v 99% vulkanická hornina a přibližně 13% plochy ostrova je pokryto ledovci.

Vulkanická činnost probíhala během celé historické doby. Rozsáhlá vulkanická aktivita na Islandu způsobuje „přehřátí“ ostrova a tím vznikají početné horké prameny. Nejznámějším vulkánem je Hekla, která je stále aktivní v posledním tisíciletí. Výlevy jsou poměrně klidné, lávy obsahují nízký podíl vulkanických plynů a vodních pár (Hovorka, 1990).

Havajský typ erupce

Podmořský havajský hřbet v Tichém oceánu patří k nejmohutnějším pohořím na Zemi, je téměř 3000 km dlouhý. Vrcholy ostrovních vulkánů dosahují 9000 až

9500 m, a tím převyšují vrcholy Himalájí. Mauna Kea je nejvyšším vulkánem na Zemi. Ostrov Havaj, který tvoří 5 vulkánů, se vyznačuje velmi mladými formami reliéfu, což je důsledek permanentního omlazování povrchu ostrova stále novými lávovými proudy, které modelují jeho povrch

Charakteristický znak pro havajský typ erupce je pomalé vytékání velmi řídké lávy ze širokého nízkého kráteru (Hovorka, 1990).

Katmajský typ erupce

Katmajská skupina vulkánů na Aljašce je dána velmi mladými aktivními sopkami. Katmajský typ je pojmenován podle nejpodrobněji popsaném aktivním vulkánu z roku 1912. Šlo o několik silných erupcí v krátkém časovém období, které měly podobný charakter jako erupce vulkánu Mt. Pelé (Hovorka, 1990).

4.2 Stupnice síly sopečných výbuchů

Podobně jako při zemětřesení se i pro hodnocení síly sopečné erupce používá osmibodová stupnice. VEI (Volcanic Explosive Index) neboli index vulkanické explozivity hodnotí celou řadu kritérií, z nichž nejvýznamnější je objem vyvrženého materiálu (Novák, 2010).

Hodnotí také to, do jaké výšky byl sopečný materiál vyvržen, a jak dlouho erupce sopky trvala. Stupnice VEI je logaritmická, to znamená, že nárůst o jeden bod nám říká, že erupce je 10x silnější než erupce předchozího stupně. Stupnice tohoto indexu je v rozmezí 0-8. Stupeň nula znamená, že se nejednalo o explozivní erupci a objem vyvrženého materiálu byl menší než 10 000 krychlových metrů. Naopak stupeň 8 představuje katastrofickou erupci pro celou planetu, při které je vyvržený 1000 km³ a sopečný oblak je vyvržen do výšky 50 km. Příkladem této erupce je americký Yellowstone 640 tisíc let před naším letopočtem. Tato obrovská erupce měla dopad na celou planetu a výrazně změnila klima (<https://sites.google.com/site/vulkanizmus/klasifikace>).

Stupeň 1

Objem vyvrženého materiálu je menší než 10 000 krychlových metrů, erupce je neexplozivní, láva se volně vylévá, škody jsou obvykle malé. Příkladem tohoto stupně je například sopka Mauna Loa na Havaji (Novák, 2010).

Stupeň 2

Objem vyvrženého materiálu je 10 tisíc až milion krychlových metrů, výška mraku nad sopkou nepřevyšuje jeden kilometr. Erupce jsou pravidelné, časté, bez větších škod. Takovým způsobem sopčí například Stromboli v Itálii (Novák, 2010).

Stupeň 3

Sopka vyvrhne milion až 10 milionů krychlových metrů materiálu, výška mraku dosáhne 1 až 5 kilometrů. Týká se to například hory Galeras v Bolívii (1992) (Novák, 2010).

Stupeň 4

Objem vyvrženého materiálu je 0,1 až 1 kilometr krychlový a dostává se do výšky 10 až 25 kilometrů, až do stratosféry, což může ovlivnit klimatické podmínky. Ke katastrofám tohoto rozsahu dochází v průměru jednou za 10 let. Tímto stupněm dosahoval vulkán Galunggung v roce 1982, který se nachází na Západní Jávě v Indonésii (Novák, 2010).

Stupeň 5

Objem vyvrženého materiálu je 1 až 10 krychlových kilometrů, dostává se do výšky větší než 25 km. Příkladem může být výbuch Vesuvu, který roku 79 zničil Pompeje, nebo výbuch Mt. St. Helen z roku 1980 (Novák, 2010).

Stupeň 6

10 až 100 krychlových kilometrů vyvrženého materiálu ve výšce větší než 25 kilometrů znamená katastrofu s globálními důsledky. Tuto sílu měl například výbuch trhlinového systému Laki roku 1783. K podobným jevům dochází méně než jednou za století, za posledních 10 tisíc let došlo asi k 50 katastrofám tohoto typu. Tento stupeň výbuchu byl také u popisované Krakatoy (Novák, 2010).

Stupeň 7

Anglosaské tabulky takovou explozi popisují jako "superkolosální", do výšky přes 25 kilometrů je při ní vyvrženo 100 až 1000 krychlových metrů sopečných hmot. Dochází k ní méně než jednou za tisíciletí. Naposledy takto vybuchla Tambora roku 1815 (Novák, 2010).

Stupeň 8

Vyvrženo je více než 1000 krychlových kilometrů materiálu do výšky přes 25 kilometrů, za posledních 10 tisíc let k takové erupci nedošlo. Nejmladší "megakolosální" výbuch tohoto typu předvedla před 26,5 tisíci lety sopka Toba na Sumatře (Novák, 2010).

4.3 Frekvence erupcí

Předpokládá se, že erupce větších rozměrů budou probíhat s ubývajícím frekvencí. Jelikož akumulace materiálu i dostatečného tlaku sopečných plynů, které z velké části určují povahu exploze, vyžaduje delší čas pro vyšší intenzitu činnosti sopky.

VEI	Objem materiálu (km ³)	Frekvence	Příklad
1	0,0001-0,001	denně	Mauna Loa
2	0,001-0,01	Týdně	Stromboli
3	0,01-0,1	Několikrát za měsíc	Galeras
4	0,1-1	1 let	Galunggung
5	1-10	10 let	St. Helens (1980)
6	10-100	100 let	Krakatoa (1883)
7	100-1000	1 000 let	Tambora (1815)
8	>1000	10 000 let	Toba

Tab. 1: Závislost množství materiálu produkovaného při sopečné činnosti na možné frekvenci opakování erupce o stejné intenzitě

Jak již bylo zmíněno, erupce se stupněm 8 má katastrofální důsledky. Od ordoviku do pleistocénu je do dnešního dne známo celkem 47 erupcí se silou 8 podle indexu VEI (*tab. 1*). Sopka Krakatoa pro rok 1883 má index 6, tedy frekvenci jednou za 100 let a objem 10-100 km³. Nejnovější vulkán s explozivní silou VEI 8 je Lake Taupo před 26 500 lety. To znamená, že v holocénu (posledních 10 000 let) neproběhla žádná taková erupce a vzhledem k tomu, že četnost těchto výbuchů je průměrně jednou za 10 000 let, je možné, že v blízké době nás může potkat podobně silná erupce (<https://sites.google.com/site/vulkanizmus/klasifikace>).

4.4 Vliv sopečných výbuchů na klima

Pokud erupce vyvrhne částičky popela a sopečné plyny až do stratosféry, vzdušné proudy v těchto výškách (tzv. jet stream) je roznesou kolem celé planety. Tam odrážejí paprsky zpět do vesmíru. Mezi sopečnými plyny sice jsou i takové, které způsobují skleníkový efekt (včetně CO₂, vodních par a metanu), převažují ale složky, které klima ochlazují. Na prvním místě je oxid siřičitý, který dlouhodobě zůstává ve stratosféře a nedovolí slunečním paprskům proniknout (Novák, 2010).

Sopečné výbuchy většinou vnímáme jako hroživou přírodní katastrofu, ale mají i své výhody. Sopakám vděčíme za to, že se v uplynulé dekádě Země ohřála méně, než mohla. V letech 2000 až 2010 se průměrná koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře zvýšila o více než 5%. Emise sopečných plynů chladí nebo ohřívají planetu, zatímco emise skleníkových plynů z lidské činnosti jen nadále ohřívají. Oxid uhličitý je jedním z hlavních skleníkových plynů, ale vzestup globální teploty byl nižší, než by se dalo očekávat. Odborníci tento jev připisují stratosféře, v níž zmohutněla vrstva aerosolu. Od roku 2000 se optická hloubka stratosférické vrstvy zvýšila o 4 až 7 procent, což znamená, že stratosféra se tak stala „neprůhlednější“ než v předchozích letech a odrážela zpět do vesmíru více slunečních paprsků. Stratosférický aerosol vzniká z molekul oxidu siřičitého (SO₂), který vystoupá do výšky 20 až 30 kilometrů. Chemickými reakcemi se vytvoří kyselina sírová a kapénky vody, které odrážejí sluneční záření. Výsledky ukázaly, že za to, že se Země neohřála tak, jak by mohla, vděčíme malým až středním sopečným výbuchům, které jsou přirozeným zdrojem oxidu siřičitého (Neely et al., 2013).

4.5 Vulkanická zima

Jak už bylo popsáno, větší výbuchy sopek ovlivňují klima. Těmto výbuchům, které ovlivní a především ochladí naši planetu na několik následujících měsíců, ne-li let, říkáme vulkanická nebo také sopečná zima. Je to v důsledku vyvržení prachu a plynů do atmosféry. Na některých místech to může způsobit jen krátkodobé ochlazení, ale může vzniknout i delší období, kterému říkáme vulkanická zima. To mívá za následek například úbytek zemědělské produkce (Novák, 2011). Pokud dojde k velké sopečné erupci a sopečný popel a prach vyvržený při erupci do atmosféry přesáhne kritickou hranici, dojde ke zvětšení odrazivosti zemské atmosféry pro sluneční záření (<http://sopky.eu/sopecna-zima/>).

Zejména pokud se jedná o erupci super vulkánu, mohou být následky téměř katastrofální. Před 75 000 lety v Indonésii vybuchla sopka Toba, u které se vědci shodují, že v důsledku sopečné zimy došlo ke snížení 5 – 10 tisíc obyvatel (<http://sopky.eu/sopecna-zima/>). Okolo roku 1650 př. n. l. explodovala v Egejském moři ostrovní sopka Théra a odhaduje se, že vyvrhla do atmosféry 40 až 100

krychlových kilometrů prachu, popela a dalších hmot. Svět východního Středomoří zahalila tma protínaná blesky, sopečné pumy dopadaly do vzdálenosti desítek kilometrů, mořem se přehnaly vlny tsunami vysoké až sto metrů. V následujících dnech a týdnech pak materiál z vulkánu pokryl krajinu v širokém okolí. Z nebe neustále padal žhavý prach nebo liják smíšený s bahnem. Další roky byly bez léta, počasí zešílelo, půda nerodila, hospodářská zvířata pošla. Brzy přišel hlad a nemoci (Novák, 2011).

Z novodobějších výbuchů můžeme popsat sopku Krakatou, která ovlivnila klima především v roce 536, ale změny se projevily i po roce 1883. Dále v roce 1991 sopka Mount Pinatubo snížila globální teploty v následujících třech letech. Vhodným příkladem je také sopka Tambora, rok 1816 je označován jako *Rok bez léta* (<http://sopky.eu/sopecna-zima/>).

5. Neznámá sopka z roku 536

V letech 535-536 našeho letopočtu bylo lidstvo zasaženo jednou z největších přírodních katastrof vůbec. To způsobilo snížení světla a tepla ze Slunce po dobu osmnácti měsíců, klima celé planety se vymykalo kontrole. Výsledek byl klimatický chaos, hlad, migrace, války a masivní politické změny na všech kontinentech (Keys, 2000).

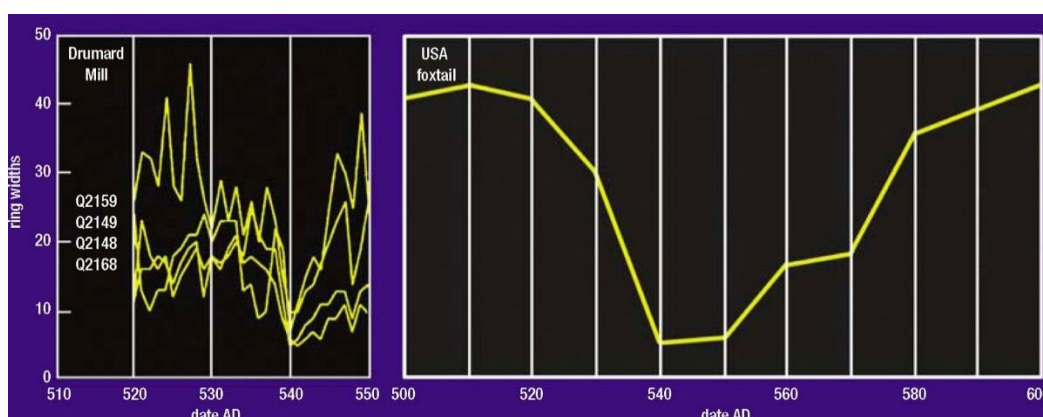
Jávská *Kniha králů*, jejímž autorem je jávský básník Raden Ngabahi Ranggawarsita, píše o výbuchu hory Kapi z roku 416, která rozdělila dříve jeden ostrov na Jávu a Sumatru. Místo výbuchu hory je stejné jako nynější sopka Krakatoa, proto vše nasvědčuje tomu, že šlo o výbuch vulkánu Krakatoa, který se proslavil jednou z největších sopečných erupcí v roce 1883 (Novák, 2011). Pro rok 416 však nemáme dostatek důkazů- není dostatek prachu z ledovcového odběru, vzorky ze světových pralesů neukázaly, že by došlo na začátku pátého století k sopečnému výbuchu kdekoliv na Zemi. Míra chybovosti pomocí těchto technik je v rozmezí plus nebo minus dvacet pět let, což znamená, že výbuch s velkou pravděpodobností nenastal roku 416. Nicméně tu je množství důkazů, že došlo k nějaké události o století později. Z rozsáhlých souborů letokruhů a ledového jádra na celém světě byly

sebrány důkazy, že výbuch nastal v oblasti Jávy a Sumatry okolo roku 536 (Winchester, 2004).

