

Registrace seismických jevů stanicí VRAC v letech 2011 až 2022 v porovnání s globální seismicitou

Registrations of seismic events by station VRAC in the period from 2011 to 2022 in comparison to global seismicity

Josef Havíř 

Ústav fyziky Země, PřF MU, Tvrdeho 12, 602 00 Brno, Česká republika

Key words:

seismic monitoring, teleseismic events, station VRAC, detection capability, global seismicity

 havir@ipe.muni.cz

Editor:

David Buriánek

Abstract

Broadband seismic station VRAC (Vranov u Brna), operated by IPE (Institute of physics of the Earth, Masaryk University) is one of certified stations of the IMS CTBTO (International Monitoring System of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization). That is why its capability to record the signal of distant seismic events is very important. This article tries to show, for which seismically active regions in the world the usage of station VRAC for global seismic monitoring could be suitable. For this purpose the distribution of events registered by station VRAC in the period 2011–2022 was compared with global seismicity characteristics evaluated on the base of the REB bulletins (Reviewed Event Bulletin) of the CTBTO.

In the period 2011–2022, station VRAC registered 81 110 seismic events, 60 120 are events with known location (calculated in the IPE or adopted from another seismological institutes), and the epicentral distance from the station VRAC exceeds 3° for 24 314 of them. During same period IMS located 440 787 seismic events listed in the REB bulletins, data of station VRAC were used for evaluation of 21 453 of these events.

The poor detection of seismic events by station VRAC was observed not only in the case of regions towards which the station VRAC is situated in the seismic shadow zone but also for regions in the distances from 90° to 103° from the station. It means less registrations of events from the seismically active regions of Sumatra, Philippines or Central America. The worse detectability of events in distances from 90° to 103° was expected, but not to that extent. On the contrary, as a result of the caustic zone of PKP wave the number of registrations, including moderate or weak seismic events, strongly increases, in the case of station VRAC. So the events from the southern part of New Hebrides Trench or from the Samoa region are well registered by station VRAC.

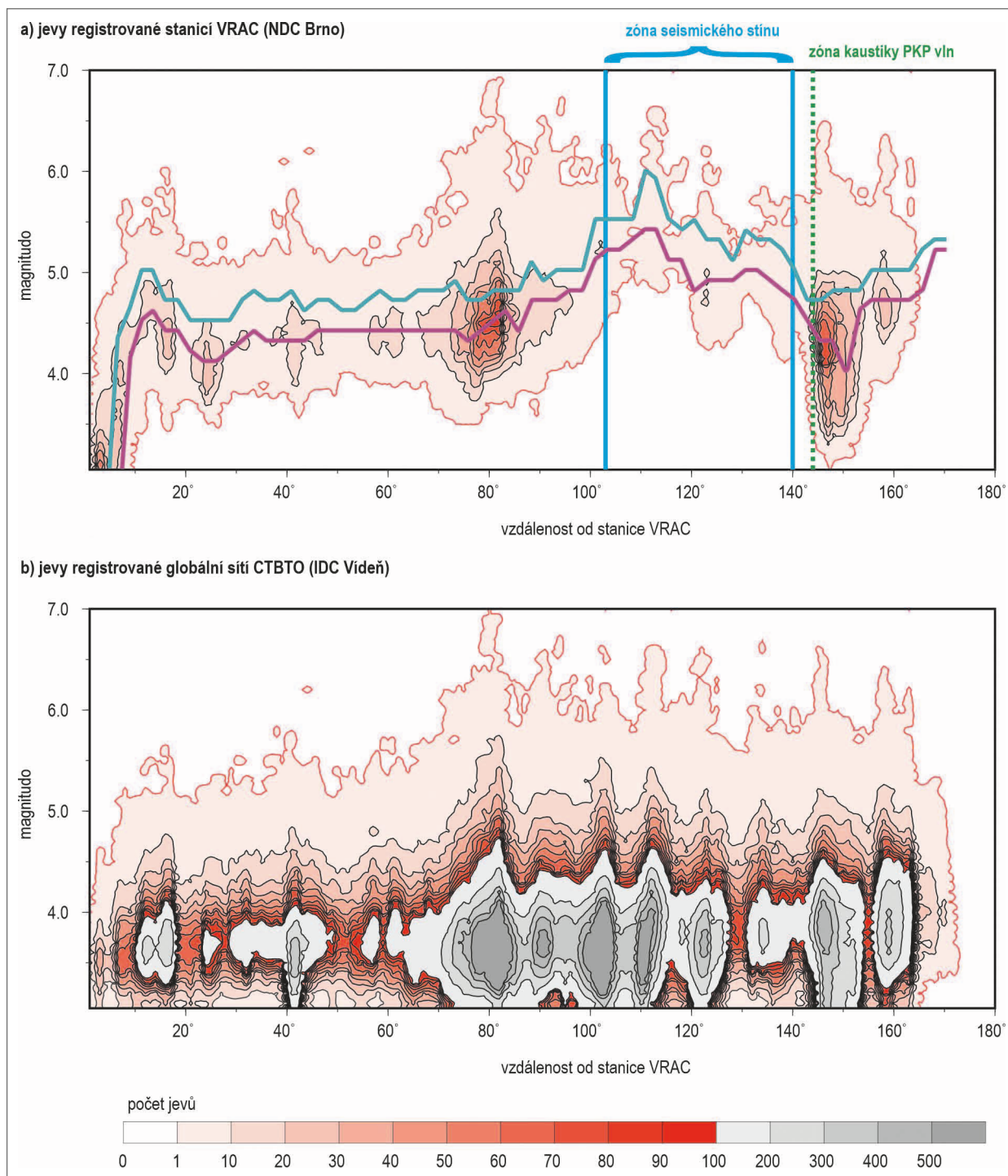
Doporučená citace článku:

Havíř, J. (2023): Registrace seismických jevů stanicí VRAC v letech 2011 až 2022 v porovnání s globální seismicitou – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 30, 1–2, 30–37.

