

Dominika Hájková; Zuzana Procházková  
Hunga Tonga – Hunga Ha’apai, o výbuchu jedné podmořské sopky

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 68 (2023), No. 4, 217–226

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/152027>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2023

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library*  
<http://dml.cz>

# Hunga Tonga – Hunga Ha’apai, o výbuchu jedné podmořské sopky

*Dominika Hájková, Zuzana Procházková*

*Abstrakt.* V lednu 2022 došlo k erupci tichomořské sopky Hunga Tonga – Hunga Ha’apai. Důsledky této erupce byly velmi rozmanité a v mnoha ohledech mimořádné. V tomto článku uvedeme, jakým způsobem ovlivnil výbuch chemické složení vyšších vrstev atmosféry a jaký to má vliv na teploty a proudění vzduchu. Popíšeme spektrum vln vznikajících v atmosféře při výbuchu v souvislosti s rychlou změnou tlaku. A v neposlední řadě ukážeme i dopad na tvorbu vln v oceánu.

Hunga Tonga a Hunga Ha’apai jsou dva malé tichomořské ostrovy ležící asi 3 tisíce kilometrů východně od pobřeží Austrálie, přibližně 700 km jihovýchodně od ostrova Fidži, viz obr. 1. Jakkoliv se zdají být bezvýznamné, mají za sebou složitý vývoj. Jsou totiž součástí aktivní podmořské sopky s příhodným názvem Hunga Tonga – Hunga Ha’apai (HTHH) ležící na rozhraní dvou tektonických desek, Pacifické a Australské. Tato zóna se nazývá Tonga–Kermadec a je díky rychlému pohybu desek vulkanicky velmi aktivní [31].

První záznamy o erupci HTHH máme již ze 20. století – z let 1912, 1937 a 1988. Sopka byla ale nadále aktivní i v posledních letech. V roce 2009 proběhla krátká erupce, v jejímž důsledku došlo ke zvětšení ostrova Hunga Ha’apai. Ještě výraznější změna ostrovů ovšem proběhla při následné aktivitě sopky během prosince 2014 a ledna 2015, kdy výbuch vyzdvihl novou hmotu nad mořskou hladinu a oba ostrovy tak propojil [12].

Na základě geologických průzkumů víme, že kromě těchto relativně menších výbuchů u této sopky zhruba jednou za tisíciletí dochází k velmi silné erupci [38]. A právě k jednomu takovému výbuchu nedávno, 14.–15. ledna 2022, došlo. Výbuch byl specifický svou silou, ale i v mnoha dalších ohledech, což z něj dělá jednu z nejstudovanějších erupcí v seismologii, oceánografii nebo atmosférických vědách.

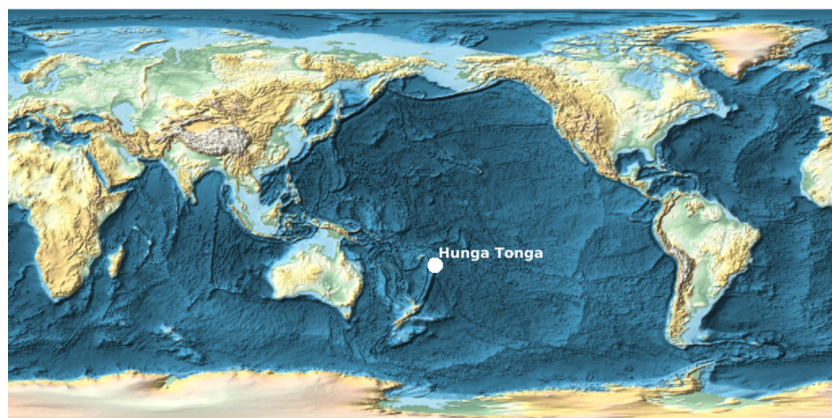
Oproti jiným erupcím oblak z výbuchu vystoupal mnohem výše, obsahoval zřejmě méně oxidu siřičitého a více vodní páry. Způsobil vlny tsunami po celém Tichém oceánu, stejně jako výrazné vlny ve vzduchu pozorovatelné na nejrůznějších místech zeměkoule, ve výškách od zemského povrchu až do nejvyšších vrstev atmosféry. Navíc došlo k opětovnému rozdělení ostrova na dvě ještě menší části než před rokem 2014. V tomto článku se zaměříme na erupci především z pohledu dopadů na atmosféru.

## 1. Vliv na chemismus atmosféry

Při vulkanických erupcích dochází mimo jiné k uvolnění plynů, jako je vodní pára, oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ ), oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) nebo sloučeniny halogenů, například bromovodík

---

Bc. DOMINIKA HÁJKOVÁ, Mgr. ZUZANA PROCHÁZKOVÁ, Katedra fyziky atmosféry MFF UK, V Holešovičkách 747/2, 180 00 Praha 8, e-mail: dominika.hajkova@mff.cuni.cz, prochazkova@karlin.mff.cuni.cz



Obr. 1. Mapa lokace sopky Hunga Tonga – Hunga Ha'apai

(HBr) nebo kyselina chlorovodíková (HCl) [29]. Pokud je výbuch silný, mohou se dostat až do stratosféry, tedy do výšky okolo dvaceti kilometrů nad zemským povrchem. Chemické reakce, které pak ve stratosféře probíhají, spolu s dopadem na absorpci a průchod slunečního záření mohou ovlivnit podmínky na Zemi i na několik dalších let.