Když máme potvrzeno, že v roce 536 nastala událost, která způsobila významnou klimatickou změnu, byly tu dvě teorie, co způsobilo tuto změnu. První myšlenka byla založena na výbuchu obří „super“ sopky, na které se většina teorií shoduje. Druhý scénář byl popsán jako náraz asteroidu nebo komety (Rigby et al., 2004).

Můžeme tedy neznámou sopku z roku 536 považovat za starou Krakatou? Mnohé důkazy této erupce jako vrty z ledovců, měření v mořském dně, ale i záznamy z Číny nasvědčují tomu, že neznámá sopka byla předchůdce Krakatoy. Starověcí čínští astronomové si všímají atmosférického oparu, který jim ztěžuje pozorování hvězd. V Číně se také objevuje sníh a mráz a s tím související hladomor díky neúrodě (Soukupová, 2013).

Na obr. 2 vidíme výsledky letokruhů dubu z irských rašelinišť a amerických borovic. Ukazují chladnější období než průměry před rokem 536. Podobné důkazy jsou u finských borovic a v jiných zemích světa. Studie naznačuje, že událost začíná v roce 536 a trvá až do roku 545. Dva až tři roky po výbuchu vypovídají o nejchladnějším období za posledních dva tisíce let. Čínské záznamy odkazují na letní mrazy a ztemnělou oblohu (Rigby et al., 2004).



Obr. 2: Výsledek irských dubů (vlevo) a amerických borovic (vpravo)

Druhá hypotéza podle *Rigby et al. (2004)* ukazuje, že teorie o výbuchu sopky má několik problémů. Za prvé si nemyslí, že by nějaký vulkán mohl být spojován s touto událostí a za druhé u super vulkánů se očekává, že významně ovlivní kyselost

v atmosféře. Tato kyselost by byla zaznamenána v polárních ledovcích. Četné ledovcové studie byly provedeny v Grónsku a na Antarktidě, žádné však podle těchto autorů nenašly důkazy o významné vrstvě kyseliny kolem roku 536, které by byly způsobeny erupcí (Rigby et al., 2004).

5.1 Důsledky výbuchu

Naopak *Novák (2011)* ve své knize píše, že letokruhy stromů a vrtná jádra z ledovců ukazují, že tehdy došlo k největšímu krátkodobému ochlazení klimatu za poslední dvě tisíciletí. Vědci se nejdříve domnívali, že příčinou mohl být pád asteroidu nebo komety do neobydlených míst planety. Vrty ledovců nám ale prozradily něco jiného: ve vrstvách z let 535 a 536 se nachází výrazně zvýšené množství síry. To není typické pro kosmické těleso, ale je to důkaz pro výbuch sopky. Dnes se má za to, že je to důsledek takzvané vulkanické zimy. Prach vyvržený explozemi do atmosféry a dým z požárů způsobí zastínění slunce, odrazení většího množství slunečních paprsků zpět do vesmíru a následkem toho dramatické ochlazení klimatu (Novák, 2011).

Hypotéze o sopce nasvědčují i další indicie. Historická data v čínských kronikách zaznamenávají neobvyklé intenzivní bouře. Prašné bouře jsou běžné v severní Číně na jaře, ale mnohem méně obvyklé jsou v jižní Číně. Během období 500-560 čínské kroniky zaznamenaly čtyři události týkající se prachu, z nichž všechny byly v jistém smyslu neobvyklé. První tři zvláštní události se konaly v závěru roku 536. Další se konala v roce 537 „v sezóně“, což by bylo považováno za normální, kdyby žlutý popel nepršel z bezmračného nebe. Proto i tato událost byla zaznamenána (Keller et Kerr, 2014).

V Číně v roce 536 bylo sucho a hladomor, žlutý prach padal jako sníh a následující rok byly zničeny plodiny v polovině srpna kvůli sněhu. V Japonsku dokonce vydal císař prohlášení, že ze zlata a peněz se nemůže vyléčit hlad. Na začátku roku 537 v devíti provinciích v severní Číně sucho pokračovalo, ale bylo přerušováno krupobitím. Pak konečně v roce 538 sucho skončilo, ale klimatologický chaos pokračoval - byly tam obrovské povodně (Keys, 2000).

Ve stejném roce, jako byly klimatické pohromy v Číně, proběhly podobné klimatické pohromy i na Korejském poloostrově. Podle záznamu korejské historie se zdá, že šesté století bylo začátkem doby klimatického chaosu na poloostrově. Klima v letech 535-542 se zařadilo mezi nejhorší změny počasí v Koreji během celého šestého století. V roce 535 a 536 byly v Koreji nejhorší léta tohoto století s masivními bouřkami, záplavami následované obdobími sucha (Keys, 2000).

V Severní a Jižní Americe se situace vyvíjela podobně. Začalo to v první polovině 6. století a způsobilo třicet dva let trvající sucho, to zdevastovalo části Jižní Ameriky. V Severní Americe analýzy letokruhů ukazují, že některé stromy prakticky přestaly růst v roce 536. Až po třidvaceti letech se vše navracelo do normálu, tedy v roce 559. Podobné důkazy z letokruhů jsou ze Skandinávie a západní Evropy, kde se také odhaduje obrovské snížení růstu stromů v letech 536-542 (Keys, 2000).

Procopius, římský historik, zaznamenává, že „Sluneční světlo bylo bez jasů, stejně jako Měsíc v průběhu celého roku a zdálo se, jako by bylo Slunce v zatmění,“ (Dewing, 1916). Michael Syrský uvádí, že „Slunce bylo temné a jeho temnota trvala osmnáct měsíců. Každý den svítilo asi čtyři hodiny, přesto toto světlo bylo jen slabý stín. Plody nedozrávaly a víno chutnalo jako kyselé hrozny,“ (Keller et Kerr, 2014).

Podle anonymního autora v Konstantinopoli v roce 536 Slunce začalo tmavnout přes den a Měsíc v noci od 24. března tohoto roku do 24. června v následujícím roce. Stmívání bylo méně závažné a kratšího trvání ve vyšších zeměpisných šířkách. Obecně z toho vyplývá, že atmosféra byla naplněna jemným prachem z neznámého zdroje. Sopečný popel je propagovaný jako primární zdroj tohoto prachu (Keller et Kerr, 2014).

Jiní kronikáři z té doby popisují mnohem zlověstnější jevy objevující se po celém tehdy známém světě: prach padající z nebe, neobvykle husté suché mlhy, sněžení uprostřed léta, dlouhodobá sucha. Po těchto jevech následovaly obrovské neúrody, hladomory, epidemie a války. Znamky podvýživy jsou viditelné dokonce i na kostrách z hrobů předkolumbovských kultur v Americe (Novák, 2011).

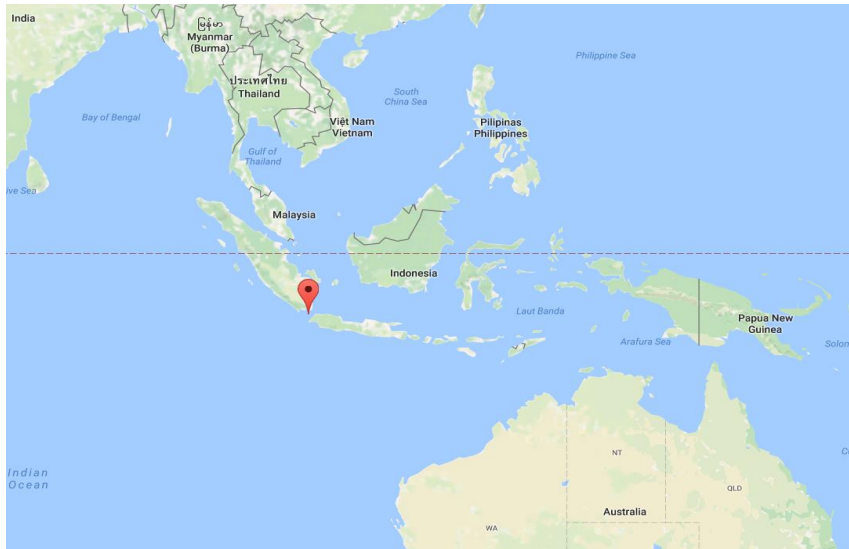
V letech 536 až 541 došlo k náhlému ochlazení také na severní polokouli. Archeologické údaje ukazují, že tato událost způsobila neúrodu a demografický

pokles. Trvalo to nejméně do konce devátého století, než se populace vrátila na předchozí úroveň. Magnus Aurelius Cassiodorus napsal v roce 536 nebo v roce 537, že došlo k zatmění téměř během celého roku a píše: „Měli jsme zimu bez bouří a léto bez tepla.“ (Tvauri, 2014).

Po explozi nemusely být změny jen přírodního charakteru jako osvětlená obloha podivným žářem nebo padající pemza z mraků, ale můžeme se domnívat, že souvislost s tímto výbuchem může být zdánlivě nesouvisející. Klimatické změny vyvolané erupcí pomohla přinést řadu zcela apokalyptických událostí: pád říše římské, vypuknutí velké epidemie, zrození islámu, invaze barbarů do Evropy (Winchester, 2004).

6. Krakatoa v roce 1883

Krakatoa je jméno činného vulkánu na sopečném ostrově dnes známém jako Anak Krakatau. Najdeme ho v Sundském průlivu mezi indonéskými ostrovy Jávou a Sumatrou (obr. 3). Není to jediná činná sopka v téhle oblasti, v celé Indonésii je jich dnes přibližně 130. Samotná Krakatoa leží mezi dvěma litosférickými deskami-euroasijskou a indoaustralskou. Před rokem 1883 byl ostrov 9 km dlouhý a 5 km široký a nacházely se na něm celkem tři sopečné kužely: Rakata, na jihu, která měřila 820 m, Danan, ve středu ostrova dosahovala 450 m a nejnižší sopka na severu Perboewatan se 120 m. Kolem ostrova jsou dva menší ostrovy Lang a Verlaten (Brzezina, 2014).



Obr. 3: Umístění sopky Krakatoa je mezi ostrovy Jávou a Sumatrou v Indonésii

V Indonésii je spousta nebezpečných sopek. Nikde jinde na světě nežije tolik lidí blízko aktivních vulkánů, jako na ostrovech jihovýchodní Asie, táhnoucí se od Sumatry k Austrálii, mezi Indickým a Tichým oceánem. Oblouk, na kterém leží jeden vulkán za druhým, je dlouhý pět tisíc kilometrů a je na něm celkem tři sta sopek, z nichž 129 je aktivních, tedy více, než v kterékoli jiné zemi na světě (Jung-Hüttlová, 2006).

6.1 Před výbuchem

Sopka Krakatoa v květnu roku 1680 do listopadu 1681 intenzivně vybuchovala. Po těchto odezvách v 17. století sopka dvě století spala (Morgan, 2009). Od roku 1681 do výbuchu v srpnu 1883 byla považována za vyhaslou. Nový cyklus vulkánu začal v roce 1877 zemětřeseními (Hovorka, 1990).

Průběžná varování přicházela už několik let před sopečnou aktivitou Krakatoy. Roku 1880 postihlo Jávu silné zemětřesení, které naznačovalo, že se v podzemí něco děje. Otřesy se dostavovaly i v následujících letech. Můžeme odhadovat, že právě otřesy a zemětřesení uvolnilo žhavému magmatu cestu ze středu Země blíže k povrchu (Novák, 2011). Od března 1883 Krakatoa začala vyvrhovat vulkanický

popel (Hovorka, 1990). Následovaly menší výbuchy sopky, které po květnu roku 1883, stále sílily a běsnění hory nabývalo na intenzitě (Novák, 2011). Místní obyvatelé to brali na vědomí, ale nebyli nijak zděšení. 27. května se ozvaly během noci dost silné výbuchy, které byly doprovázeny zemětřesením. Erupce pokračovaly v červnu a v červenci (Morgan, 2009). 20. července se na ostrově objevil nový kráter a k němu postupně přibývaly další. Země se chvěla téměř neustále a nad hlavním jícnem vrhající sopečný popel už nepřetržitě stál vysoký sloup dýmu (Novák, 2011).

Byl tu všudypřítomný sopečný prach, který zahalil krajinu pod sebou do šera. Jeho částičky se nabíjely statickou elektřinou, která bičovala okolí sopky klikatými blesky. Lodím v Sundském průlivu přestávaly fungovat kompasy a jejich stěžně i paluby zalévalo přízračné světlo tichých výbojů, což bylo způsobeno elektrickým polem v atmosféře. Z nebe se neustále sypal jemný popel, pokrýval vše- rostlinstvo, ulice, domy a nakonec změnil svět na šedavý obraz. Strach obyvatel Jávy a Sumatry rostl. Najednou sopka polevila ve své ničivé činnosti a erupce se stále zmenšovaly a mezi mraky se znovu objevilo slunce. Lidé věřili, že to nejhorší mají za sebou (Novák, 2011).

6.2 Průběh výbuchu

Největší exploze sopky proběhla 27. srpna 1883, nejdříve 5.30 h, poté 6.42, v 8.20 a poslední nejděsivější výbuch v 10.02, v tu dobu do vzduchu vyletěl prakticky celý ostrov, který měl rozlohu kolem 15-20 km². Rozdíl před a po výbuchu můžeme vidět na *obr. 4*. Následně vznikla kaldera pod hladinou moře s poloměrem asi 6 km. V důsledku exploze vulkánu vznikly tsunami vysoké 30-40 metrů, které zaplavily přilehlé pobřeží Jávy a způsobily utopení několika desítek tisíců obyvatel. Odhady se pohybují v mezích 35 000-40 000 obětí. Na jižním pobřeží Sumatry padal vulkanický popel, který způsobil popáleniny tisícům obyvatel (Hovorka, 1990).

Výbuch, který byl slyšet až ve vzdálenosti 4700 km, vystřelil popel do výšky 80 km a ještě 150 km od místa výbuchu se otřásala okna mohutnou tlakovou vlnou. 16 km³ sopečné hmoty pak spadlo v okruhu až 3000 km od Krakatoy (Jakeš, 1984).