DOI: <https://doi.org/10.5817/GVMS2023-33603>

Úvod

Širokopásmová seismická stanice VRAC (Vranov u Brna) je, mimo jiné, jednou z certifikovaných stanic globální seismické sítě IMS CTBTO (International Monitoring System of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization). Proto je důležité sledovat také její schopnost registrovat vzdálené seismické jevy, s epicentry situovanými v různých částech světa. Smyslem tohoto článku je stručně ukázat, jaké vzdálené jevy, tj. z jakých regionů, jsou stanicí VRAC běžně registrovány. Pro porovnání relativních počtů otřesů registrovaných stanicí VRAC s celkovým rozložením projevů globální seismicity byly využity výsledky zpracování dat globální seismické sítě IMS CTBTO získané v Mezinárodním datovém centru (IDC – International Data Centre) ve Vídni.



Obr. 1: Graf distribuce seismických jevů registrovaných v letech 2011 až 2022 vzhledem k magnitudu a k epicentrální vzdálenosti zdroje od stanice VRAC. a) Seismické jevy zjištěné na stanici VRAC v datovém centru ÚFZ v Brně (fialová křivka vyznačuje hodnoty nejčastějšího magnitudu na základě magnitudo-frekvenční analýzy, zelená křivka vyznačuje hodnoty magnitudu blízké předpokládanému detekčnímu prahu stanice VRAC – převzato z práce Havíř 2022) b) Seismické jevy zahrnuté do REB bulletinu CTBTO.

Fig. 1: Distribution of seismic events recorded in the period from 2011 to 2022 shown in the graph plotting the magnitude against epicentral distance from the station VRAC. a) Seismic events recorded by station VRAC evaluated in data centre IPE Brno (the purple curve shows the most frequent magnitude based on the magnitudo-frequency analysis, the green curve indicated the magnitudo value close to the assumed detection threshold of the VRAC station – after Havíř 2022) b) Seismic events listed in REB bulletins CTBTO.

Celkové počty registrovaných jevů

Stanice VRAC je provozována Ústavem fyziky Země (ÚFZ) Masarykovy univerzity. Data stanice VRAC jsou nezávisle zpracovávána ve dvou centrech, a to v datovém

centru ÚFZ v Brně a v Mezinárodním datovém centru CTBTO ve Vídni (viz Havíř et al. 2003).

Ve zpracovatelském centru ÚFZ v Brně jsou data stanice VRAC využita spolu s daty dalších širokopásmových

stanic provozovaných Ústavem fyziky Země pro sledování projevů lokální i vzdálené seismicity. V letech 2011 až 2022 bylo ve zpracovatelském centru ÚFZ na stanici VRAC zjištěno 126 220 seismických fází příslušející 81 110 seismickým jevům. Některé jevy (typicky exploze v lomech) nebyly lokalizovány. Parametry zdroje tak byly ve zpracovatelském centru ÚFZ v letech 2011 až 2022 určeny anebo převzaty pro 60 120 seismických jevů zaznamenaných stanicí VRAC. Více než polovina těchto otřesů se známou lokací měla epicentra situovaná v malé vzdálenosti od stanice VRAC (tj. do 3°), v naprosté většině byly tyto blízké jevy reprezentovány mikrootřesy s magnitudem pod hodnotou 3. Ze vzdálenosti větší než 3° od stanice bylo zaznamenáno jen 24 314 seismických jevů, v teleseismické vzdálenosti (tj. ve vzdálenosti vyšší než 20°) se nacházelo 20 699 z těchto otřesů.

Současně jsou autentikovaná data (tedy data kódovaná tak, aby nemohlo dojít k jejich záměně) přenášena také do Mezinárodního datového centra (IDC) ve Vídni, kde jsou využita k rutinnímu zpracování dat celé globální sítě k určení lokace, popřípadě dalších parametrů, vybraných seismických jevů. Výsledky zpracování dat v IDC jsou po revizi spolupracujícím organizacím dostupné ve formě tzv. REB bulletinů (Reviewed Event Bulletin). V letech 2011 až 2022 bylo do REB bulletinu CTBTO zařazeno 440 787 seismických jevů, data stanice VRAC byla využita při zpracování 21 453 z těchto otřesů.