K takovým erupcím v minulosti docházelo. Odhaduje se, že k historicky nejsilnější známé vulkanické erupci došlo v roce 1815, kdy výbuch indonéské sopky Tambora vytvořil oblak sahající zřejmě až do výšky 43 km [22]. Zde ale budeme odkazovat spíše na erupce z bližší historie – výbuch indonéské sopky Krakatoa z roku 1883 a filipínské sopky Pinatubo z roku 1991. Přestože byly tyto erupce o něco slabší než výbuch Tambory, jejich vliv na klima byl také prokázán.

Obecně přijímaná teorie říká, že vulkanické erupce ochlazují klima. Přibližně během jednoho měsíce se totiž oxid siřičitý z erupce ve stratosféře přemění na síranové aerosoly, tedy na drobné kapičky kyseliny sírové. Ty potom, mimo jiné, odráží sluneční záření, čímž způsobují ono ochlazování zemského povrchu [29]. To bylo pozorováno nebo zpětně dopočítáno z matematických modelů u zmiňovaných erupcí i u mnoha dalších. Konkrétně, například po výbuchu sopky Pinatubo klesly během dalšího roku teploty povrchu na celé zeměkouli v průměru o  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přičemž ještě dva nebo tři roky trvalo, než tento efekt odezněl [13]. V důsledku výbuchu sopky Krakatoa navíc došlo nejen k poklesu teploty na povrchu oceánu, ale i ve větších hloubkách. A protože oceán funguje jako zásobník energie s obrovskou kapacitou, zpomalila tím erupce oteplování oceánu během dalšího století [11].

V případě sopky HTHH by to ale mohlo být jinak [14]. Během erupce se totiž dostalo do stratosféry neobvykle velké množství vody, okolo 146 megatun [21]. To představuje zhruba 10 % obvyklého množství vody v celé stratosféře [41]. Přestože voda může vypadat jako neškodná látka, opak je pravdou. Vodní pára je totiž silný skleníkový plyn. Zabráňuje tomu, aby teplo vyzařované zemským povrchem odcházelo pryč, a způsobuje tak oteplování povrchu. Její přítomnost tedy vede k opačnému efektu než přítomnost aerosolů [21]. Současně bylo během erupce přeneseno do stratosféry poměrně málo oxidu siřičitého – pravděpodobně kvůli tomu, že se jednalo o podmořskou sopku, která nebyla příliš hluboko pod hladinou [38]. Výpočty na základě

satelitních měření ukazují na hodnoty okolo 0,4 megatun [21], [6], což je velmi malé číslo ve srovnání například se 17 megatunami SO<sub>2</sub> při erupci sopky Pinatubo [26]. To by podporovalo teorii, že by HTHH mohla způsobit spíše oteplení zemského povrchu. Na druhou stranu, velké množství vody pravděpodobně urychlilo přeměnu SO<sub>2</sub> na síranové aerosoly, čímž se efekt způsobující ochlazení objevil rychleji již během prvních měsíců [41].

Od začátku roku 2022 bylo publikováno velké množství prací zabývajících se problémem, který z těchto procesů do budoucna převáží a jak velký bude výsledný efekt. Výsledky těchto studií se ale zatím poměrně rozcházejí. Ke scénáři s oteplením se například přiklání článek zabývající se vlastnostmi stratosférického aerosolu na základě satelitních dat [6]. Další práce dokonce dochází k závěru, že erupce ne zcela bezvýznamně zvýší pravděpodobnost krátkodobého překročení globálního oteplení o 1,5 °C [14]. Na druhou stranu ale můžeme zmínit třeba studii [27], která na základě modelových simulací dospěla ke slabému ochlazení. Situace se komplikuje například tím, že by předpovídaná zvýšená rychlost přeměny SO<sub>2</sub> na H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> mohla způsobit chybu v odhadech množství SO<sub>2</sub> přeneseného do stratosféry [6], což by mělo vliv na výsledné modelové simulace.

Vysoké hladiny aerosolu po erupci ale nemají vliv jen na teplotu zemského povrchu. Protože pohlcují sluneční záření i teplo od zemského povrchu, způsobují také ohřívání stratosféry [29], [33]. Například po erupci sopky Pinatubo bylo zaznamenáno oteplení spodní stratosféry (16–24 km nad Zemí) v následujících měsících o dva až tři stupně [15]. Podobné oteplení z důvodu přítomnosti aerosolů je pro větší vulkanické erupce<sup>1</sup> typické [33]. Na druhou stranu, po erupci HTHH bylo ve stratosféře relativně méně aerosolu, za to však hodně vodní páry, která efektivnějším vyzařováním infračerveného záření způsobuje lokální ochlazení [4]. Z kombinace různých pozorování a modelových výpočtů skutečně vyplývá, že v prvních měsících po erupci HTHH došlo k ochlazení stratosféry, lokálně až o 4 °C [4], [28].