Naráz zahřmělo tisíc hromů, byl to nejsilnější zvuk, jaký na Zemi nezazněl za posledních několik tisíciletí. Pro mnoho obyvatel okolních ostrovů to bylo to poslední, co v životě slyšeli. Zvuk exploze byl zaznamenán na místech vzdálených několik tisíc kilometrů od Srí Lanky po Austrálii. Barografy meteorologických stanic po celém světě vypovídají o tom, že tlaková vlna exploze oběhla naši planetu dvanáctkrát (Novák, 2011).



Obr. 4: Zobrazení ostrova Krakatoa (zleva)- před výbuchem v roce 1883, po výbuchu a po roce 1927

7. Následky výbuchu z roku 1883 a jeho vliv na klima

Exploze sama o sobě byla úžasná, monstrózní věc, která láká nespočet lidí, bohužel to byla také jedna z nejničivějších sopečných událostí v historii. Zabila více než 36 000 lidí. Předpokládá se, že Krakatoa byla zatím pátou nejničivější sopkou po Tobě v Indii, Tamboře v Indonésii, Taupo na Novém Zélandu a Katmai na Aljašce, alespoň co se týče vyvrhnutého materiálu do atmosféry. V dnešní době, ve světě technologií, bychom se dozvěděli o výbuchu velmi rychle. V 19. století se lidé jenom těžko dozvídali o událostech v jiné zemi nebo na jiném kontinentě. Dokonce i přes to, že se dozvěděli o katastrofě, lidé neměli tolik znalostí, aby si způsobené klimatické a geologické změny dali do souvislostí s explozí Krakatoy. Nedostali žádná vysvětlení, proč nastal zvrát (Novák, 2011).

Krakatoa vrhla do atmosféry sopečné plyny, které ovlivnily podnebí natolik, že snížily teplotu planety a změnily vzhled nebe (Winchester, 2004).

Ten největší výbuch ze srpna roku 1883 bylo slyšet na vzdálenost 4700 kilometrů, oblohu téměř na polovině zeměkoule pokrýl jemný popel a porézní

sopečné bomby plavaly v mnoha oceánech ještě několik měsíců po výbuchu (Jakeš, 1984).

7.1 Vlna tsunami

Příčinou tsunami mohou být sesuvy na mořském dně, podmořské výbuchy, ale také výbuchy vulkánů, jak tomu bylo i v případě výbuchu sopky Krakatoa v roce 1883 (Jakeš, 1984).

Nejvíce obětí měla na svědomí právě vlna tsunami zdvižená závěrečným kolapsem sopky do výšky až 40 metrů. Odhaduje se, že z celkových 36 417 mrtvých, o nichž mluví oficiální zpráva holandských úřadů, si vzala celých 90 procent tsunami. Opravdový počet obětí, které má vlna za následek, se nikdo nedoví. Není mnoho lidí, kteří přežili setkání s vlnou tsunami. Jeden z domorodců, kterého vlna zastihla ve vnitrozemí 7 kilometrů od oceánu nedaleko města Merah, řekl: „Najednou jsme uslyšeli strašlivý zvuk. V dálce jsme uviděli obrovskou vysokou černou věc, jak se k nám rychle blíží. Brzy jsme poznali, že to je gigantická vodní stěna pohlcující domy a stromy. Začal divoký běh o život. Nedaleko byly strmější svahy, tak jsme všichni utíkali tím směrem. Pro mnohé ale byla vlna příliš rychlá a nestačili ji utéct. Na jednom místě se mnoho lidí natlačilo do úzké průrvy vedoucí vzhůru. Vzájemně se tam zaklínili a nemohli dál. Křičeli a naříkali, ti dole zuřivě mlátili do nohou těch, co byli nad nimi, nastal hrozný zápas o přežití, zatímco divoká voda si je brala jednoho po druhém. Někteří se snažili zachytit ostatních, tím je strhávali s sebou a víry je společně odnášely pryč. Ještě dnes se dají na svazích hor rozpoznat místa, kde k těmto zoufalým bojům o život docházelo.“ (Novák, 2011).

Tyto ohromné mořské vlny, vzniklé při výbuchu, zničily na 300 měst a vesnic. V oblastech, které byly zpustošené po tsunami, se výrazně změnilo mikroklima kvůli suchu (Jakeš, 1984).

7.2 Půda po erupci

Jak už bylo zmíněno, půda v okolí sopky je velmi příznivá pro zemědělství. Je-li podložním substrátem vulkanický popel, lze na místě, kde popel napadl, už za pouhé dva nebo tři roky pěstovat rostliny. Po výbuchu sopky Krakatoa stačilo pouhých 54 let, aby se vytvořila pětaticentimetrová vrstva půdy. Ne všechny oblasti jsou tak příznivé pro vznik půd jako sopečné, vlhké a teplé oblasti. Například ve stepích nebo pouštích se vytvoří za tisíc let vrstva sotva centimetrová (Jakeš, 1984).

7.3 Změna klimatu

Tato erupce se také ukázala být zlomem v historii studia atmosférických dynamik. Na rozdíl od předešlých výbuchů sopek, jako například Tambora v roce 1815, existovala v roce 1883 telegrafní síť, která zprostředkovala sledování události v téměř reálném čase, což umožnilo vědecké komunitě ihned zahájit zkoumání. K finálnímu zničení ostrova došlo okolo 10 hodin ráno lokálního času 27. srpna a finální exploze byla slyšitelná 3000 km daleko. Vyvinula infrasonický tlakový pulz, který byl zaznamenán barografy okolo celého světa. To umožnilo sledovat výskyt čela vlny kolem celého světa minimálně třikrát, objevujíc se na jakékoliv stanici v 33 hodinových intervalech (Hamilton, 2012).

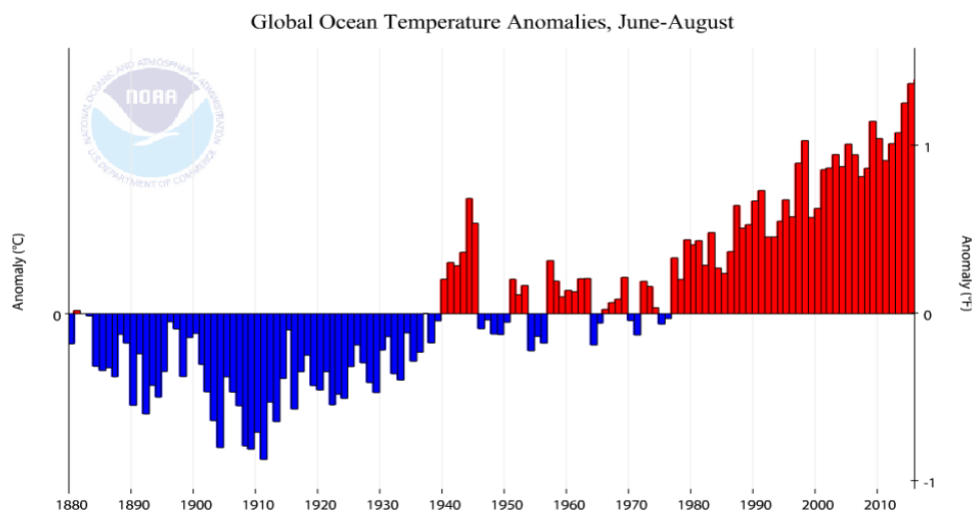
Velké sopečné erupce ovlivňují klima v různých směrech. Globální ochlazování vyvolané silnými erupcemi, může dočasně vyvážit trend globálního oteplování. Ve skutečnosti geoinženýrské metody napodobují trvalé vulkanické erupce, které jsou navrženy s cílem bojovat proti antropogennímu skleníkovému efektu. Nicméně sopečný účinek je mnohem složitější než pouhá globální ochlazení. Sopečné výbuchy mohou změnit proudění v atmosféře, hydrologický cyklus a teplotu oceánu komplexně po několik měsíců až let. Na základě současných znalostí o působení velkých erupcí na atmosféru je zkoumání do značné míry založeno na erupci Pinatubo z června 1991. Odhaduje se, že globální ochlazení sopečnou erupcí Krakatoy mohlo být kolem 0,5-1°C. Povrchové teploty během první zimy po erupci vykazují výrazné zimní oteplení v celé Evropě, naopak velmi nízké teploty v Severní

Americ. Teplota vzduchu v létě ukazuje mírné ochlazení v dvou následujících letech (Brönnimann, 2009).

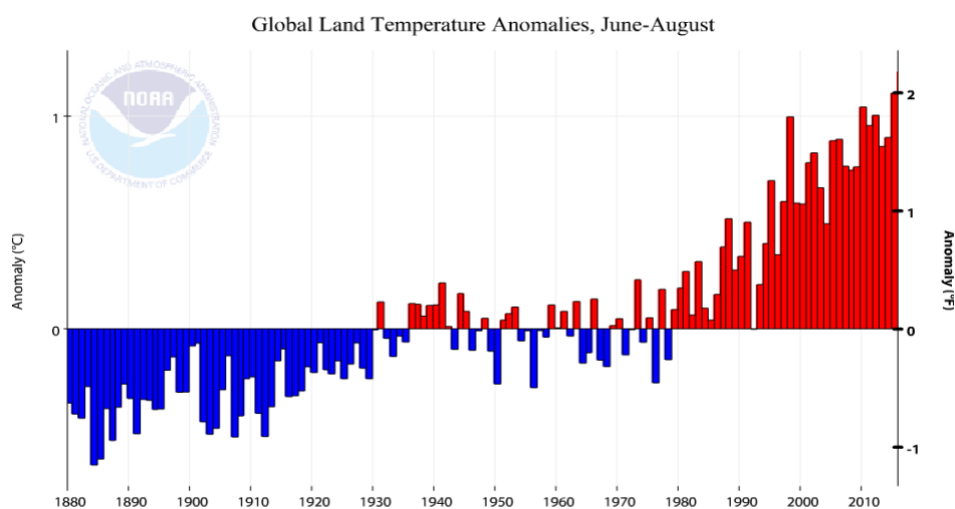
Erupce na indonéském souostroví dne 27. srpna 1883 vyprodukovala velké množství sopečného popela vysoko do atmosféry. Jeho šíření a opakované cestování kolem Země vedlo k silnému a trvalému východnímu větru s maximem kolem 34 ms^{-1} (Hastenrath, 2006).

Probíhala různá pozorování, z nichž je zřejmé, že globální teploty oceánu se zvýšily za posledních padesát let. Globální průměrná hladina moře stoupla v důsledku oteplování oceánu, s přídavným vzestupem mořské hladiny z tání ledovců. Použitím výsledků z experimentu na modelování klimatu zkoumá studie vliv sopečné erupce na oteplování oceánu a související tepelné roztažnosti, ukázaly, že erupce sopky Pinatubo v roce 1991 vedla k rychlému snížení množství tepelné složky v oceánu a střední hladiny moře se zpětným získáváním trvajícím až deset let. Také potvrzuje, že vulkanické erupce by mohly mít výraznější a déle trvající účinky, zejména erupce sopky Krakatoa v roce 1883. Vše naznačuje tomu, že historické erupce byly dostačující k vyrovnání velké části zvyšujícího se množství tepelné složky a střední hladiny moře způsobené antropogenními vlivy v průběhu 20. století. Sopečné aerosoly rozptylují a absorbují sluneční světlo, což snižuje celkový čistý tepelný tok vzduchu a moře, který má za následek nízké teploty mořské hladiny a postupně se tak prolíná do hlubších vrstev. Modely průzkumů ukazují, že rychlé snížení tepelné složky v oceánu vzniklo po erupcích Agung (1963), El Chico'n (1982) a Pinatubo (1991). Doba trvání tohoto poklesu je mnohem kratší, než u Krakatoy. Důvodem mohlo být, že ve 20. století vzniklo větší antropogenní znečištění a tím i horší skleníkový efekt, který otepluje planetu. Proto v 19. století při výbuchu Krakatoy trvalo déle ohřátí oceánu (Gleckler, 2006).

Z *obr. 5 a 6* je patrné, že průměrná teplota oceánu i půdy se po roce 1883 výrazně snížila. Průměrná teplota oceánu se snížila o $0,2^{\circ}\text{C}$ a toto snížení trvalo čtyři roky. Také je z obrázku dobré poukázat na to, že v druhé polovině 20. století se obrovsky zvýšila teplota oceánu. Průměrná teplota půdy byla v roce 1881 $-0,40^{\circ}\text{C}$, v roce 1882 $-0,42^{\circ}\text{C}$, v roce 1883 $-0,27^{\circ}\text{C}$ a v roce 1884 už $-0,64^{\circ}\text{C}$. Je vidět, že ochlazení po erupci Krakatoy trvalo kolem tří let.