Distribuce seismických jevů v závislosti na epicentrální vzdálenosti

Epicentra zemětřesení jsou na zemském povrchu distribuována značně nerovnoměrně. Prostorová vazba převážné většiny epicenter přirozených seismických jevů na okraje litosférických desek je známa již od 60. let minulého století, kdy byla teorie litosférických desek formována (viz např. Isacks et al. 1968). Z pohledu konkrétní seismické stanice, v tomto případě stanice VRAC, se tato nerovnoměrnost ostře odráží také v nerovnoměrné distribuci seismických jevů vztážené k epicentrální vzdálenosti od dané stanice. Graficky zmíněnou distribuci seismických jevů z pohledu stanice VRAC znázorňuje obrázek 1, přičemž dolní graf (obr. 1b) zahrnuje všechny seismické jevy, které vyskytly v letech 2011 až 2022 (na základě REB bulletinů CTBTO), zatímco horní graf (obr. 1a) zahrnuje pouze ty otřesy, jejichž signál byl stanicí VRAC zaregistrován. V případě otřesů, jejichž epicentrální vzdálenost od stanice VRAC se pohybovala v rozmezí od 15° do 85° a od 140° do 180°, korespondují zvýšené počty otřesů registrovaných na stanici VRAC (obr. 1a) s maximy

v globální distribuci jevů sledovanou na základě REB bulletinů CTBTO (obr. 1b).

V souladu s očekáváním je patrný nedostatek registrací jevů, vůči jejichž epicentru se stanice VRAC nachází v zóně seismického stínu, tedy jevů s epicentrální vzdáleností v rozmezí od 103° do 140°. V zóně seismického stínu nelze detekovat signál přímé vlny, a jsou tak registrovány pouze sekundární odražené a difrakované fáze, což vede ke zvýšení detekčního prahu. Zatímco v epicentrálních vzdálenostech odpovídajících zóně seismického stínu se hodnota nejčtenějšího magnituda jevů registrovaných na stanici VRAC pohybuje na úrovni 5,2 až 5,4 a detekční práh (tj. hodnota magnituda, od níž lze předpokládat spolehlivou detekci seismických jevů) se blíží hodnotě 6, v případě teleseismických jevů ze vzdáleností 20° až 80° se nejčtenější hodnota magnituda pohybuje v rozmezí od 4,1 do 4,5 a detekční práh se pohybuje mezi hodnotami 4,5 až 4,9 (Havíř 2022). Přitom naprostá většina globálně registrovaných jevů je reprezentována relativně slabými otřesy s magnitudem menším než 5. Tyto slabé jevy tvoří cca 98,4% všech záznamů obsažených v REB bulletinu CTBTO. Jestliže tedy stanice VRAC z epicentrálních vzdáleností odpovídajících seismickému stínu spolehlivě registruje teprve silné otřesy s magnitudem přibližně o hodnotě 6 a více, je zřejmé, že celkový počet takto registrovaných otřesů nemůže být vysoký, a to i přesto, že se v těchto epicentrálních vzdálenostech nachází hned několik seismicky vysoce aktivních regionů. Jisté slabé maximum v distribuci seismických jevů registrovaných stanicí VRAC, odpovídající také zvýšenému počtu jevů zaznamenaných v REB bulletinu, lze v oblasti seismického stínu pozorovat pouze v epicentrálních vzdálenostech 121° až 123°. V těchto vzdálenostech se již projevují relativně vyšší amplitudou fáze PKiKP (podélní vlna odražená od rozhraní vnějšího a vnitřního jádra) a PKP_{df} (podélná vlna procházející vnitřním jádrem, dříve běžně označovaná jako PKIKP – viz Storchak et al. 2003). Přehled závislosti amplitudy na epicentrální vzdálenosti těchto fází podávají např. Bormann et al. (2009), Hellfrisch, Mainprice (2019), Mizoue (1977) či Sweetser a Blandford (1973).

Méně samozřejmý je zásadní nedostatek registrací stanice VRAC v případě zemětřesení z epicentrálních vzdáleností kolem 90°. V této epicentrální vzdálenosti je sice možné očekávat pokles v počtu registrovaných jevů s ohledem na klesající relativní amplitudu P vln od vzdálenosti cca 85°, ve vzdálenosti 90° by měl být ale podle publikovaných křivek popisujících závislost amplitudy na vzdálenosti tento pokles ještě relativně mírný (např. Veith, Clawson 1972; Young, Lay 1989), což korespondovalo také s výsledky odhadu detekční schopnosti stanice

Obr. 2: Schematická mapa distribuce seismických jevů (počet jevů na plochu 1° čtvereční) s hodnotou magnituda 4 a vyšší registrovaných v letech 2011 až 2022. Modré křivky vymezují oblasti, vůči kterým se stanice VRAC nachází v seismickém stínu (tyto oblasti jsou zvýrazněny modrou barvou podkladu). Zelená tečkovaná čára vyznačuje vzdálenost odpovídající zóně kaustiky PKP vln. a) Seismické jevy zjištěné na stanici VRAC v datovém centru ÚFZ v Brně b) Seismické jevy zahrnuté do REB bulletinu CTBTO. Regiony vyznačené v mapě: 1 – Balkánský poloostrov a Helénský oblouk, 2 – Island, 3 – Zagros, 4 – Hindúkuš, 5 – Sumatra, 6 – Filipíny, 7 – Japonsko a Kurilské ostrovy, 8 – Aleuty a jižní Aljaška, 9 – jižní Mexiko a Střední Amerika, 10 – centrální Chile, 11 – Jižní Sandwichovy ostrovy, 12 – Nová Guinea a Šalamounovy ostrovy, 13 – jižní část příkopu Nových Hebrid, 14 – Samoa, 15 – Tonga.