Změny v teplotě stratosféry jsou podstatné pro atmosférickou dynamiku. V jejích důsledku se totiž může ve stratosféře dočasně zvětšit nebo zmenšit rozdíl teplot mezi rovníkem a pólem, což má vliv na proudění vzduchu. Pro případ erupce HTHH bylo například zjištěno, že v zeměpisných šířkách s nejnižší teplotou v důsledku této anomálie vznikl silný západní vítr [4]. Polární vír, což je silné proudění ve stratosféře okolo pólu na zimní polokouli, bývá také ovlivněn vulkanickými erupcemi. Typicky dochází k jeho zesílení [35]. To bylo pozorováno i po erupci HTHH, přičemž příčinou byl pravděpodobně převážně teplotní vliv vodní páry [37].

Mimo tyto efekty na teplotu nebo proudění vzduchu ale můžeme pozorovat také negativní vliv erupcí na množství stratosférického ozonu. V hladinách, kam se dostal oblak z HTHH, je totiž jeho koncentrace vysoká. Jedná se o takzvanou ozonovou vrstvu, která je pro člověka prospěšná kvůli pohlcování části UV záření. Přitom některé látky z vulkanického oblaku, například kyselina chlorovodíková nebo bromovodík, se mohou chemickými reakcemi přeměnit na látky rozkládající ozon a narušující tedy ozonovou vrstvu. To nicméně není hlavní mechanismus, kterým vulkanické erupce způsobují úbytek ozonu. Velká část reakcí vedoucích k rozložení ozonu je heterogenní – reakce

---

<sup>1</sup>U menších erupcí se nad oblastí, kde aerosoly způsobují ohřívání, objevuje i oblast se sníženou teplotou, pravděpodobně v důsledku chemických reakcí a stratosférického proudění.

probíhají na povrchu aerosolových částic. A právě aerosolových částic se erupcí dostane do stratosféry obrovské množství, což může způsobit až dramatický pokles koncentrace ozonu [5]. Například měsíc po výbuchu sopky Pinatubo kleslo celkové množství ozonu o 6 %. Měsíční interval po erupci zde byl nutný na vytvoření aerosolových částic z  $\text{SO}_2$  [7]. Na druhou stranu, při erupci HTHH se kvůli velkému množství vody vytvořily aerosolové částice velmi rychle a pokles stratosférického ozonu v tropických oblastech o 5 % byl pozorován již během jednoho týdne. To je výrazně rychlejší pokles než u jiných erupcí [7]. Pravděpodobně v souvislosti s erupcí HTHH byla dále pozorována mimořádně velká ozonová díra nad Antarktidou [18]. A s ohledem na to, že vodní pára zřejmě zůstane ve stratosféře ještě 4–5 let po výbuchu HTHH, dá se, podobně jako u ostatních dopadů erupce zmíněných v této kapitole, očekávat i dlouhodobější ovlivnění celkového množství ozonu [7].

## 2. Výbuch HTHH a atmosférické vlny

Kromě chemických dopadů měl výbuch HTHH i velmi silný vliv na dynamiku atmosféry, včetně atmosférických vln. V atmosféře se přirozeně vyskytuje mnoho druhů vln, od planetárních Rossbyho nebo i Kelvinových vln až po menší gravitační či akustické vlny [24]. Vznikají z mnoha zdrojů po vychýlení rovnováhy, u Rossbyho vln jde například o rovnováhu mezi Coriolisovou silou a tlakovým gradientem, u vnitřních gravitačních vln o rovnováhu mezi vztlakovou a gravitační silou.<sup>2</sup> Atmosférické vlny mohou také vznikat náhlou změnou tlaku, jako je výbuch.

Během výbuchu HTHH vzniklo několik druhů atmosférických vln, které se šířily dál od epicentra výbuchu do okolí a po celé planetě. Jejich účinky byly pozorovány satelity, ve vzorech světelného záření atmosféry observatoří na Havajských ostrovech [39] i bolidovými kamerami na Slovensku [30]. Atmosférické vlny ze singulárního jednorázového zdroje nebyly v takovém počtu a v takovém měřítku nikdy předtím detekovány. Mezi pozorovanými druhy vln byly Lambovy vlny, vnitřní gravitační vlny, akustické vlny a ionosférické poruchy, jež se šíří ve formě vln.

Lambovy vlny, teoreticky odvozené Lambem v roce 1917 [16], jsou druhem vlny, která má největší amplitudu na rozhraní dvou prostředí (tzv. vnější vlna), v tomto případě na rozhraní oceánu nebo zemského povrchu a atmosféry. Současně je nedisperzní – její fázová rychlost se nemění v závislosti na její vlnové délce [10]. Ačkoliv byly identifikovány retrospektivně, Lambovy vlny byly v historii již pozorovány např. při výbuchu sopky Krakatoy v roce 1883 [34].