Obr. 5: Globální anomálie teploty oceánu



Obr. 6: Globální anomálie teploty půdy

7.4 Bishopův kruh

Další velký příspěvek pozorování erupcí Krakatoy zahrnoval sledování atmosférického aerosolového mraku. Tento fenomén objevující se během západu Slunce je způsoben solární iluminací stratosférického aerosolu, a v obdobích po zásadních erupcích jsou často pozorovatelné pozoruhodné východy Slunce a prodloužené trvání západu slunce. Dnes již víme, že velké erupce produkují horké plyny a pevný aerosolový materiál, který může vystoupat do velkých výšek. Kdežto

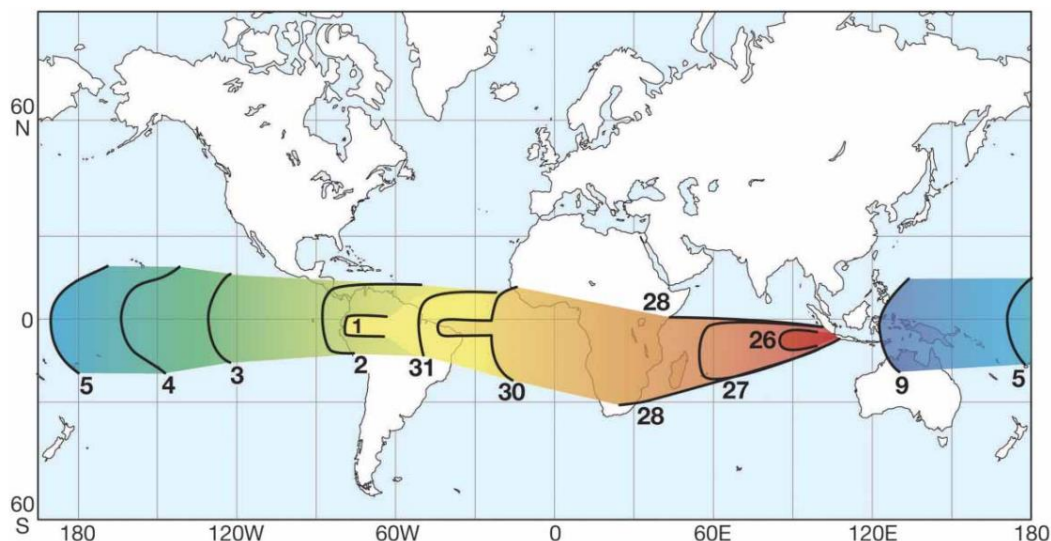
pevný aerosol většinou padá po pár prvních týdnech, dlouho trvající efekt je způsobený zvýšeným obsahem síry. Oxid siřičitý reaguje s vodní mlhou a vytváří tenkou vrstvu velmi malých kapek kyseliny sírové. Ty tam zůstávají, dokud nejsou vytlačeny do spodní atmosféry velkou rozměrnou cirkulací (proces o délce okolo dvou let). Reverend Sereno Bishop vydal jednu z prvních zpráv o neobvyklém optickém fenoménu následujícím po erupci Krakatoy. Později publikoval první ucelené pozorování, šíření aerosolového mraku ihned po erupci. Také popsal svatozář, připomínající jev kolem Slunce v období po erupci. Tomu se dodnes říká Bishopův kruh. Ten je způsobený difrakcí slunečního světla okolo velmi malých sférických kapek kyseliny sírové (Hamilton, 2012).

Tato svatozář kolem Slunce byla okamžitě spojena s globálním šířením sopečných úlomků vstříkujících do stratosféry (Sassen et al., 1994).

Bishopův kruh nebo také Bishopův prstenec poznáme podle červenohnědého prstence kolem Slunce s vnitřním červeným okrajem. Jeho vnitřní okraj má nejvíce úhlový poloměr kolem 10 až 20 úhlových stupňů. Tyto rozměry se zvětšují zejména při polohách slunečního disku nízko nad obzorem. Bishopův kruh byl poprvé popisován v literatuře na základě zkoumání S. Bishopa v Honolulu na Havaji roku 1883 devět dní po výbuchu Krakatoy a vedl ke jménu Bishopův prstenec (Bishop's ring). Jde o ohybový optický úkaz vznikající ohybem slunečních paprsků na konturách částic vulkanického popela rozptýlených ve vyšších hladinách atmosféry (Bednář, Popek, 2010)

Pozorovat Bishopův kruh mohli také 21. srpna 1884 v Uppsale ve Švédsku a o necelý rok později 4. května 1885 v Arnsbergu v Německu (Schröder, 1999).

Rollo Russell vypracoval souvislý obraz pohybu aerosolu v atmosféře, nejprve se mrak pohyboval zonálně v rozmezí od 20 stupňů severní šířky do 20 stupňů jižní šířky, za několik dalších měsíců se potom rozšířil do středních šířek. Nakreslil k tomu mapu, která ukazuje pozorování šíření mraku v následujících dvou týdnech po erupci Krakatoy (Hamilton, 2012).



Obr. 7: Šíření mraku aerosolu dva týdny po výbuchu sopky Krakatoa

Nejvíc nápadný aspekt mapy je rapidní západní směr šíření. Za předpokladu, že 10. září se mrak znovu pohyboval přes Krakatou, potom znovu obkroužil okolo celé Země za 15 dní, což odpovídá východnímu větru o rychlosti okolo 30 m/s (Hamilton, 2012).

Pokud srovnáváme erupci Krakatoy s erupcí sopky Pinatubo, erupce Pinatubo byla ve smyslu masы vystřelené do atmosféry větší než erupce Krakatoy. Vědci pozorovali prvotní průběh pomocí odražené solární radiace pomocí Advanced Very High Resolution Radiometer umístěného na satelitu NOAA. Došli k závěru, že aerosolový mrak obkroužil zemi ve zhruba 21 dnech (Hamilton, 2012).

7.5 Noční svítící oblaka

Noční svítící oblaka (*příloha 1*) se vyskytují v průběhu letních měsíců. Jsou tvořena z malých vodních částic vytvořených ve velmi chladné oblasti mezopauzy v horní části atmosféry. Vyskytují se převážně při soumraku či rozbřesku v 50° severní šířky (Thomas, Olivero, 2001).

Jsou složena z vody ledových krystalů 30 - 100 nm v okruhu, který rozptyluje dostatečné množství slunečního záření, a tím jsou noční svítící oblaka snadno vidět na tmavém soumraku (Dalin, 2012). Noční svítící oblaka (NLC- noctilucent clouds) se pozorují v létě ve výškách 82 až 85 km. Oblaka jsou spojena s extrémně nízkými

teplotami v letní polární menopauze. O trendech rozhodují koncentrace vodních par a teplota (Laštovička, 2010).

Po výbuchu Krakatoy nastaly intenzivní jevy po celém světě, například noční svítící oblaka, též pojmenována jako stříbřitá oblaka. Ta byla poprvé pozorována v roce 1885, tedy dva roky poté, co vybuchla Krakatoa. Největší otázkou je, zda se noční svítící oblaka objevila již před pozorovaným rokem 1885. Použitím různých literárních zdrojů a pozorovacích záznamů pro devatenácté století od několika pozorovatelů může být prokázáno, že před rokem 1885 noční svítící oblaka nikdy v literatuře popsána nebyla, jak můžeme vidět v *tabulce 2*. Je zřejmé, že zvýšené jevy se na obloze objevovaly, ale ne stříbřitá oblaka. Popisy ukazují mnoho proměnných barevných jevů: *zvýšené stmívání a v některých případech i tzv. jasné noci*. Proto můžeme tvrdit, že v roce 1885 byla noční oblaka prvně zaznamenaná a možná i objevena, protože se zdá nepravděpodobné, že zkušení pozorovatelé jako Riggenbach, Bezold, Hellmann, Kiessling a Jesse by přehlédli tak pozoruhodné jevy jako noční svítící oblaka (Schröder, 1999).

Zdá se, že sopka Augustine na Aljašce, která vybuchla 6. října 1883 a je zařazena podle VEI na stupnici 4, také mohla přispět k celkovému H₂O a aerosolu v atmosféře a tím vzniku NLC (Dalin, 2012).

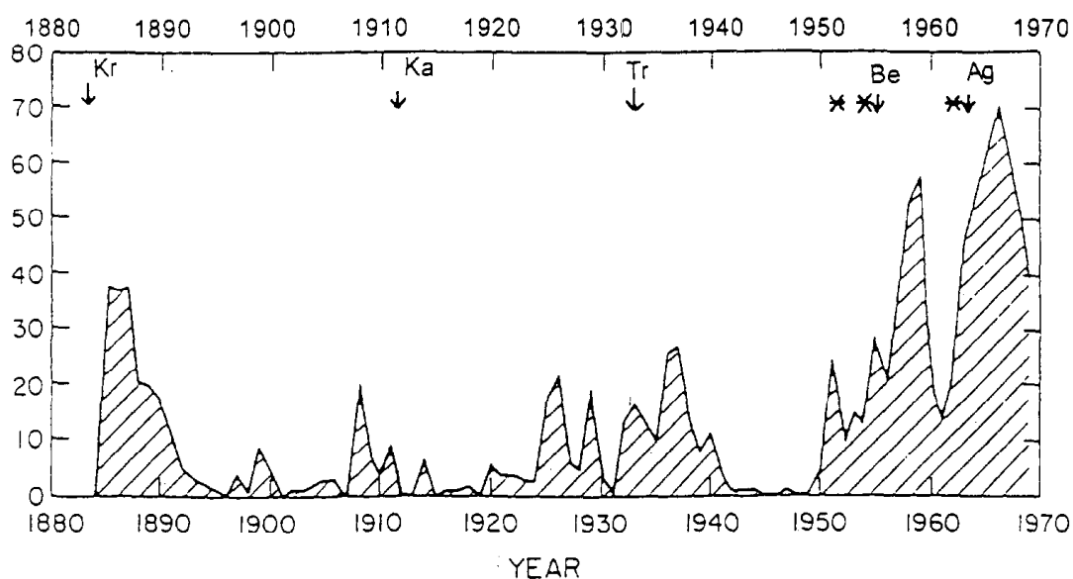
Datum	Místo	Obloha
1815	Sumbawa (Indonésie)	Žádný zvláštní fenomén
1821	Francie, Anglie	bílá mlha
1822	Aleppo (Sýrie)	Obloha barvy ohně
1828	Marburk (Německo)	Fenomén barevné oblohy
1829	Maďarsko	Červená oblaka
1831	Sicílie (Itálie)	Barevný fenomén
1831	Střední Amerika	Zvýšené sluneční barvy
1859	Australie	Nezvyklý soumrak
1860	Mount Baker (USA)	Žádné zvláštní jevy
1861	Afrika	Velký spád popela

1861	Vesuv (Itálie)	Nezvyklý soumrak
1862	Makjan	Žádné atmosférické jevy
1863	Klot (Jáva)	Rudá obloha
1863	Etna (Itálie)	Děšť popela
1880	Cotopaxi (Andy)	Zelená obloha

Tab. 2: Pozorování za soumraku v 19. století

Pozorovatelé v roce 1885 objevili stříbřité mraky, které spatřili na večerní obloze. Byly dobře rozpoznatelné a měly vlnovou strukturu s bílomodrou barvou. Jak můžeme vidět z *obrázku 6*, noční svítící oblaka se po erupci Krakatoy objevovala pravidelně. Na obrázku jsou také zaznamenány větší výbuchy sopek, které ovlivnily noční svítící oblaka, v roce 1912 to sopka Novarupta ležící na Aljašce v oblasti Katmai, Trident z roku 1975 též na Aljašce, Benzymjannyj na Kamčatce z roku 1955 a Agung v roce 1963 ležící na ostrově Bali v Indonésii (Schröder, 1999).

O několik dní později Otto Jesse, astronom z observatoře v Berlíně, a mnoho dalších pozorovatelů v Německu také sledovali tyto mraky na večerní obloze. Od té doby byla těmto mrakům věnována velká pozornost. Z analýz nejnovějších údajů vyplývá, že četnost výskytu nočních svítících oblak se zvýšila (Schröder, 1999).



Obr. 8: Výskyt noční svítící oblaky po roce 1883

Zdá se, že poté, co proběhla erupce Krakatoy, kondenzační jádra materiálů dosáhly horní atmosféry, která je nezbytná pro tvorbu noční svítící oblaky. To katapultovalo dostatek vody a částic do mezoféry, že dva roky po události, se objevila stříbřitá oblaka. Je zajímavé, že od roku 1885 byla průběžně noční svítící oblaka pozorována ve většině let až do současnosti, avšak největší výskyt nočních svítících oblak můžeme pozorovat po výbuchu sopek (Schröder, 1999).

7.6 Červené západy Slunce

Pozoruhodné výskyty v atmosféře, které začaly na podzim roku 1883 a které pokračovaly s větší či menší intenzitou v období dvou let, přišly do atmosférické historie pod názvem červená světla nebo červené západy Slunce. Většina vědců dospívá k názorům, že za neobvyklé západy Slunce může výbuch sopky Krakatoa. Profesor Henry C. Maine ale dochází k teorii, že zvláštní poruchy na Slunci způsobily jen neobvyklé jevy (Brookings, 1890).

Je zřejmé, že k těmto jevům došlo nejrychleji v blízkosti sopky. Na Seychelách k červenému západu Slunce došlo už za 36 hodin po erupci. V Brázílii, což je více než deset tisíc mil daleko, se červená světla objevila 30. září. Na Floridě dokonce 9. září (Shaler, 1884).

V Anglii byla zveřejněna zpráva o pozoruhodném západu Slunce, který začal v listopadu roku 1883 (*příloha 2,3*). Obloha se změnila ze světle oranžové na krvavě rudou a zdálo se, jako by moře samo o sobě bylo v plamenech. Ukazuje se, že neobvyklé západy se objevovaly i v Norsku od konce listopadu 1883 do poloviny února 1884 (Doescher at al., 2004).

V Berlíně byl západ Slunce popsán matematikem Robertem von Helmholtzem za soumraku na konci listopadu 1883. Popsal dozelena zbarvený západ Slunce v 3.50 a nezvykle jasnou červenou oblohu se záblesky světla od jihozápadu. V 4.30 byly ulice osvětleny podivně bledou září, jako by viděli skrz žluté sklo, pak následovala tma a bylo vidět hvězdy. O půl hodiny později západní obloha byla zbarvena do růžové a karmínové záře (Oppenheimer, 2011).

7.7 Zabarvení Měsíce

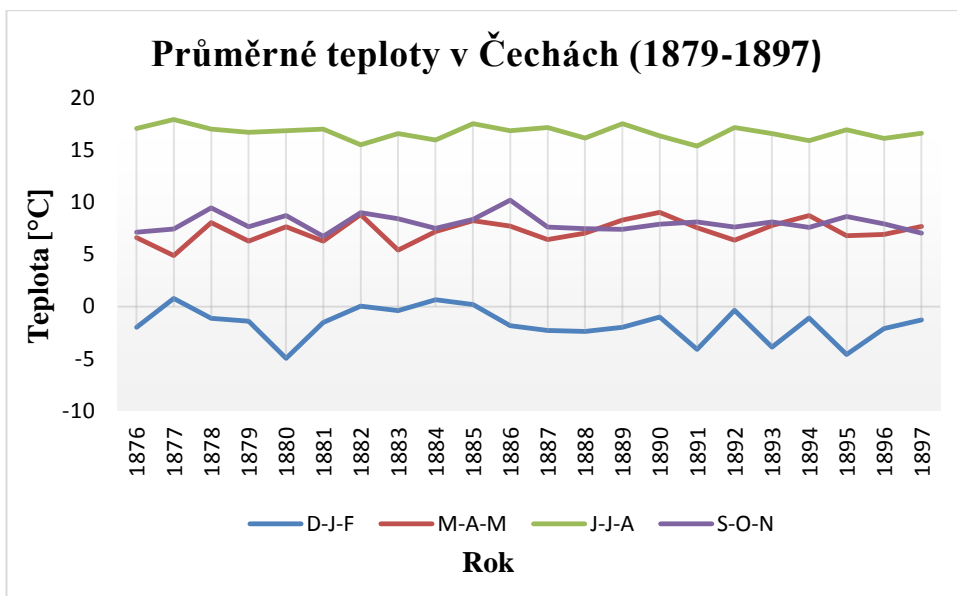
Nejen barevné západy Slunce si pro nás může připravit výbuch sopky, ale také mohou způsobovat zatmění Měsíce. Po erupci byl také viděn modrý a zelený Měsíc (Grant, 1944).