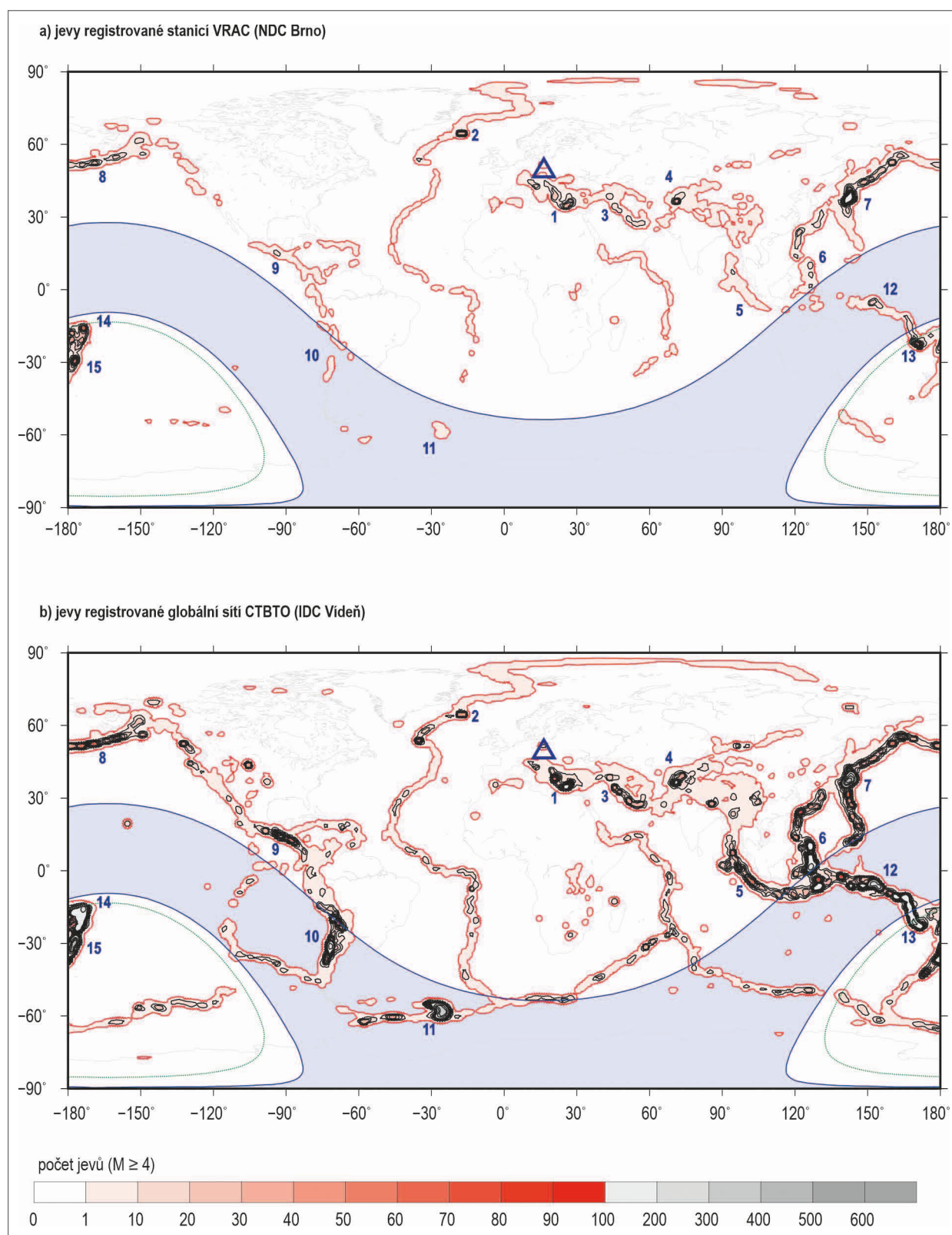
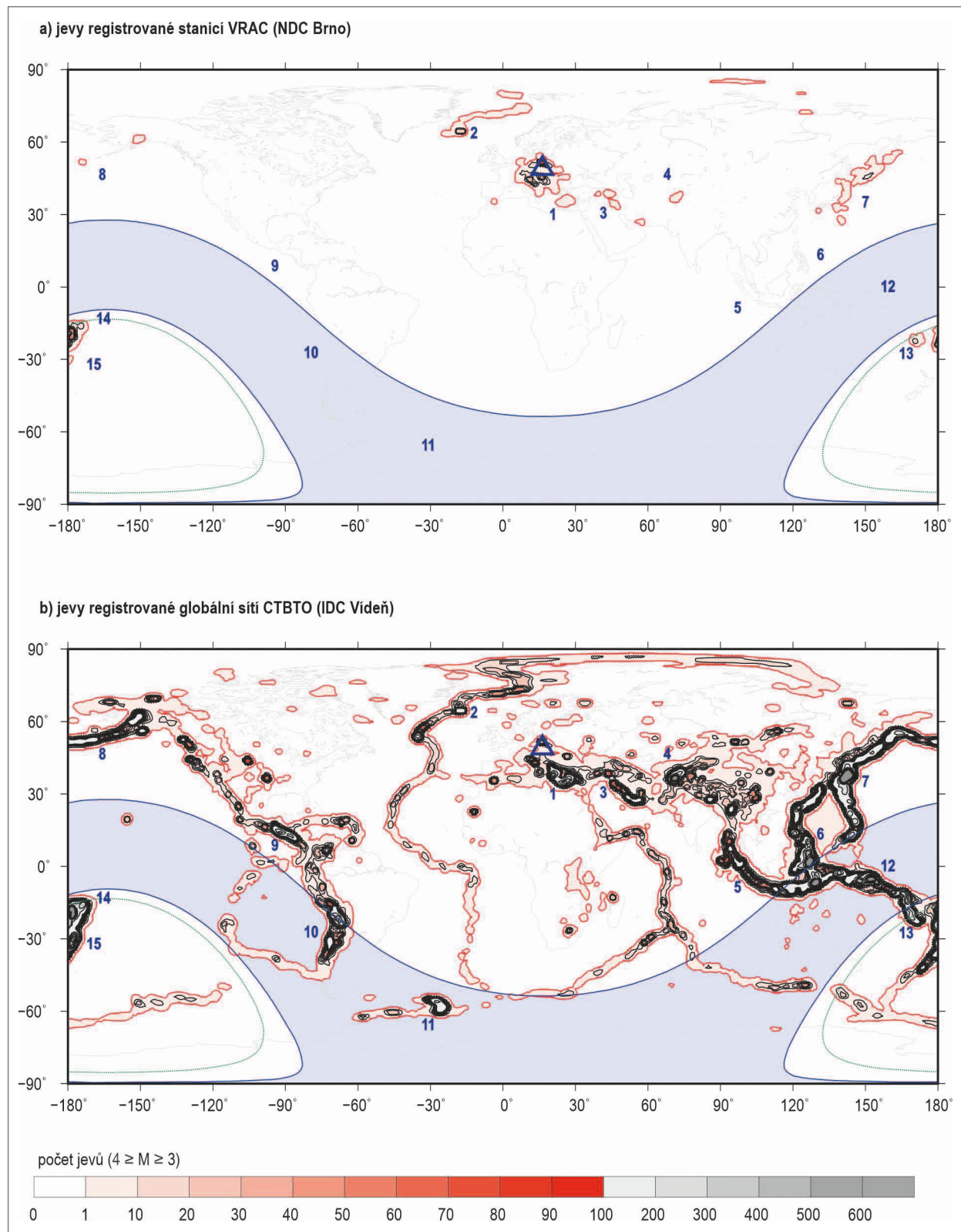