Přibližně 30 minut po prvotním výbuchu HTHH byla detekována vedoucí vlnoplocha, jež se začala šířit rychlostí 318 m/s [39]. Její amplituda dosahovala až do ionosféry, nicméně s nejsilnějším signálem blízko povrchu. To ukazuje na vnější vlnu, protože je vázaná na rozhraní. Toto, společně s jejím nedisperzivním chováním, potvrdilo, že se jedná o Lambovu vlnu, která teoreticky nabývá rychlosti blízké rychlosti zvuku. Zmíněná rychlost byla též konzistentní s tou naměřenou u Krakatoy. Ze satelitních dat dále vyplývá, že Lambova vlna se šířila dál, až o přibližně 18 hodin později dorazila do 21 000 km vzdáleného protějšku epicentra – antipodu v Alžírsku – již ve

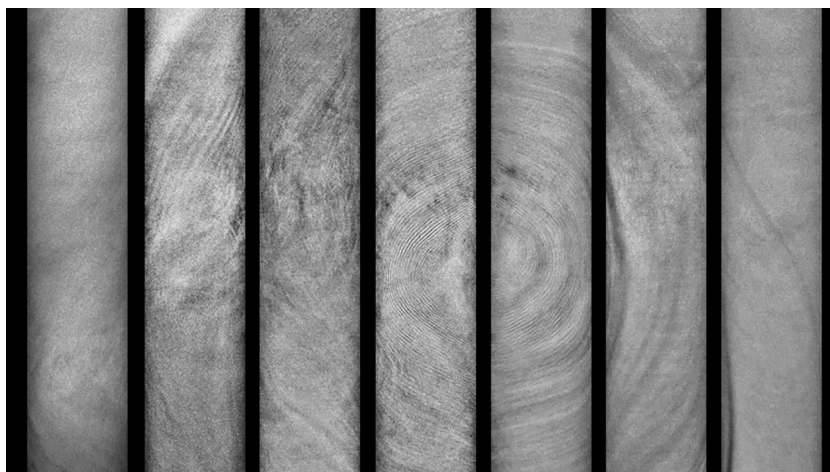
---

<sup>2</sup>Pro lepší srozumitelnost zdůrazňujeme, že gravitačními vlnami se z pohledu fyziky atmosféry rozumí vlnění vzduchu způsobené gravitační silou, nikoliv vlnění gravitace předpokládané obecnou teorií relativity.

zdeformované podobě způsobené topografií a meteorologickými vlivy<sup>3</sup> [39]. V antipodu se odrazila a šířila se zpátky do Tongy, kde se znovu odrazila. Takto v následujících dnech obešla okolo planety nejméně třikrát, než se rozpadla.

Po prvotní Lambově vlně nastává mezera, za níž se objevuje vlnový balík – spojení více vln – s menší fázovou rychlostí. Tyto vlny byly identifikovány jako vnitřní gravitační vlny [32], [39]. Od Lambových vln se liší šířením uvnitř prostředí – ne na jeho rozhraní – ale i tím, že jejich rychlost je určena jejich vlnovou délkou pomocí tzv. disperzních relací [8]. V atmosféře jsou gravitační vlny všudypřítomné a vznikají z různých zdrojů, jako je například konvekce, orografie nebo výbuchy, jako v případě HTHH.

Díky různým vlnovým délkám a směru šíření dosahovaly části balíku během své existence různých fázových rychlostí přibližně v rozmezí od 160 m/s do 270 m/s [32], [39]. Díky rozdílu rychlostí se tedy mezera mezi Lambovou vlnou a gravitačními vlnami časem zvětšovala. Balík dorazil po částech do antipodu za přibližně 20–22 h, přičemž z důvodu charakteru vln nebylo již téměř možné zachytit jasný odraz zpět jako v případě Lambovy vlny. Během následujících hodin pak byly pozorovány stovky až tisíce menších gravitačních vln až do vzdálenosti 9 000 km, viz obr. 2. Ačkoliv jejich amplituda byla menší než u vedoucího balíku vybuzeného přímo explozí, oblast, již zaujímal, je jinak běžně v atmosféře nepozorovaná.



Obr. 2. Koláž gravitačních vln vznikajících mnoho hodin po výbuchu, snímky z polárního satelitu Aqua, převzato z [30]. Každý pruh o šířce 1 650 km představuje jeden přelet satelitu, tj. zprava doleva každý další pruh zobrazuje sousední lokalitu zhruba o hodinu a půl později. Všechny snímky jsou v pásmu absorpce CO<sub>2</sub> a zobrazené v původní projekci snímání

Jak už bylo zmíněno, vliv těchto atmosférických vln dosáhl až do ionosféry, což je elektricky nabitá vrstva, která začíná v mezoféře a dále pokračuje výše do termosféry. Je obecně známo, že gravitační vlny, nejen z vulkanických výbuchů, se mohou šířit až do této vrstvy (např. [1]). V ionosféře se projevují perturbacemi absolutního elektronového obsahu (TEC – total electron content), což je primární veličina popisující stav

<sup>3</sup>Například v jižní části And při přechodu Lambovy vlny byla zřejmě zvýšená aktivita gravitačních vln.

ionosféry. Hodnoty TEC jsou závislé na denní době a zeměpisné šířce a pohybují se okolo 10 až 80 jednotek TEC během dne. Změny TEC jsou v tomto případě pohybující se ionosférické poruchy (angl. traveling ionospheric disturbances – TIDs), jež mají charakter oscilací a mohou mít například negativní vliv na globální družicový polohový systém [3], jehož produkty se zároveň používají k analýze stavu TEC.