Při zatmění Měsíc zcela nezmizí, ale dostane načervenalou barvu, která se mění v závislosti na obsahu aerosolů v zemské atmosféře. Dokazuje to zmiňovaná sopka Krakatoa a filipínská sopka Pinatubo v roce 1991. V říjnu 1884, rok po výbuchu Krakatoy, došlo k úplnému zatmění Měsíce. V polostínové fázi si lidé začali všimnout nazelenavého zbarvení Měsíce a při úplné fázi Měsíc zcela zmizel z oblohy (Horák, 2008).

7.8 Klima v Čechách v 19. století

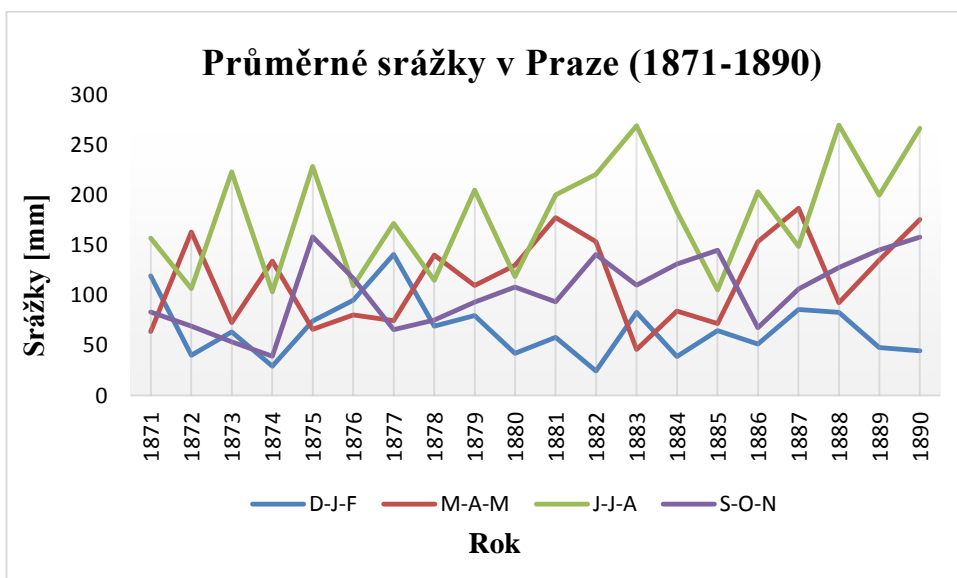
Pozorování na území České republiky na konci 19. století objevilo noční svítící oblaka. Poprvé oblaka byla pozorována 10. června 1885 v Praze geofyzikem Václavem Láskou, tedy dva roky po erupci sopky Krakatoy. Naše území se nachází na jižní hraně pásu, ze kterého jsou noční svítící oblaka hlášena. Tyto oblaka se nejlépe pozorují v létě s nerušeným výhledem na severní obzor a to zejména lokality, kde neruší umělé osvětlení (<http://ukazy.astro.cz/nlc.php>).

Průměrné teploty v Čechách pozorujeme na *obrázku 7*, kde jsou znázorněny průměrné teploty za roční období, tedy zima (D-J-F), jaro (M-A-M), léto (J-J-A) a podzim (S-O-N). Teploty ukazují, že na podzim roku 1883, tedy v období po výbuchu Krakatoy došlo k mírnému poklesu. Pro rok 1884 nedošlo k výraznějším teplotním změnám, naopak proběhlo mírné zvýšení teploty na jaře, v létě i na podzim. Mírný pokles teploty nastal v zimě v roce 1884 a trval až do roku 1888.



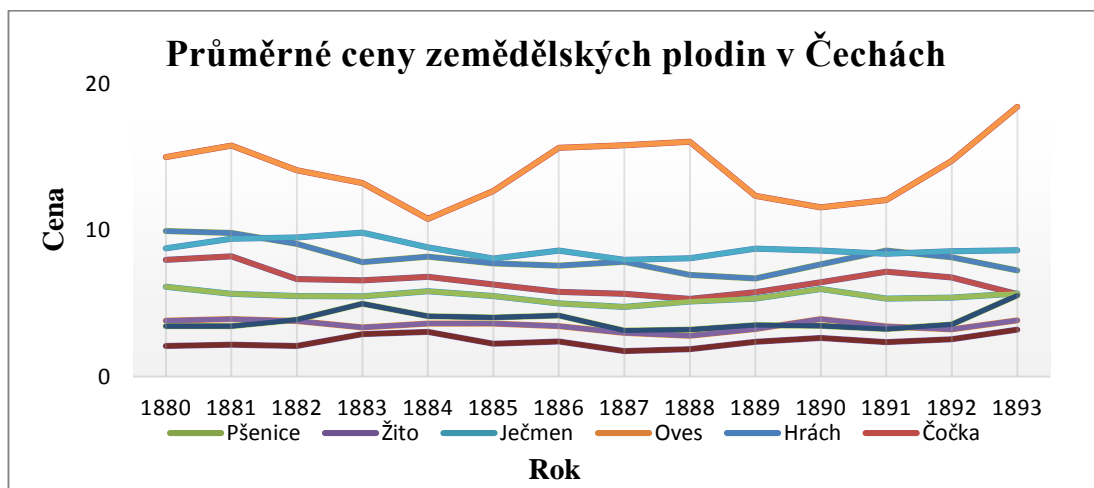
Obr. 9: Průměrné teploty ročních období od roku 1876 – 1897 v Čechách

Průměrné srážky v Praze pro roční období v letech 1871-1890 jsou zakresleny na *obr. 8*. Výrazný úhrn srážek byl v létě v roce 1883, tedy v období, kdy vybuchla Krakatoa. Jelikož vybuchla na konci srpna, nevypadá to na vliv erupce. Naopak po roce 1883 v letních měsících bylo výrazné snížení srážek. Zvýšení srážek od roku 1883 až do roku 1887 se projevu na jaře. Na podzim mírné zvýšení do roku 1884.



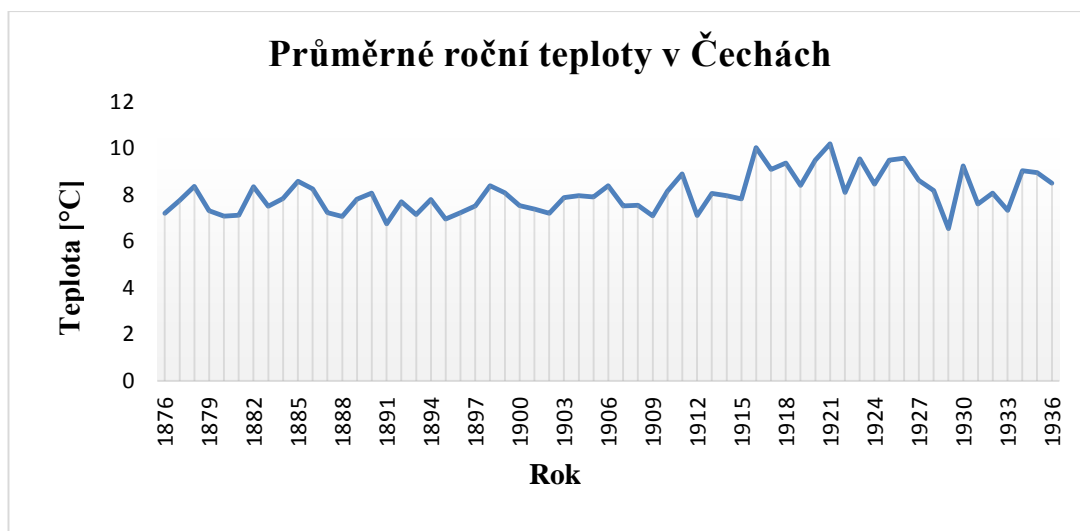
Obr. 10: Průměrné roční srážky v období od roku 1871 – 1890 v Praze

Na *obrázku 9* pozorujeme průměrné ceny zemědělských plodin v Čechách, podle kterých můžeme pozorovat změnu klimatu. Je patrné, že v roce 1884 výrazně stoupá cena ovsu, která trvá až do roku 1888. Ostatní plodiny se pohybují stále v podobných cenách.



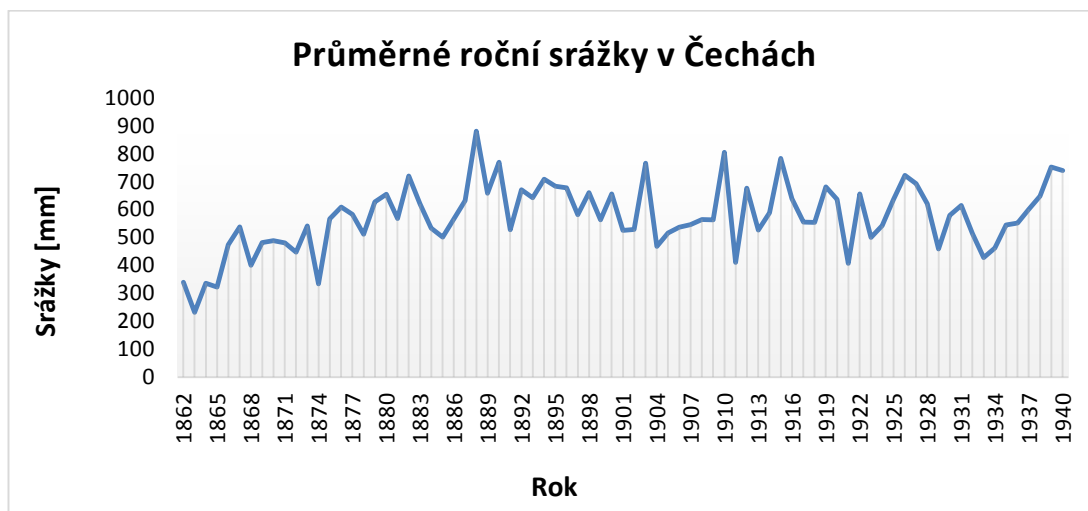
Obr. 11: Průměrné ceny zemědělských plodin v rozmezí 1880 – 1893 v Čechách

Na *obrázku 10* jsou průměrné roční teploty v Čechách. Je patrné, že nenastaly žádné neobvyklé teploty, průměrná roční teplota se stále, i po výbuchu, pohybuje okolo 7 – 8 °C. Z toho můžeme usoudit, že erupce Krakatoy neměla v Čechách významný vliv na teplotu.



Obr. 12: Průměrné naměřené teploty za rok v období 1876 – 1936, Čáslav

Průměrné roční srážky v Čechách můžeme pozorovat na *obrázku 11*. Data pochází z klimatologické stanice v Čáslavi, jsou z let 1862 až do roku 1940. Graf ukazuje nápadné zesílení srážek od roku 1884, tedy rok po erupci Krakatoa. Zvýšení přetrvává až do roku 1888.



Obr. 13: Průměrné naměřené srážky od roku 1862 do roku 1940, Čáslav

7.9 Klimatické změny v USA

Teploty v zimě roku 1883/1884 v Montaně, Minnesotě a Dakotě ve Spojených státech amerických byly obecně zaznamenány jako jedny z nejnižších. V severních částech těchto států 4. ledna 1884 byly naměřeny minimální teploty až -40°C . Velmi nízké teploty pokračovaly také v období od 24. - 26. ledna 1884, při kterých došlo k vysokému tlaku nad jezerní oblastí. V lednu toho roku zasáhla Spojené státy hlavní sněhová bouře. V New Yorku 9. ledna napadl sníh do výše 3 metrů, což vedlo k celkové hloubce 9 metrů. V Kentucky napadlo až 4 metry sněhu. Okresní cesty byly zablokovány, vlaky nejezdily, střechy mnoha budov byly rozdrčeny pod tíhou sněhu. Na Floridě dosahovala průměrná teplota dokonce -9°C , kde v zimním období bývá kolem 15°C . Začátkem února došlo v Ohiu a Pensylvánii k velkým záplavám, při povodních zemřelo asi 15 lidí a způsobily, že 5000 lidí přišlo o domov. Povodeň ovlivnila mnoho obcí podél řek. Města zůstala bez plynu a byla odříznuta od železniční komunikace. Ztráta majetku dosahovala dvou milionů dolarů. Úzkost a bída v důsledku povodní byla obrovská. Lidé našli ubytování v kostelech a veřejných budovách (Marusek, 2010).

18. února 1884 udeřila tornáda v jižních částech Spojených států amerických. Nejničivější tornáda byla v Alabamě, Georgii a Karolině. Zprávy uvedly, že až 300 osob přišlo o život, devět set bylo zraněno a majetek v hodnotě dvou milionů dolarů zničen (Marusek, 2010).

25. března 1884 v Severní Karolině v USA začalo velké krupobití. Kroupy byly tak silné, že zničily úrodu i dobytek (Marusek, 2010).

Dne 15. dubna 1884 udeřilo ničivé tornádo v oblasti Gruzie ve Spojených státech amerických. V Chipley bylo zničeno čtyřicet budov a sedm osob zemřelo. V Meriwether tornádo usmrtilo 6 osob a zničilo velké množství majetku, v Sandtownu zemřelo deset lidí (Marusek, 2010).