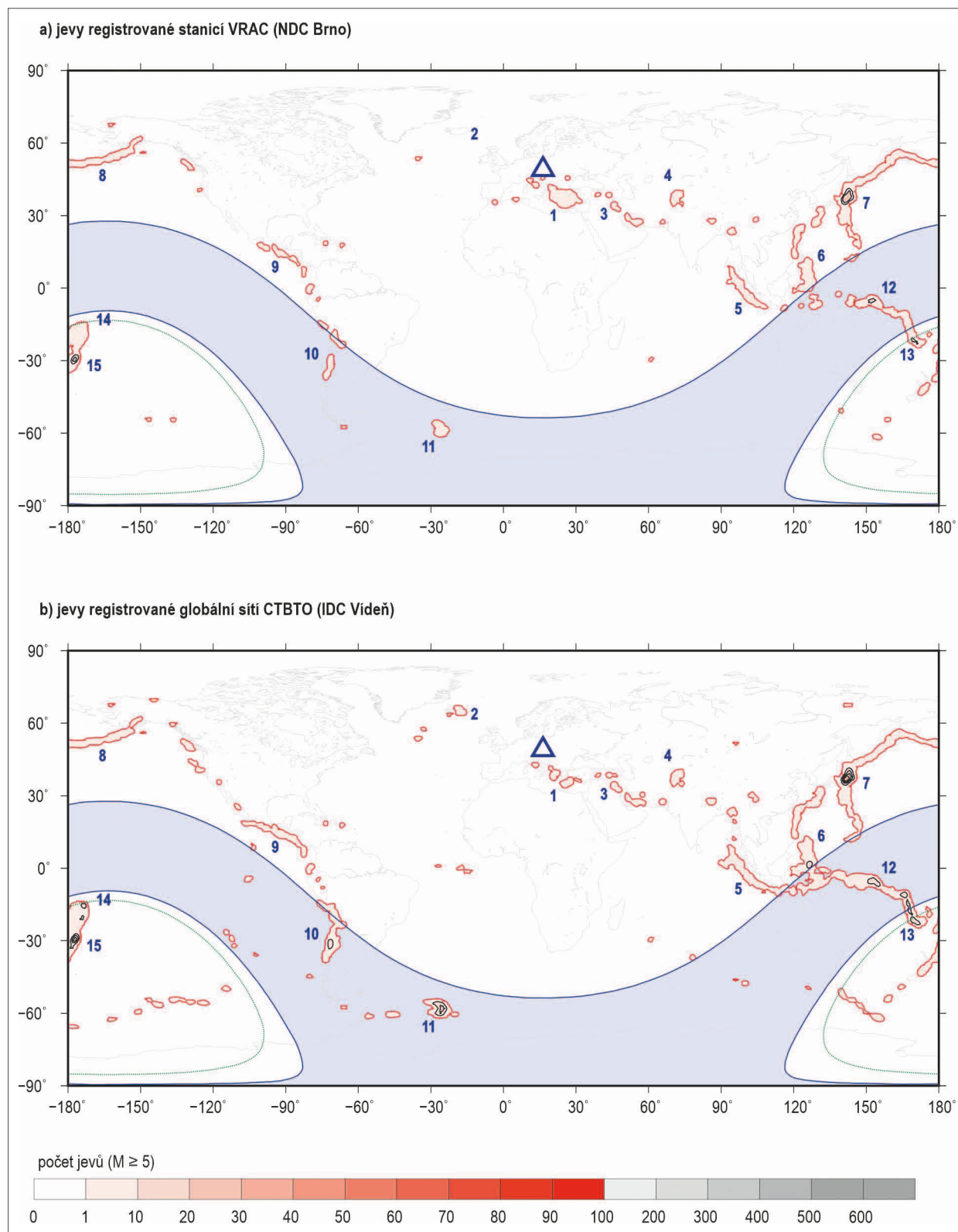