Těsně po výbuchu vznikla první velmi rychlá vlna TID (až přibližně 700 m/s) s amplitudou 0,1–3 jednotek TEC, která kromě času vzniku neměla žádné jiné společné znaky s Lambovou vlnou a nebyla tedy takto identifikována [39]. Následně vzniklo ještě několik vln TID, přičemž pozdější jsou konzistentní s gravitačními vlnami, jež vznikaly v hodinách po výbuchu. Rychlost i amplituda první i následujících vln se podle místa a způsobu měření liší a nejsou prozatím konzistentně uvedeny, např. [2], [17], [39], [40].

Stejně jako Lambova vlna se vlny TID dostaly až do antipodu v Alžírsku, přičemž třikrát obkroužily planetu, než byl jejich signál příliš slabý na zachycení. Nejdelší dosud zaznamenaná propagace vln TID byla přitom do vzdálenosti 10 000 km [40]. Celkově tedy všechny vzniklé vlnové pohyby dosáhly dosud nepozorovaných hodnot.

### 3. Důsledky na moři

Jelikož HTHH je podmořská sopka, není překvapením, že její výbuch měl i významný vliv na oceán. Další následek, který tedy chceme zmínit, byly vlny tsunami, jež vznikaly i mnoho hodin po prvotní explozi a které měly největší dopady na lidské životy i ve vzdálenějších oblastech. Vlny tsunami vznikaly třemi způsoby, 1. díky prvotní šokové vlně, 2. propadem podmořské dutiny, která se po výbuchu zhroutila a 3. díky Lambově vlně [19]. V nejbližším okolí, tj. na souostroví Tonga, mělo největší dopad tsunami vzniklé propadem dutiny a šokovou vlnou. Na pobřežích Severní a Jižní Ameriky to již naopak bylo vlivem Lambovy vlny. Zároveň, díky Lambově vlně, jež se šířila okolo celé planety, bylo možné zaznamenat výchylky hladiny moří i v mnohem vzdálenějších místech, jako je například Středozemní moře. Takto významné globální tsunami bylo předtím zaznamenáno pouze v případě Krakatoy [36].

Na nejbližší pevnině, ostrově Tongatapu, jenž je hlavním ostrovem souostroví Tonga, byly zaznamenány škody na meteorologické stanici umístěné na mobilní telefonní věži ve výšce 13 m n. m., což ukazuje na vlny dosahující minimálně této amplitudy [19]. Maximální výška vlny na ostrově byla zřejmě až 15 m [23]. V hlavním městě Nuku'alofa, které se na Tongatapu nachází a je lépe kryté, byla nahlášena amplituda 83 cm, ačkoliv přístroje zaznamenávající příliv hlásily před zničením více než 1 m [25].

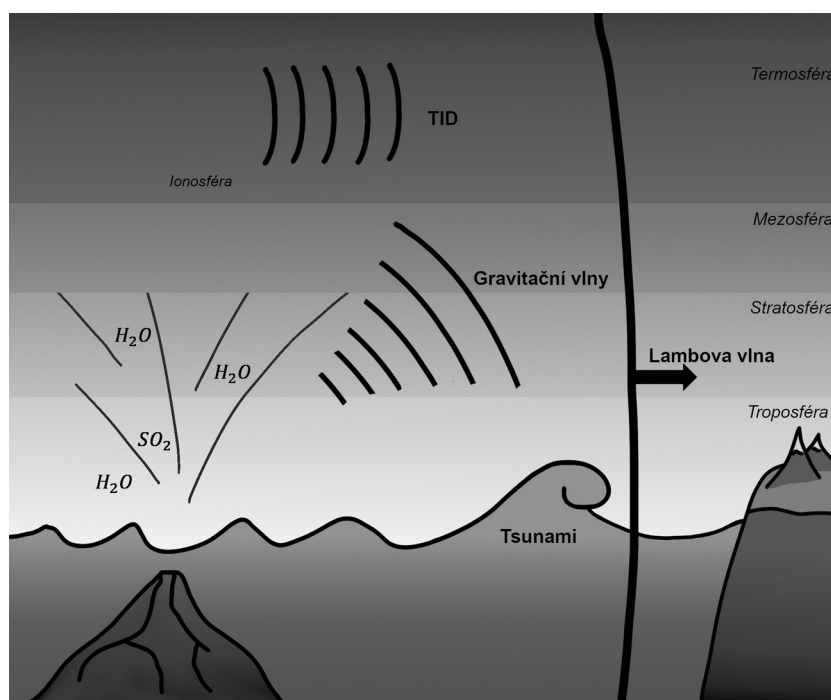
Jak bylo řečeno, HTHH se nachází v oblasti se silnou vulkanickou aktivitou a z toho důvodu jsou v okolí Nového Zélandu rozmístěné hlubokomořské tsunametry (ze sítě DART [9]), které zaznamenávají a vysílají varování o blížící se vlně tsunami. Tsunametry zaznamenávají nejen tlak vlny, ale i tlak vzduchu, jenž na vodu působí. Po výbuchu se výška prvotní vlny v Korálovém moři, měřená od dolu k hřbetu, pohybovala okolo 35 cm. Následovala jedna větší vlna a poté již menší, okolo 20 cm. Než doputovaly k Novému Zélandu, dosáhly amplitud až 80 cm, ačkoliv situace byla zkomplikována cyklónem Cody, který zde v téže době působil a též ovlivňoval hladinu oceánu [19]. Především novozélandský přístav Tutukaka byl tsunami a cyklónem velmi zasažen a byly hlášeny mnohé škody na majetku.