Silné krupobití zasáhlo Texas 25. května 1884. Ve Fort Davis kroupy dosahovaly velikosti ořechu v obvodu a padaly s obrovsky ničivou silou. Od 28. do 31. května 1884 došlo k destruktivním mrazům v oblasti Velkých jezer, Nové Anglii a severní části Středoatlantské oblasti v USA. V Connecticutu byla odhadnuta škoda za poškození úrody ve výši milion dolarů. V Illinois silné mrazy zničily zahradní zeleninu, kukuřici, brambory a pupeny ovocných stromů. V Great Barringtonu, Massachusetts, teplota klesla až na -5°C . Škody mrazem byly hlášeny také v Pensylvánii, Rhode Island, Vermontu, Západní Virginii i v Kanadě (Marusek, 2010).

V červenci 1884 zasáhlo Spojené státy četné krupobití. V oblasti Kartága, Jižní Dakoty bouře produkovala kroupy o nevhodné velikosti. Krupobití zničilo úrodu, ztráty byly odhadnuty na padesát tisíc dolarů. V Montaně krupobití zabilo mnoho ptáků a malá zvířata (Marusek, 2010).

K destruktivnímu mrazu došlo 25. srpna 1884 v Nové Anglii, New Yorku, severovýchodní Pensylvánii a New Jersey ve Spojených státech. 29. srpna 1884 udeřila ničivá bouře v Indianě ve Spojených státech a převrátila a potopila parník plavící se mezi Evansville a Hendersonem v Kentucky. Celkový počet ztracených životů byl hlášen kolem patnácti lidí. Bouře poškodila stovky domů a velké množství stromů (Marusek, 2010).

Dne 9. září 1884 zasáhlo tornádo White Bear Lake v Minnesotě Bouře byla velmi ničující, jak na životech, tak na majetku. Šest osob bylo usmrceno a sedmdesát pět zraněných, tři sta budov zničeno a mnoho hospodářských zvířat zabito. Celková hodnota majetku dosahovala výši čtyř milionů dolarů. Ve stejný den tornáde zasáhlo Clear Lake ve Wisconsinu, který zpustošil město a zabil tři osoby. Škoda způsobená bouří byla odhadnuta na 150 000 dolarů (Marusek, 2010).

Zima o rok později v letech 1884/1885 ve Spojených státech opět ničila. V polovině prosince roku 1884 došlo k neobvykle velkému sněžení, které způsobilo rostoucí závěje a velké ztráty na životech a majetku. Nejvíce postižené oblasti byly od Minnesoty na západ k pobřeží Tichého oceánu (Marusek, 2010).

8. Erupce po roce 1883

Zdalo se, jako by exploze sopky Krakatoa byla signálem pro další sopky této oblasti. V několika dalších dnech se otevřely žhavé jícny více než deseti jávských vulkánů. Moře bylo stále zbrázděné nepravidelnými vlnami vyvolanými otřesy dna a nad hladinou se táhla těžká mračna sopečného popela nabitá statickou elektřinou, kterými ani za dne nepronikly paprsky slunce. Každou chvíli se z nich k hladině spustil divoce rotující vír tornáda prosvětlovaný blesky (Novák, 2011).

Tato oblast v Indonésii je velmi neklidná a neuklidnila se ani v roce 1927, tedy 44 let po největším výbuchu Krakatoy. Rybáři viděli vystupovat z moře bubliny, které zaznamenávají výbuchy na dně oceánu. Dne 12. srpna 1930 prorazily výbuchy popela mořskou hladinu a začal se tu tvořit nový ostrov Anak-Krakatoa, který můžeme pozorovat na *obr. 12*, oheň chrlící sopka staré Krakatoy (Jung-Hüttlová, 2006).



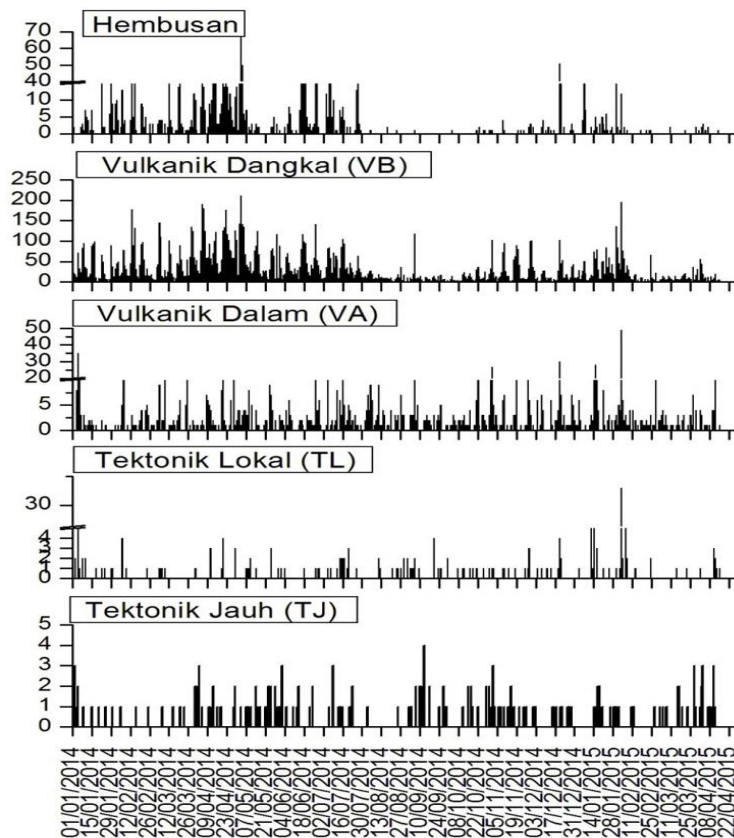
Obr. 14: Anak Krakatoa

V roce 1993 byla Anak Krakatoa zvlášť aktivní. Podle zpráv indonéské vulkanologické služby vyrostl její kužel vyvřelinami z dvou set na dvě stě osmdesát metrů jen v tomto roce. Až do roku 1997 pokračovaly prudké erupce, takže sopka přirostla ještě o dalších dvacet metrů. Od té doby chrlí mraky popela jen příležitostně, ale průběžně vyfukuje štiplavé sirné páry. Dnes tento vulkán, syn Krakatoy, dosahuje téměř stejných rozměrů jako kdysi Krakatoa (Jung-Hüttlová, 2006).

V listopadu roku 2007 vulkán začal znovu prudce vybuchovat a ostrované si mysleli, že jde o další potenciální katastrofu. Někteří vědci jsou skeptičtí, co se týče další hrozby erupce Krakatoy. „Není tam ještě dostatek magmatu,“ tvrdí profesor Davidson (Dunk, 2009).

Téměř 150 let po erupci je oblast, kde se Krakatoa nachází, mezi ostrovy Jávou a Sumatrou v Indonéském souostroví hustěji obydlená, s malými zemědělci, kteří se snaží zužitkovat bohatou a úrodnou půdu této oblasti. Proto není vyloučeno, že stovky tisíc lidí by mohlo zemřít, pokud by došlo k další masivní erupci (Dunk, 2009).

V roce 2015 byla pozorována bílá oblaka nad Anak-Krakatou, i když pozorování byla často bráněna velká mlha. Obyvatelé a návštěvníci byli varováni, aby se nepřibližovali k sopce do vzdálenosti 1 km (<http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=262000>).



Obr. 15 : Hodnoty emisí (Hembusan), mělkých sopečných signálů (VB), hlubokých vulkanických signálů (VA) a lokální (TL) a vzdálenější (TJ) tektonické zemětřesení od roku 2014 na Anak Krakatoa

Od ledna roku 2014 se na Anak Krakatoa zvyšovaly hodnoty emisí (Hembusan), mělkých sopečných signálů (VB), hlubokých vulkanických signálů (VA) a lokální (TL) a vzdálenější (TJ) tektonické zemětřesení, které jsou vidět na *obr.13*. Vulkanické zemětřesení bylo hlášeno v období od ledna 2014 do července 2015. Jediná erupce v té době byl oblak popela ze dne 31. března 2014 (<http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=262000>).

Erupce Krakatoy byla tak silná a katastrofální, že žádný aktivní vulkán moderní doby se jí nepřiblížil, ani velkolepá erupce Mount St. Helens ve Spojených státech v roce 1980. Nyní, století a půl po obrovském výbuchu, můžeme zažít podobný katastrofický výbuch znovu? Přemýšlet nad podobným výbuchem můžeme, ale i přes veškeré moderní techniky nebudeme moci nikdy plně předvídat abnormální erupce. Profesor Jon Davidson, předseda zemských věd na Durham University a vulkanolog, který studoval Krakatou, se obává: „My nikdy nebudeme schopni plně předvídat velké a neobvyklé erupce, a to právě proto, že jsou neobvyklé.“ Přesto není

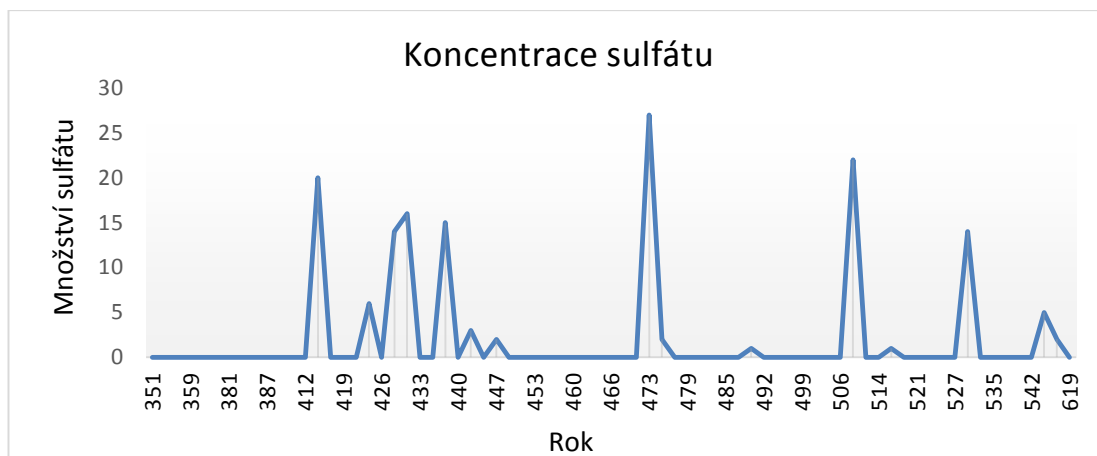
pochyb o tom, že pokud by Krakatoa měla vybuchnout znovu s takovou silou a zuřivostí, dopad by byl mnohem ničivější než ten, který byl zaznamenán v 19. století (Dunk, 2009).

9. Diskuze

Ukazuje se, že ničivý výbuch Krakatoy byl velmi pravděpodobně už v roce 536. Někteří autoři z té doby psali o výbuchu v roce 416, který rozdělil ostrovy Jávu a Sumatru. Tento výbuch je popisován na místě, kde leží dnešní sopka Krakatoa. Přesto se většina přiklání k roku 536, protože pro rok 416 není dostatek důkazů. Neukázalo se, že by došlo k erupci kdekoli na Zemi. Z letokruhů a ledovcového jádra na celém světě byly sebrány vzorky, z nichž vyplývá, že událost se stala kolem roku 536 v okolí Jávy a Sumatry. Někteří autoři uvádějí, že z vrtů ledovců se ve vrstvách pro rok 536 nachází zvýšené množství síry, což by odpovídalo výbuchu sopky. Někteří ovšem uvádějí, že by se mohlo jednat o náraz asteroidu nebo komety.

Na *obrázku 14* a *15* vidíme koncentraci sulfátu. Výsledky pochází z ledovců v Grónsku z mezinárodního projektu GISP (Greenland Ice Sheet Project), kde vrtná jádra poskytují informace o teplotách a složení atmosféry v minulosti, jelikož ledovce zde dosahují stáří až několik tisíců let.

Na *obrázku 14* pozorujeme výsledky od roku 351 do roku 619, kde se ukazuje, že v roce 414 bylo výrazné množství sulfátu a byl by připisován roku 416, tento rok pro výbuch však většina autorů vyvrátila. Rok 535 nebo 536, který je častěji spojován s Krakatoou, jednoznačně naznačuje vyšší podíl sulfátu. Přesto, že tato metoda nemusí být přesná a odhaduje se chybovost na plus nebo minus dvacet pět let, rok 536 nám naznačuje, že zde mohlo dojít k sopečné erupci.



Obr. 16: Koncentrace sulfátu v letech 351 – 619, Grónsko

Tato událost byla pro lidstvo jednou z největších katastrof vůbec. Erupce měla velký a dlouhodobý dopad na klima. Způsobila největší ochlazení klimatu za poslední dvě tisíciletí. Dnes bychom to mohli nazvat tzv. vulkanickou zimou. Historikové té doby popisují snížení světla na čtyři hodiny denně po dobu osmnácti měsíců. V Číně se objevují písečné bouře, sucho, další rok sníh a mráz a s tím související hladomor. Obdobné důkazy jsou také v Koreji, v Severní a Jižní Americe a v Evropě. Způsobilo to další jevy jako prach padající z nebe, neobvykle husté mlhy, sněžení uprostřed léta a dlouhodobá sucha.

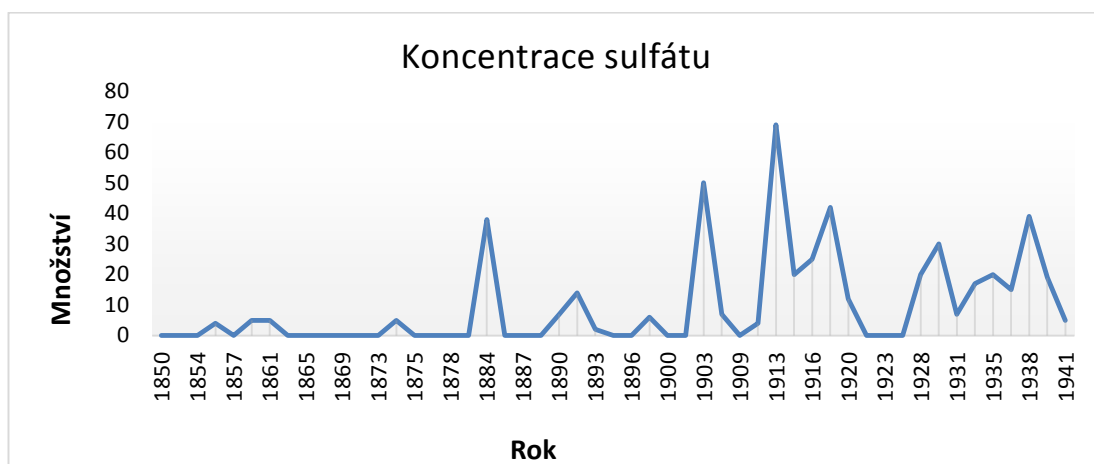
Výsledek těchto klimatických změn, které byly zaznamenány na různých kontinentech, způsobily chaos, epidemie, migraci, války a politické změny. Slunce zahalené do husté mlhy zapříčinilo neúrodu a s tím související hladomor. Z toho můžeme usoudit, že vliv výbuchu v roce 536 měl celosvětový charakter a snížil teplotu na planetě o několik stupňů.