Fig. 2: Schematic map of the seismic event distribution (number of events per 1° squared area) with magnitudo of value 4 or higher registered in the period from 2011 to 2022. The blue solid curves delineate the area to which the station VRAC is situated in the seismic shadow zone (this area is highlighted with a blue background). The green dotted curve represents the distances corresponding to the caustic zone of PKP waves. a) Seismic events recorded by station VRAC evaluated in data centre IPE Brno b) Seismic events listed in REB bulletins CTBTO. Regions marked on the map: 1 – Balkan Peninsula and Hellenic Arc, 2 – Iceland, 3 – Zagros, 4 – Hindu Kush, 5 – Sumatra, 6 – Philippines, 7 – Japan and Kuril Islands, 8 – Aleutians and southern Alaska, 9 – southern Mexico and Central America, 10 – central Chile, 11 – South Sandwich Islands, 12 – New Guinea and Solomon Islands, 13 – southern part of the New Hebrides Trench, 14 – Samoa, 15 – Tonga.



Obr. 3: Schematická mapa distribuce seismických jevů (počet jevů na plochu 1° čtvereční) s hodnotou magnituda od 3 do 4 v letech 2011 až 2022. Modré křivky vymezují oblasti, vůči kterým se stanice VRAC nachází v seismickém stínu (tyto oblasti jsou zvýrazněny modrou barvou podkladu). Zelená tečkovaná čára vyznačuje vzdálenost odpovídající zóně kaustiky PKP vln. a) Seismické jevy zjištěné na stanici VRAC v datovém centru ÚFZ v Brně b) Seismické jevy zahrnuté do REB bulletinu CTBTO. Regiony vyznačené v mapě: viz obr. 2.

Fig. 3: Schematic map of the seismic event distribution (number of events per 1° squared area) with magnitudo in the range of values from 3 to 4 registered in the period from 2011 to 2022. The blue solid curves delineate the area to which the station VRAC is situated in the seismic shadow zone (this area is highlighted with a blue background). The green dotted curve represents the distances corresponding to the caustic zone of PKP waves. a) Seismic events recorded by station VRAC evaluated in data centre IPE Brno b) Seismic events listed in REB bulletins CTBTO. Regions marked on the map: see fig. 2.



Obr. 4: Schematická mapa distribuce seismických jevů (počet jevů na plochu 1° čtvereční) s hodnotou magnitudy 5 a vyšší registrovaných v letech 2011 až 2022. Modré křivky vymezují oblasti, vůči kterým se stanice VRAC nachází v seismickém stínu (tyto oblasti jsou zvýrazněny modrou barvou podkladu). Zelená tečkovaná čára vyznačuje vzdálenost odpovídající zóně kaustiky PKP vln. a) Seismické jevy zjištěné na stanicí VRAC v datovém centru ÚFZ v Brně b) Seismické jevy zahrnuté do REB bulletinu CTBTO. Regiony vyznačené v mapě: viz obr. 2.

Fig. 4: Schematic map of the seismic event distribution (number of events per 1° squared area) with magnitude of value 5 or higher registered in the period from 2011 to 2022. The blue solid curves delineate the area to which the station VRAC is situated in the seismic shadow zone (this area is highlighted with a blue background). The green dotted curve represents the distances corresponding to the caustic zone of PKP waves. a) Seismic events recorded by station VRAC evaluated in data centre IPE Brno b) Seismic events listed in REB bulletins CTBTO. Regions marked on the map: see fig. 2.

VRAC založeném na studiu magnitudo-četnostních vztahů (Havíř 2022). Pokles počtu registrací stanice VRAC u jevů s epicentrální vzdáleností kolem 90° se tak jeví větší, než jaký byl očekáván.

Distribuce seismických jevů v mapě

Zásadní nerovnoměrnost v distribuci projevů globální seismicity se zřetelně ukazuje v mapě na obrázku 2. Pro základní porovnání registrací stanice VRAC (obr. 2a) s obrazem globální seismicity sestaveným na základě dat globální sítě IMS CTBTO (obr. 2b) byly zvoleny otřesy s magnitudem 4 anebo větším. Detekční práh celé globální seismické sítě IMS CTBTO se totiž v různých regionech povrchu planety Země pohybuje od hodnoty magnituda 3,0 do hodnoty 3,7 (Kværna – Ringdal 2013). Soubor jevů zaznamenaných sítí IMS CTBTO by tak měl v případě jevů s magnitudem 4 anebo vyšším dostatečně spolehlivě poskytovat nezkreslený kompletní přehled o charakteru globální seismicity.