Po 7 hodinách se začalo tsunami dostávat i do vzdálených pobřeží jako je Japonsko, USA, Mexiko, Peru a další, kde byla amplituda vlny přes 1 m. Do přístavu Ventura, Kalifornie, USA dorazila první vlna za 7,65 h a v následujících třiceti hodinách byly hlášeny další vlny s amplitudami v řádu desítek centimetrů. I zde byly nahlášeny škody na majetku, především na docích. Na pláži v Peru došlo ke dvěma tragickým úmrtím a ekologickému znečištění z úniku převážené ropy [25].

Tsunami generovaná sopkami nejsou příliš častá, tvoří asi 5 % všech případů [20]. I přesto mohou mít katastrofické následky, zčásti i kvůli možnému nezachycení varovnými systémy, které jsou často uzpůsobené častějším druhům tsunami, jež vznikají pouze seismickou aktivitou.

#### 4. Závěr

Výbuch sopky Hunga Tonga – Hunga Ha’apai v lednu roku 2022 je jedna z významných přírodních katastrof v moderní historii lidstva. Výbuch nepodobný žádnému jinému nám přinesl mnoho znalostí z různých přírodních věd (viz schéma na obr. 3). Z hlediska chemismu atmosféry bylo na rozdíl od jiných sopečných výbuchů vyvrhnuto masivní množství vodní páry až do stratosféry a zároveň malé množství oxidu siřičitého, což nám pomůže porozumět dalším možnostem následků vulkanické činnosti. Současně výbuch slouží jako přirozený experiment pro ověření vědeckých teorií a validaci modelových výstupů.



Obr. 3. Schematický nákres různých následků výbuchu



Z hlediska dynamiky atmosféry jsme pozorovali naprosto nečekané množství různých vlnových pohybů a jejich interakcí. Je to první případ v době satelitního pozorování, kdy se podařilo zaznamenat Lambovu vlnu a tolik gravitačních vln z jednoho zdroje. Dále jsme mohli pozorovat komplexní a dalekosáhlou interakci moře a atmosféry a vznik oscilací mořské hladiny okolo celé planety.

Nicméně, přestože je vědecký přínos pozorování výbuchu HTHH očividně nepopíratelný a zcela jistě nám v následujících letech pomůže posunout atmosférické a další vědy vpřed, nesmíme zapomenout také na dopady na lidské životy. Souostroví Tonga bylo zavaleno popelem a kromě stamiliónových škod na majetku zde také tragicky zahynuly čtyři osoby a další byly zraněny. Další škody byly hlášeny v Japonsku, Novém Zélandu, USA a Peru, kde se do oceánu v důsledku tsunami vylilo 10 000 barelů ropy a vzniklo tak silné znečištění životního prostředí. Dále v Peru také zahynuly dvě osoby, kvůli nedostatečnému varování.

Výbuch HTHH by nás měl tedy poučit nejen o vědeckých pokrocích, ale také o připravenosti a varovných systémech pro případ dalších podobných situací, abychom se příště mohli vyvarovat ztrát na životech.

**Poděkování.** Dominika Hájková byla podpořena z projektu GA UK 240123. Zuzana Procházková byla podpořena z projektu GA UK 281021.