Další ničivý výbuch sopky Krakatoa proběhl v roce 1883. Krakatoa, ležící mezi dvěma litosférickými deskami, euroasijskou a indoaustralskou, se od roku 1880 pravidelně ozývala i s mírnými otřesy. Od března roku 1883 začala vyvrhovat vulkanický popel. Nejničivější exploze přišla 27. srpna 1883 v 10.02, a tím vyletěl do vzduchu téměř celý ostrov.

V důsledku katastrofální erupce vznikly tsunami vysoké 30 – 40 metrů a zahynulo skoro 40 000 obyvatel. Na jižním pobřeží Sumatry padal vulkanický popel, který způsobil popáleniny tisícům obyvatel. Zvuk exploze byl tak silný, že byl

zaznamenán na místech vzdálených několik tisíc kilometrů od Srí Lanky po Austrálii.

Sulfát z 19. století je přesnější, proto na obr. 15 se projevuje zvýšený sulfát v roce 1883, kdy byla erupce Krakatoy, až do roku 1885. Velká koncentrace se objevuje roku 1902 erupcí sopky Mt. Pelée, která dosahuje většího obsahu sulfátu než Krakatoa.



Obr. 17: Koncentrace sulfátu v letech 1850 - 1941, Grónsko

Krakatoa ovlivnila klima v několika směrech. Globální ochlazení po roce 1883 se odhaduje okolo 0,5 - 1°C. Snížení teploty se prokazuje také v oceánu a půdě, kde je pokles okolo 0,5°C a trvalo přibližně tři roky. Bishopův kruh byl poprvé pozorován v roce 1883 Serenem Bishopem v Honolulu na Havaji. Tato svatozář je spojena s globálním šířením sopečných úlomků a je spojována s erupcí Krakatoy. Dalším atmosférickým jevem, který se objevil po erupci Krakatoy v roce 1883, byla noční svítící oblaka. Ta se objevila v roce 1885 a vše nasvědčuje tomu, že tento jev se objevil poprvé a byl způsoben výbuchem Krakatoy. Oblaka se od roku 1885 pozorovala v pravidelných intervalech a vždy po větší erupci sopky.

V roce 1883 spatřily červené západy Slunce, které začaly na podzim a pokračovaly v období dvou let na různých místech. Západy se nejrychleji objevily v blízkosti sopky, z čehož můžeme usoudit, že červené západy byly způsobeny erupcí Krakatoy. Po erupci byl také viděn modrý a zelený Měsíc.

V Čechách byla 10. června 1885 pozorována noční svítící oblaka, která by mohla být způsobena erupcí. Krakatoa v Čechách neměla významný vliv ani na teplotu, ani na počet spadlých srážek, jak ukazují *přílohy 4 a 5*. V sousedních zemích se také neprojevíly nápadné výkyvy teplot (*přílohy 6, 7, 8 a 9*).

Výrazné změny klimatu nastaly především ve Spojených státech amerických. Projevily se nízkými teplotami, sněhovými bouřemi, tornády, krupobitím, povodněmi, a tím přišlo o život několik desítek lidí a bylo zničeno mnoho majetku.

Můžeme usoudit, že po erupci Krakatoy se v roce 1883 v Čechách výrazně neovlivnilo klima a neprojevila se ani v Evropě (*přílohy 10, 11 a 12*). I přes to, že výbuch ovlivnil celosvětové klima, v roce 536 exploze měla daleko katastrofálnější následky, proto se můžeme domnívat, že po roce 536 mohla Krakatoa mít v Čechách velký klimatický vliv. Kdyby Krakatoa v 19. století vybuchla podobně jako stará Krakatoa, byly by následky obrovské, proto by v budoucnu měli být vědci na pozoru, aby se předcházelo katastrofám.

Krakatoa, dnes známá jako Anak Krakatoa, od roku 1927 stále roste a v posledních několika letech je Anak Krakatoa aktivní.

10. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo prokázání, že došlo ke klimatickým změnám a atmosférickým jevům po erupci Krakatoy v roce 536 a 1883 a ukázat, že exploze sopek nemají dopad pouze na přilehlá území.

V Indonésii je spousta nebezpečných sopek a nikde na světě nežije tolik lidí u činných vulkánů, proto je velká pravděpodobnost, že se zde může opět objevit nebezpečná erupce a nemusí mít vliv jen ve svém okolí. Stupeň VEI 8 má nedožírné následky a sopka s tímto indexem je schopna zničit celé lidstvo.

Erupce Krakatoy v roce 536 měla dalekosáhlejší následky nežli v roce 1883, proto kdyby v 19. století vybuchla stejně jako v roce 536, mohli bychom předpokládat, že by měla velký vliv na klima i v Čechách. Neměli bychom sopky brát na lehkou váhu ani u nás, jelikož jsou vulkány, které k nám mají mnohem blíž než Krakatoa.

Krakatoa v posledních letech pravidelně vybuchuje a zdá se, že tyto mírné výbuchy jsou lepší, protože sopka nebude mít tolik magmatu na silnou erupci, přesto Krakatoa už několikrát přesvědčila, že u sopek si nikdy nemůžeme být jisti.

Seznam použité literatury

Knihy

- Demek, J. (1985):** Obecná geomorfologie - I. Academia, Praha.
- Dewing, B.H. (1916):** History of the Wars. Harvard University.
- Grant, H.D. (1944):** Cloud and Weather Atlas. California, Simi Valley.
- Hovorka, D. (1990):** Sopky: vznik, produkty, důsledky. VEDA vydavatelství Slovenské akademie věd, Bratislava.
- Jakeš, P. (1984):** Planeta Země. Jihočeské nakladatelství.
- Jung-Hüttlová, A. (2006):** Skrytá síla ohně: mé cesty k činným sopkám Země. Brána, Praha.
- Keller G et Kerr A.C. (2014):** Volcanism, Impacts, and Mass Extinctions: Causes and Effects. The Geological Society.
- Keys, D. (2000):** Catastrophe: An Investigation into the Origins of Modern Civilization. Ballantine Books, New York.
- Kukal, Z. (1983):** Přírodní katastrofy a rizika. Ministerstvo životního prostředí, Praha.
- Larousse, P. (1998):** Země, živá planeta. Svojtka & Company, Praha.
- Novák, J.A. (2011):** Smrtící sopky. Nakladatelství XYZ, Praha.
- Oppenheimer, C. (2011):** Eruptions that Shook the World. Cambridge University.
- Soukupová, J. (2013):** Metody paleoklimatologie a historické klimatologie a vývoj klimatu na Zemi. Vydavatelství POWERPRINT, Praha.
- Winchester, S (2004):** Krakatoa: The Day the World Exploded. Penguin Books, London.

Články

- Bednář, J. et Popek, M. (2012):** Bishopův kruh a další optické jevy na částicích vulkanického popela nebo pouštního písku v atmosféře.
- Brookings, E.J. (1890):** The „Red light“
- Brönnimann S., Griesser T., Stickler A., Schaller N. (2009):** Climate effects of the 1883 Krakatoa eruption: Historical and present perspective.

- Brzezina, J. (2014):** Výbuch sopky Krakatoa.
- Dalin, P., Pertsev, N. et Romejko, V. (2012):** Notes on historical aspects on the earliest known observations of noctilucent clouds.
- Dunk, M. (2009):** Will Krakatoa rock the world again? Last time, it killed thousands and changed the weather for five years, now it could be even deadlier.
- Glecker, P.J. et al. (2006):** Krakatoa lives: The effect of volcanic eruptions on ocean heat content and thermal expansion.
- Hamilton, K. (2012):** Sereno Bishop, Rollo Russell, Bishop's Ring and the Discovery of the "Krakatoa Easterlies".
- Hastenrath, S. (2006):** Equatorial zonal circulations: Historical perspectives.
- Horák, P. (2008):** Záhadný temný zub během zatmění Měsíce v srpnu.
- Laštovička, J. (2010):** Dopady lidské činnosti na horní atmosféru.
- Marusek, J.A. (2010):** A Chronological Listing of Early Weather Events.
- Morgan, M.R. (2009):** The Eruption of Krakatoa (also known as Krakatau) in 1883.
- Neely, R.R. et al. (2013):** Recent anthropogenic increases in SO₂ from Asia have minimal impact on stratospheric aerosol.
- Novák, J.A. (2010):** Výbuch sopek mění počasí i dějiny.
- Novák, J.A. (2011):** Chladná zláza z horkého podzemí.
- Rigby, E., Symonds, M. et Ward-Thompson, D. (2004):** A comet impact in AD 536?
- Doescher, R.L., Olson, D. W. at Olson, M.S. (2004):** When the sky ran red: the story behind The Scream.
- Sassen, K., Peter, T., Luo, B.P. et Crutzen P.J. (1994):** Volcanic Bishop s ring: evidence for a sulfuric acid tetrahydrate particle aureole.
- Shaler, N.S. (1884):** The red sunsets.
- Schröder, W. (1999):** Were Noctilucent Clouds Caused by the Krakatoa Eruption? A Case Study of the Research Problems before 1885.
- Thomas, G.E. et Olivero, J. (2001):** Noctilucent clouds as possible indicators of global change in the mxsosphxre.
- Tvauri, A. (2014):** The impact of the climate catastrophe of 536-537 AD in Estonia and neighbouring areas.

Internetové zdroje

<https://sites.google.com/site/vulkanizmus/klasifikace>, cit 30. 3. 2017.

<http://sopky.eu/sopecna-zima/>, cit 30. 3. 2017.

<https://www.ncdc.noaa.gov/cag/time-series/global/globe/ocean/3/8/1880-2015>, cit 30. 3. 2017.

<https://www.ncdc.noaa.gov/cag/time-series/global/globe/land/3/8/1880-2015>, cit 30. 3. 2017.

<http://ukazy.astro.cz/nlc.php>, cit 30. 3. 2017.

<http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=262000>, cit 30. 3. 2017

Zdroje k obrázkům

Obr. 1: <http://astronomia.zcu.cz/planety/zeme/1952-sopky>

Tab. 1: <https://sites.google.com/site/vulkanizmus/klasifikace>

Obr. 2: Rigby, E., Symonds, M. et Ward-Thompson, D. (2004): A comet impact in AD 536?

Obr. 3: Google Maps

Obr. 4: <http://eoedu.belspo.be/en/profs/vgt-asia-disasters.asp?section=1.2.3v>

Obr. 5: <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/time-series/global/globe/ocean/3/8/1880-2015>

Obr. 6: <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/time-series/global/globe/land/3/8/1880-2015>

Obr. 7: Hamilton, K. (2012): Sereno Bishop, Rollo Russell, Bishop's Ring and the Discovery of the "Krakatoa Easterlies"

Tab. 2: Schröder, W. (1999): Were Noctilucent Clouds Caused by the Krakatoa Eruption? A Case Study of the Research Problems before 1885

Obr. 8: Thomas, G.E., et Olivero, J. (2001): Noctilucent clouds as possible indicators of global change in the mxsosphxre

Obr. 9: Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002

Obr. 10: Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002

Obr. 11: Batovcův kalendář na rok 1895

Obr. 12: Pozler, R.: "Analýza kolísání meteorologických prvků na stanici Čáslav"

Obr. 13: Pozler, R.: "Analýza kolísání meteorologických prvků na stanici Čáslav"

Obr. 14: <https://www.damninteresting.com/son-of-krakatoa/>

Obr. 15: <http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=262000>

Obr. 16, 17: Zielinski, G.A. a G.R. Mershon. 1997, Paleoenvironmentální důsledky nerozpustného záznamu mikročástice v ledovém jádru GISP2 (Grónsko)

Přílohy:

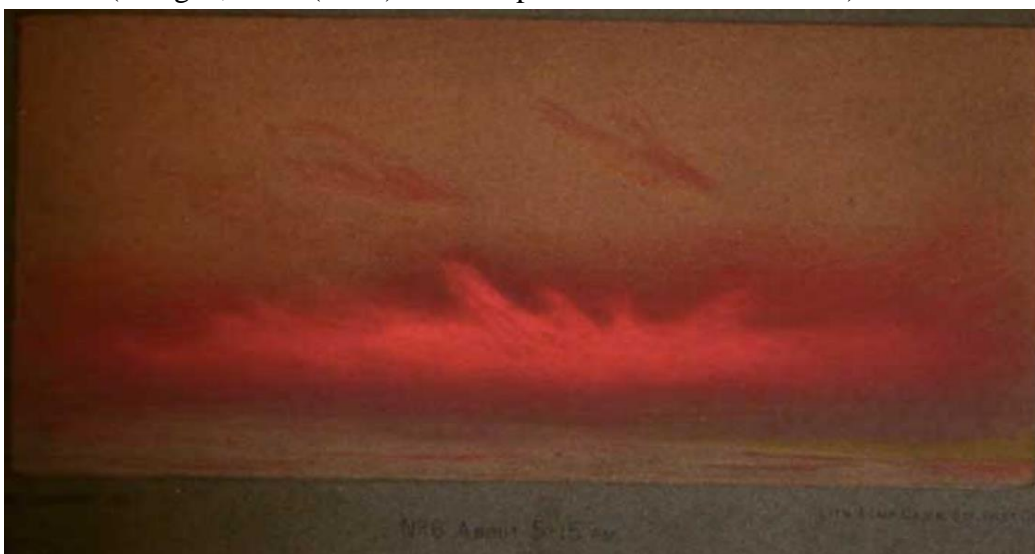
[1] noční svítící oblaka (<http://ukazy.astro.cz/nlc-pozorovani.php>)