Je dobře patrné, že většina projevů seismické aktivity je nejen vázána na úzké zóny korespondující s okraji litosférických desek, ale v rámci těchto zón je navíc ještě soustředěna do užších regionů. Patnáct z nich je blíže popsáno čísly v mapě na obrázku 2. Tyto regiony nepředstavují úplný seznam seismicky vysoce aktivních regionů, jsou zde vybrány jen některé, a to ty, kterým je vhodné věnovat větší pozornost při porovnání registrací stanice VRAC s distribucí projevů globální seismicity.

Porovnání globální distribuce seismických jevů na základě REB bulletinů CTBTO (obr. 2b) s distribucí otřesů registrovaných stanicí VRAC (obr. 2a) ukazuje, že se v maximech distribucí otřesů registrovaných stanicí VRAC zřetelně odráží nejen seismicky neaktivnější region nacházející se v regionální vzdálenosti od stanice, tj. region Balkánského poloostrova a Helénské obloky, ale také většina dalších seismicky výrazně aktivních regionů se vzdáleností do 85°. Zvláště zřetelně se v této distribuci odráží seismická aktivita v relativně blízkém regionu Islandu (vzdálenost od stanice VRAC je cca 23° až 25°) a v regionech s velmi početným výskytem otřesů s magnitudem o hodnotě 4 a více, tedy zejména v regionu Japonska a Kurilských ostrovů a v regionu Aleut a j. Aljašky. Poněkud slabší maxima v regionech Zagrosu a Hindúkuše lze přičíst menšímu počtu středně silných a silných jevů v těchto místech ve srovnání s jinými seismicky aktivními regiony v globálním měřítku. Co je ovšem na první pohled zřejmé, je nedostatečné množství registrací otřesů z regionu Sumatry, Filipín a j. Mexika a Střední Ameriky na datech stanice VRAC, přestože v globálním měřítku patří tato místa k seismicky neaktivnějším regionům (pokud jde o počet otřesů s magnitudem 4 a více) a přestože stanice VRAC se vůči nim ještě nenachází v zóně seismického stínu. Tento fakt ukazuje na významnější zvýšení detekčního prahu stanice VRAC již ve vzdálenostech cca 90° až 103° (tedy již výrazně před hranicí zóny seismického stínu), než ukazovaly výsledky odhadu detekčního prahu stanice VRAC na základě studia magnitudo-četnostního vztahu (Havíř 2022). Toto zjištění podtrhuje také porovnání distribuce

epicenter zemětřesení slabých jevů s magnitudem o hodnotě 3 až 4 (obr. 3), tedy jevů s magnitudem zřetelně pod detekčním prahem stanice VRAC. Zatímco v bližších jmenovaných regionech zaregistrovala stanice VRAC i omezené množství takto slabých otřesů, z prostoru Sumatry, Filipín a Střední Ameriky takto slabé jevy již stanicí VRAC registrovány nejsou.

Nedostatek registrací otřesů, vůči jejichž epicentru se stanice VRAC nachází v zóně seismického stínu, není překvapivý. Nicméně odražené vlny silnějších otřesů, převážně s magnitudem o hodnotě 5 a vyšším, mohou být seismickou stanicí registrovány i přesto, že se stanice nachází v seismickém stínu. To koresponduje se skutečností, že epicentra jevů registrovaných stanicí VRAC jsou, pokud jde o zemětřesení, vůči kterým se stanice VRAC nacházela v seismickém stínu, soustředěna do míst vyznačujících se vysokým počtem silných jevů s magnitudem o hodnotě 5 a vyšším (obr. 4), tedy do regionů centrálního Chile, Jižních Sandwichových ostrovů, Nové Guineje a Šalamounových ostrovů.

Vyšší počty otřesů jsou pak stanicí VRAC registrovány ze seismicky aktivních regionů vzdálenějších než 140°, vůči kterým se stanice VRAC nachází již za zónou seismického stínu. Převážná většina zemětřesení registrovaných stanicí VRAC z těchto vzdáleností pochází z regionů j. části příkopu Nových Hebrid (tj. z prostoru jz. od souostroví Fidži), souostroví Samoa a souostroví Tonga, které i v globálním měřítku patří k seismicky nejaktivnějším oblastem (obr. 2). Silné otřesy s magnitudem 5 nebo vyšším byly v letech 2011 až 2022 častěji pozorovány v regionu souostroví Tonga (obr. 4). V četnosti záznamů středně silných či dokonce i slabých otřesů (tj. otřesů s magnitudem o hodnotě 3 až 4 – viz obr. 3) na stanici VRAC se ale více projevují regiony j. části příkopu Nových Hebrid a souostroví Samoa. Vzdálenost velkého množství epicenter zemětřesení ze zmíněných regionů od stanice VRAC činí cca 143° až 146° a tyto jevy se tak nacházejí v tzv. zóně kaustiky PKP vln, kde ve stejný časový okamžik přichází do jednoho a téhož místa signál těchto vln po více drahách a interferencí signálů odpovídajících různým paprskům pak dochází ke zřetelnému zesílení amplitudy (viz např. Borman et al. 2009; Gutenberg 1958; Houard et al. 1993; Massot, Rocard 1982; Mizoue 1977; Shahidi 1968). Vyhodnocení distribucí zemětřesení registrovaných stanicí VRAC tedy ukazuje, že účinky zmíněné kaustiky PKP vln se na počtech registrovaných jevů projevují skutečně zřetelně.