#### L i t e r a t u r a

- [1] ASTAFYEVA, E.: *Ionospheric detection of natural hazards*. Rev. Geophys. 57 (2019), 1265–1288.
- [2] ASTAFYEVA, E., MALETCKII, B., MIKESSELL, T. D., MUNAIBARI, E., RAVANELLI, M., COISSON, P., MANTA, F., ROLLAND, L.: *The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations*. Geophys. Res. Lett. 49 (2022).
- [3] CARTER, B. A., PRADIPTA, R., DAO, T., CURRIE, J. L., CHOY, S., WILKINSON, P., MAHER, P., MARSHALL, R., HARIMA, K., LE HUY, M., NGUYEN CHIEN, T., NGUYEN HA, T., HARRIS, T. J.: *The ionospheric effects of the 2022 Hunga Tonga volcano eruption and the associated impacts on GPS precise point positioning across the Australian region*. Space Weather 21 (2023).
- [4] COY, L., NEWMAN, P. A., WARGAN, K., PARTYKA, G., STRAHAN, S., PAWSON, S.: *Stratospheric circulation changes associated with the Hunga Tonga – Hunga Ha’apai eruption*. Geophys. Res. Lett. 49 (2022).
- [5] DESSLER, A.: *Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone*. Elsevier, 2000.
- [6] DUCHAMP, C., WRANA, F., LEGRAS, B., SELLITTO, P., BELHADJI, R., VON SAVIGNY, C.: *Observation of the aerosol plume from the 2022 Hunga Tonga – Hunga Ha’apai eruption with SAGE III/ISS*. Geophys. Res. Lett. 50 (2023).
- [7] EVAN, S., BRIOUDE, J., ROSENLOF, K. H., GAO, R.-S., PORTMANN, R. W., ZHU, Y., VOLKAMER, R., LEE, C. F., METZGER, J.-M., LAMY, K., et al.: *Rapid ozone depletion after humidification of the stratosphere by the Hunga Tonga eruption*. Science 382 (2023).
- [8] FRITTS, D. C., ALEXANDER, M. J.: *Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere*. Rev. Geophys. 41 (2003).
- [9] FRY, B., MCCURRACH, S.-J., GLEDHILL, K., POWER, W., WILLIAMS, M., ANGOVE, M., ARCAS, D., MOORES, C.: *Sensor network warns of stealth tsunamis*. Eos 101 (2020).

- [10] GARRETT, C. J. R.: *Atmospheric edge waves*. Q. J. R. Meteorol. Soc. 95 (1969), 731–753.
- [11] GLECKLER, P., WIGLEY, T., SANTER, B., GREGORY, J., ACHUTARAO, K., TAYLOR, K.: *Krakatoa's signature persists in the ocean*. Nature 439 (2006), 675–675.
- [12] GLOBAL VOLCANISM PROGRAM: *Report on Hunga Tonga – Hunga Ha'apai (Tonga)*. Bulletin of the Global Volcanism Network 47 (2022).
- [13] HARRIS, B. M., HIGHWOOD, E.: *A simple relationship between volcanic sulfate aerosol optical depth and surface temperature change simulated in an atmosphere-ocean general circulation model*. J. Geophys. Res. Atmos. 116 (2011).
- [14] JENKINS, S., SMITH, C., ALLEN, M., GRAINGER, R.: *Tonga eruption increases chance of temporary surface temperature anomaly above 1.5 °C*. Nat. Clim. Chang. 13 (2023), 127–129.
- [15] LABITZKE, K., MCCORMICK, M.: *Stratospheric temperature increases due to Pinatubo aerosols*. Geophys. Res. Lett. 19 (1992), 207–210.
- [16] LAMB, H.: *On waves in an elastic plate*. Proc. R. Soc. Lond. A 93 (1917), 114–128.
- [17] LIN, J.-T., RAJESH, P. K., LIN, C. C. H., CHOU, M.-Y., LIU, J.-Y., YUE, J., HSIAO, T.-Y., TSAI, H.-F., CHAO, H.-M., KUNG, M.-M.: *Rapid conjugate appearance of the giant ionospheric Lamb wave signatures in the Northern hemisphere after Hunga–Tonga volcano eruptions*. Geophys. Res. Lett. 49 (2022).
- [18] LU, J., LOU, S., HUANG, X., XUE, L., DING, K., LIU, T., MA, Y., WANG, W., DING, A.: *Stratospheric aerosol and ozone responses to the Hunga Tonga – Hunga Ha'apai volcanic eruption*. Geophys. Res. Lett. 50 (2023).
- [19] LYNETT, P., MCCANN, M., ZHOU, Z., RENTERIA, W., BORRERO, J., GREER, D., FA'ANUNU, O., BOSSERELLE, C., JAFFE, B., LA SELLE, S., RITCHIE, A., SNYDER, A., NASR, B., BOTT, J., GRAEHL, N., SYNOLAKIS, C., EBRAHIMI, B., CINAR, G. E.: *Diverse tsunamigenesis triggered by the Hunga Tonga – Hunga Ha'apai eruption*. Nature 609 (2022), 728–733.
- [20] MANNEELA, S., KUMAR, S.: *Overview of the Hunga Tonga – Hunga Ha'apai volcanic eruption and tsunami*. J. Geol. Soc. India 98 (2022), 299–304.
- [21] MILLAN, L., SANTEE, M. L., LAMBERT, A., LIVESSEY, N. J., WERNER, F., SCHWARTZ, M. J., PUMPHREY, H. C., MANNEY, G. L., WANG, Y., SU, H., et al.: *The Hunga Tonga – Hunga Ha'apai hydration of the stratosphere*. Geophys. Res. Lett. 49 (2022).
- [22] OPPENHEIMER, C.: *Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815*. Prog. Phys. Geogr. 27 (2003), 230–259.
- [23] PAKOKSUNG, K., SUPPASRI, A., IMAMURA, F.: *The near-field tsunami generated by the 15 January 2022 eruption of the Hunga Tonga – Hunga Ha'apai volcano and its impact on Tongatapu, Tonga*. Sci. Rep. 12 (2022), 15187.
- [24] PEDLOSKY, J.: *Waves in the ocean and atmosphere*. Springer, 2003.
- [25] RAMÍREZ-HERRERA, M. T., COCA, O., VARGAS-ESPINOSA, V.: *Tsunami effects on the coast of Mexico by the Hunga Tonga – Hunga Ha'apai volcano eruption, Tonga*. Pure Appl. Geophys. 179 (2022), 1117–1137.
- [26] READ, W., FROIDEVAUX, L., WATERS, J.: *Microwave limb sounder measurement of stratospheric SO<sub>2</sub> from the Mt. Pinatubo volcano*. Geophys. Res. Lett. 20 (1993), 1299–1302.