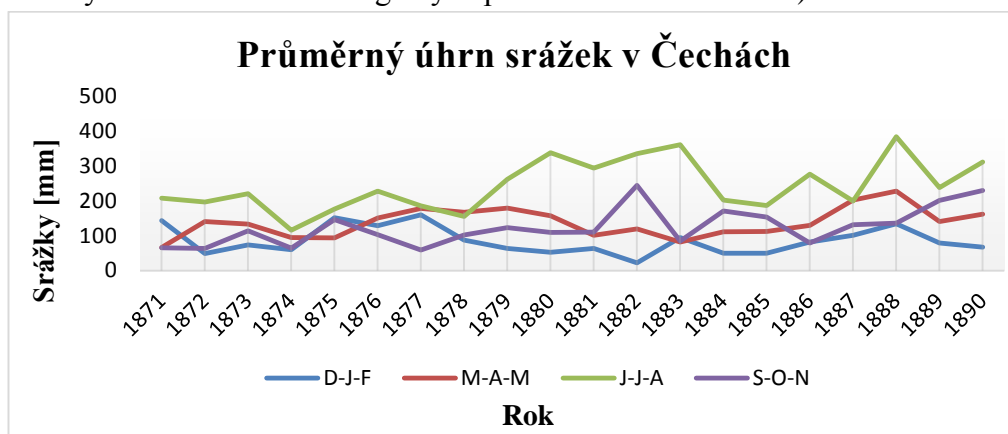
[2] Malba západu Slunce Williama Ascrofta, Londýn 26. listopadu 1883 v 16.30 (Morgan, M.R. (2009): The Eruption of Krakatoa in 1883)



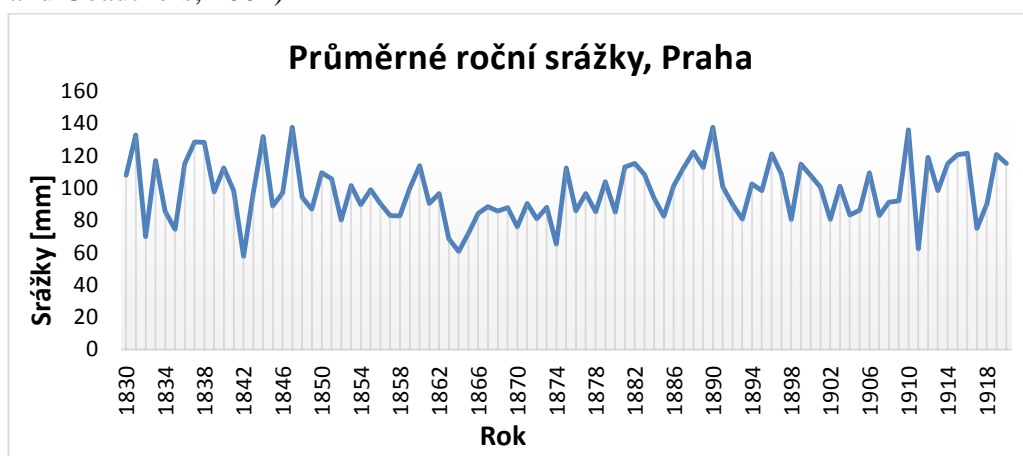
[3] Malba červeného západu Slunce Williama Ascrofta, Londýn 26. listopadu 1883 v 17.15 (Morgan, M.R. (2009): The Eruption of Krakatoa in 1883)



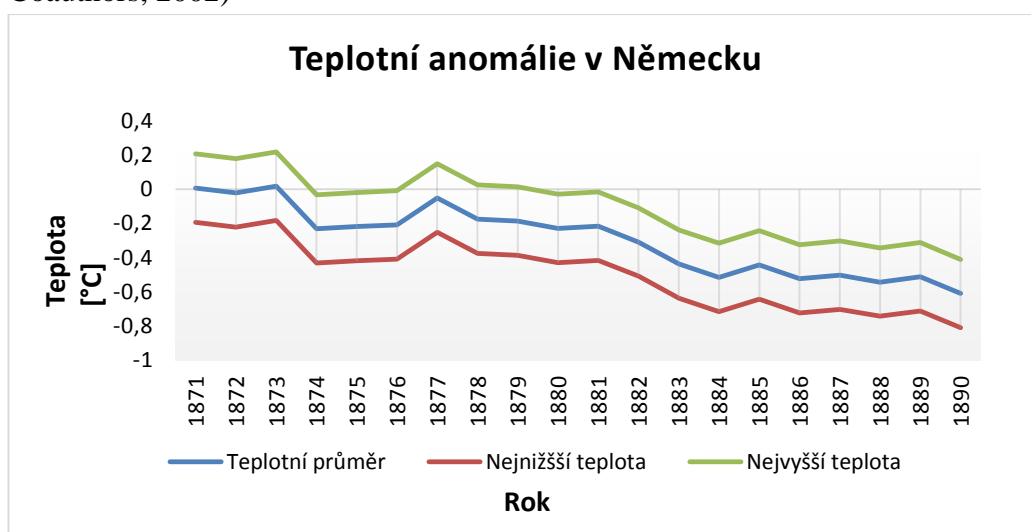
[4] Průměrný úhrn srážek v ročním období za rok 1871 – 1890, Čáslav (Pozler, R.: "Analýza kolísání meteorologických prvků na stanici Čáslav")



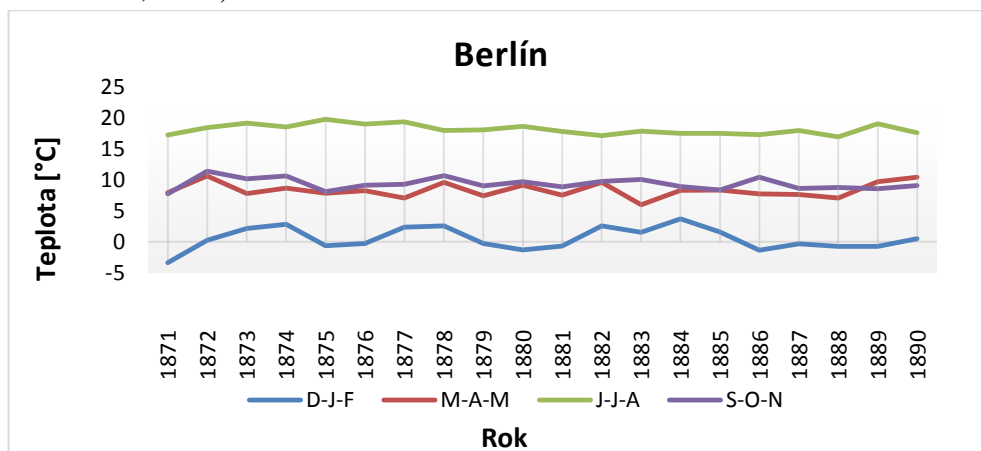
[5] Průměrný roční úhrn srážek v období 1830 – 1918, Praha (Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002)



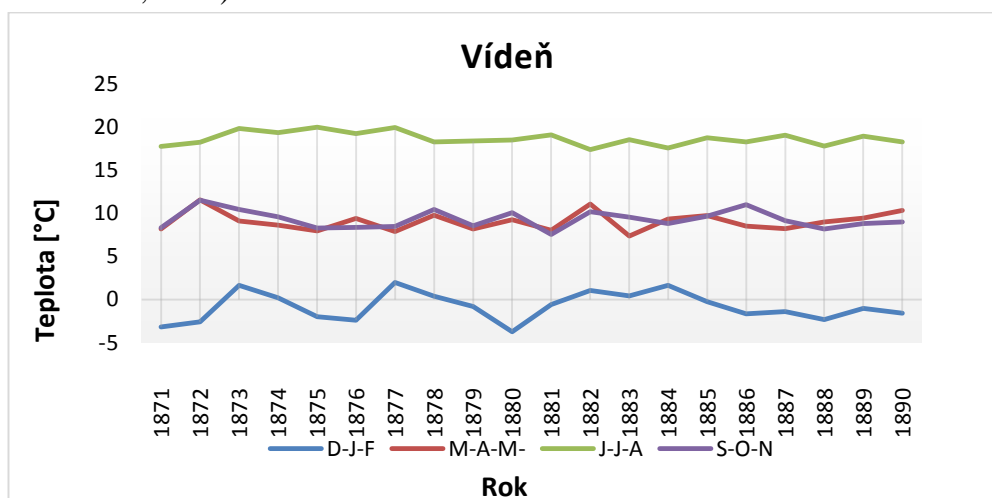
[6] Teplotní anomálie v Německu od roku 1871 – 1890 (Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002)



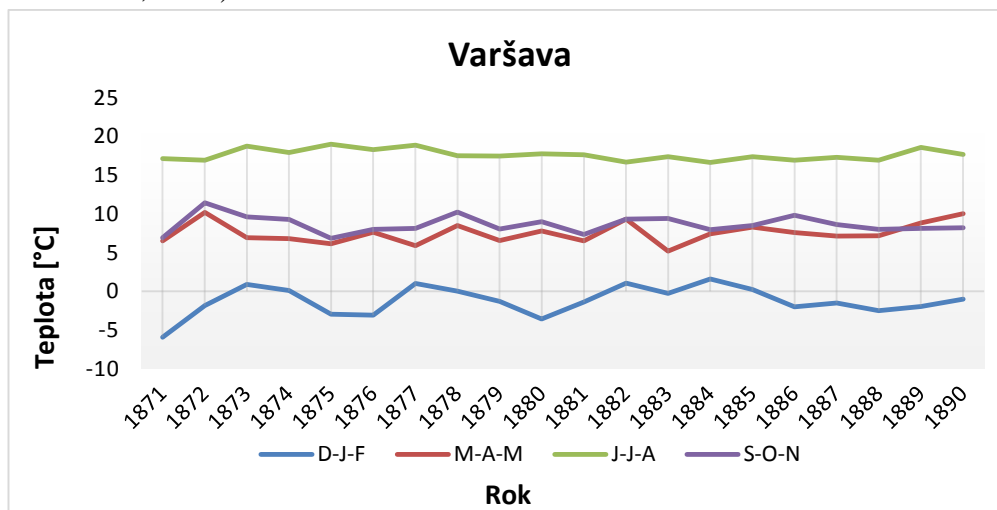
[7] Průměrné teploty v Berlíně od roku 1871 – 1890 (Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002)



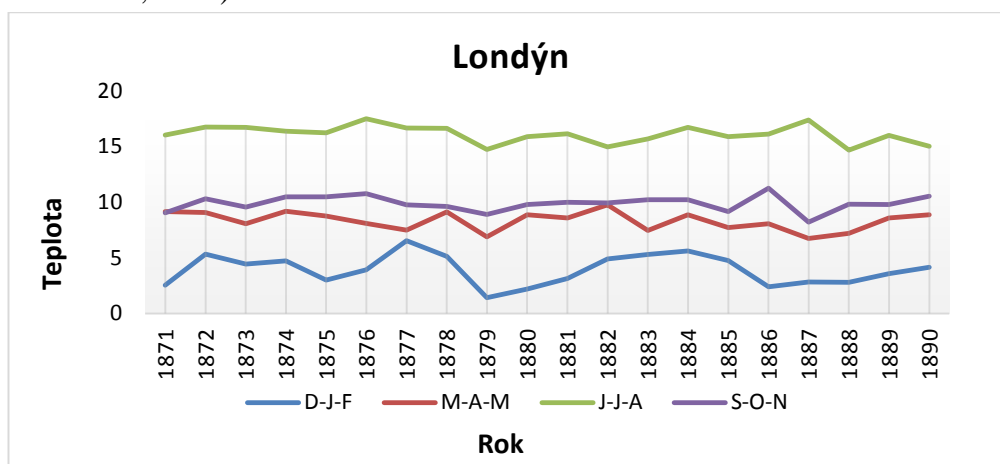
[8] Průměrné teploty ve Vídni od roku 1871 – 1890 (Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002)



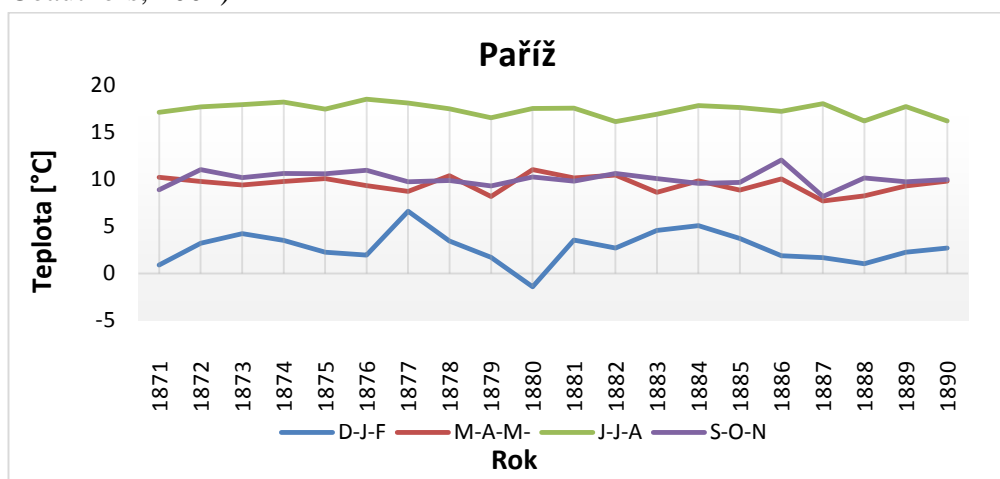
[9] Průměrné teploty ve Varšavě od roku 1871 – 1890 (Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002)



[10] Průměrné teploty v Londýně od roku 1871 – 1890 (Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002)



[11] Průměrné teploty v Paříži od roku 1871 – 1890 (Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002)



[12] Průměrné teploty v Miláně od roku 1871 – 1890 (Klein Tank, A.M.G. and Coauthors, 2002)