Závěr

Epicentra převážné většiny seismických jevů zaznamenaných stanicí VRAC v letech 2011 až 2022 se nacházela v malých vzdálenostech od stanice (tj. ve vzdálenostech do 3°). Vzdálenější otřesy byly registrovány především z vysoce seismicky aktivních regionů, jejichž vzdálenost byla buď menší než 90° anebo větší než 140°. Velmi časté jsou tak záznamy zemětřesení z regionů Balkánského poloostrova a Helénské obloky, Islandu, Zagrosu, Hindúkuše, Japonska a Kurilských ostrovů, Aleut a j. části Aljašky, j. části příkopu Nových Hebrid (tj. prostor

z. od souostroví Fidži), souostroví Samoa a souostroví Tonga. Naopak výrazně snížené počty registrací projevů seismické aktivity jsou pozorované nejen u regionů, vůči kterým se stanice VRAC nachází v zóně seismického stínu, tj. regionů centrálního Chile, Jižních Sandwichevých ostrovů, Nové Guineje a Šalamounových ostrovů, ale také u regionů situovaných ve vzdálenostech 90° až 103°. Relativně nižší počty registrací na stanici VRAC lze tak sledovat také u regionů Sumatry, Filipín a Mexika a Střední Ameriky, přestože se v globálním měřítku jedná o jednu z nejvíce seismicky aktivních regionů. Naopak

zřetelně příznivě relativní počty registrací na stanici VRAC ovlivňuje zóna kaustiky PKP vln, která se projevuje častějšími záznamy otřesů z regionu j. části příkopu Nových Hebrid a souostroví Samoa, a to i v případě slabších jevů s magnitudem nižším než 4, tedy jevů nacházejících se pod detekčním prahem stanice VRAC.

Poděkování

Príspevek vznikl s finanční podporou projektu MŠMT, program č. ML2015079, CzechGeo/Epos. Autor děkuje oběma recenzentům za jejich připomínky.

Literatura

- Bormann, P., Baumbach, M., Bock, G., Grosser H., Choy, G. L., Boatwright, J. (2009). Seismic sources and source parameters. – In: Bormann, P. (ed.): *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1–94.
- Gutenberg, B. (1958). Caustics produced by waves through the Earth's core. – *The Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1, 3, 238–248. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1958.tb00057.x>
- Havíř, J. (2022). Odhad detekční schopnosti stanice VRAC s ohledem na seismické jevy registrované v letech 2011 až 2021. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 29, 1–2, 7–12. <https://doi.org/10.5817/GVMS2022-20824>
- Havíř, J., Švancara, J., Otruba, J. (2003). Úloha a využití nově certifikované seismologické stanice VRAC v rámci Mezinárodního monitorovacího systému CTBTO. – In: *Sborník 12. regionální konference „Nové výsledky seismologických, geofyzikálních a geotechnických průzkumů“*, Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava, řada stavební, 3, 2, 77–84.
- Helffrisch, G., Mainprice, D. (2019). Anisotropy at the Inner Core Boundary. – *Geophysical Research Letters*, 46, 11959–11967. <https://doi.org/10.1029/2019GL083644>
- Houard, S., Plantet J. L., Massot, J. P., Nataf, H. C. (1993). Amplitudes of core waves near the PKP caustic, from nuclear explosions in the South Pacific recorded at the „Laboratoire de Détection et Géophysique“ Network, in France. – *Bulletins of the Seismological Society of America*, 83, 6, 1835–1854.
- Isacks, B., Oliver, J., Sykes, L. R. (1968). Seismology and the new global tectonics. – *Journal of Geophysical Research*, 73, 18, 5855–5899. <https://doi.org/10.1029/JB073i018p05855>
- Kværna, T., Ringdal, F. (2013). Detection capability of the seismic network on the International Monitoring System for the Comprehensive Nuclear-Test-ban Treaty. – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 2A, 759–772. <https://doi.org/10.1785/0120120248>
- Massot, J. P., Rocard, Y. (1982). Variation of amplitude of PKP from underground explosions in the Southcentral Pacific. – *Geophysical Research Letters*, 9, 10, 1211–1214. <https://doi.org/10.1029/GL009i010p01211>
- Mizoue, M. (1977). On the magnitude calibration function for core phases with special reference to the PKP1-PKP2 caustic. – *Journal of Physics of the Earth*, 25, 143–162. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.25.143>
- Shahidi, M. (1968). Variation of amplitude of PKP across the caustic. – *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1, 97–102. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(68\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(68)90054-X)
- Storchak, D. A., Dchweitzer, J., Bormann, P. (2003). The IASPEI Standard Seismic Phase List. – *Seismological Research Letters*, 74, 6, 761–772. <https://doi.org/10.1785/gssrl.74.6.761>
- Sweetser, E. I., Blandford, R. R. (1973). Seismic distance-amplitude relations for short period P, Pdiff, PP and compressional core phases for $\Delta \geq 90^\circ$. – *MS Teledyne Geotech, Report SDAC-TR-73-9*, Virginia.
- Veith, K. F., Clawson G. E. (1972). Magnitude from short period P-wave data. – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62, 2, 435–452. <https://doi.org/10.1785/BSSA0620020435>
- Young, Ch. J., Lay, T. (1989). The core shadow zone boundary and lateral variations of the P velocity structure of the lowermost mantle. – *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 54, 64–81. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(89\)90188-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(89)90188-X)