- [27] SCHOEBERL, M., WANG, Y., UHEYAMA, R., DESSLER, A., TAHA, G., YU, W.: *The estimated climate impact of the Hunga Tonga – Hunga Ha’apai eruption plume*. Geophys. Res. Lett. 50 (2023).
- [28] SCHOEBERL, M. R., WANG, Y., UHEYAMA, R., TAHA, G., JENSEN, E., YU, W.: *Analysis and impact of the Hunga Tonga – Hunga Ha’apai stratospheric water vapor plume*. Geophys. Res. Lett. 49 (2022).
- [29] SEINFELD, J. H., PANDIS, S. N.: *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, 2016.
- [30] SETVÁK, M., KAŇÁK, J., SPURNÝ, P., BOROVIČKA, J.: *Waves generated by Hunga Tonga eruption*. Convection Working Group of EUMETSAT Workshop, 16–20 May 2022, Budapest, 2022.
- [31] SMITH, I. E., PRICE, R. C.: *The Tonga–Kermadec arc and Havre–Lau back-arc system: Their role in the development of tectonic and magmatic models for the western Pacific*. J. Volcanol. Geotherm 156 (2006), 315–331.
- [32] STOBER, G., LIU, A., KOZLOVSKY, A., QIAO, Z., KROCHIN, W., SHI, G., KERO, J., TSUTSUMI, M., GULBRANDSEN, N., NOZAWA, S., LESTER, M., BAUMGARTEN, K., BELOVA, E., MITCHELL, N.: *Identifying gravity waves launched by the Hunga Tonga – Hunga Ha’apai volcanic eruption in mesosphere/lower-thermosphere winds derived from CONDOR and the Nordic Meteor Radar Cluster*. Ann. Geophys. 41 (2023), 197–208.
- [33] STOCKER, M., LADSTÄDTER, F., WILHELMSSEN, H., STEINER, A. K.: *Quantifying stratospheric temperature signals and climate imprints from post-2000 volcanic eruptions*. Geophys. Res. Lett. 46 (2019), 12486–12494.
- [34] TAYLOR, G. I.: *Waves and tides in the atmosphere*. Proc. R. Soc. Lond. A 126 (1929), 169–183.
- [35] TOOHEY, M., KRÜGER, K., BITTNER, M., TIMMRECK, C., SCHMIDT, H.: *The impact of volcanic aerosol on the Northern hemisphere stratospheric polar vortex: mechanisms and sensitivity to forcing structure*. Atmos. Chem. Phys. 14 (2014), 13063–13079.
- [36] VILLALONGA, J., AMORES, À., MONSERRAT, S., MARCOS, M., GOMIS, D., JORDÀ, G.: *Observational study of the heterogeneous global meteotsunami generated after the Hunga Tonga – Hunga Ha’apai volcano eruption*. Sci. Rep. 13 (2023).
- [37] WANG, X., RANDEL, W., ZHU, Y., TILMES, S., STARR, J., YU, W., GARCIA, R., TOON, B., PARK, M., KINNISON, D., et al.: *Stratospheric climate anomalies and ozone loss caused by the Hunga Tonga volcanic eruption*. Authorea Preprints (2022).
- [38] WITZE, A.: *Why the Tongan eruption will go down in the history of volcanology*. Nature 602 (2022), 376–378.
- [39] WRIGHT, C. J., HINDLEY, N. P., ALEXANDER, M. J., BARLOW, M., HOFFMANN, L., MITCHELL, C. N., PRATA, F., BOUILLON, M., CARSTENS, J., CLERBAUX, C., OSPREY, S. M., POWELL, N., RANDALL, C. E., YUE, J.: *Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga – Hunga Ha’apai eruption*. Nature 609 (2022), 741–746.
- [40] ZHANG, S.-R., VIERINEN, J., AA, E., GONCHARENKO, L. P., ERICKSON, P. J., RIDEOUT, W., COSTER, A. J., SPICHER, A.: *2022 Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb waves*. Front. Astron. Space Sci. 9 (2022).
- [41] ZHU, Y., BARDEEN, C. G., TILMES, S., MILLS, M. J., WANG, X., HARVEY, V. L., TAHA, G., KINNISON, D., PORTMANN, R. W., YU, P., et al.: *Perturbations in stratospheric aerosol evolution due to the water-rich plume of the 2022 Hunga–Tonga eruption*. Commun. Earth Environ. 3 (2022), 248.