

Pár sekund k dobru

Systemy včasného varování před zemětřeseními

**FRANTIŠEK
GALLOVIČ**

Jedním ze základních cílů seismologie je přispívat ke snižování následků velkých zemětřesení. Máme na mysli zejména ztráty na životech při zřícení staveb nebo při následně vzniklých požárech a dopravních nehodách, ale také sekundární efekty jako poškození nebezpečných průmyslových provozů nebo přehrad.

O zemětřeseních víme, že se vyskytují v tektonicky aktivních oblastech. Například v Evropě se objevují zejména v oblasti Středomoří, kde jsou důsledkem neustálých pomalých pohybů euroasijské a africké litosférické desky.¹ Na jejich kontaktech dochází k zaklesávání horninových bloků a hromadění elastické energie. Tyto kontakty jsou tvořeny takzvanými seismickými zlomy, které mohou měřit na délku stovky až tisíce kilometrů. V případě velkých zemětřesení se po stovkách až tisících let skokově uvolní nahromaděné napětí v rámci pouhých desítek sekund. To je doprovázeno vznikem seismických vln.

Vše by bylo jednodušší, kdybychom uměli předpovědět přesný čas a místo vzniku zemětřesení a jeho velikost (tzv. magnitudo²). To bohužel neumíme. Dokonce se zdá, že takové předpovědi ani nebude v principu možné nikdy udělat. I kdybychom znali perfektně všechny fyzikální zákony řídící vznik a průběh zlomového procesu, sotva kdy budeme schopni získat přesné informace o prostorovém rozložení napětí a všech potřebných reologických parametrech podél všech zlomů.

Proto směřuje zájem seismologické komunity spíše směrem ke statistickému odhadu zemětřesení (vznikají i celosvětové pravděpodobnostní mapy seismického ohrožení), mapování seismicky aktivních zlomů, zlepšování kvality staveb podle tzv. antiseismických norem a k vývoji a implementaci systémů včasného varování před zemětřeseními.

K pochopení principu systému včasného varování si nejprve musíme připomenout vlastnosti seismických vln jakožto elastických vln šířících se celým zemským tělesem a možnosti jejich registrace. Vlny vznikají vlivem třecích procesů na aktivovaných zlomech, kdy se rychle uvolňuje spojený dvou zakleslých horninových bloků ve formě šířící se trhliny. Místo vzniku vln nazýváme hypocentrum (těž ohnisko); z něj se trhlina šíří rychlostí zhruba 3 km/s a po celou do-

bu až do zastavení dává vzniknout seismickým vlnám. S rostoucí vzdáleností od zdroje obecně vlnám klesá amplituda zejména vlivem geometrického rozšiřování vlnoplochy.

Seismické vlny můžeme rozdělit do tří hlavních skupin. Nejrychlejší a zároveň nejslabší jsou vlny P (primární) šířící se rychlostí přibližně 6 km/s, při nichž částice prostředí kmitají souhlasně se směrem šíření vlny. Sekundární vlny S s příčným kmitáním jsou asi 1,7krát pomalejší, a přicházejí tedy později. Na rozhraní uvnitř Země i na jejím povrchu se vlny mnohonásobně odrážejí a lámou, přičemž se konverzí mění z P na S a naopak. Souhrnně tvoří vlny prostorové. Interferencí prostorových vln u zemského povrchu vznikají vlny vedené podél něj, které se nazývají povrchové. Šíří se ještě o něco pomaleji než vlny S.

Seismické vlny se registrují pomocí seismografů. Ty dokážou zaznamenat například silné ničivé pohyby blízko epicentra, většinou vázané na vlny S, při nichž se povrch Země vychýlí například i 1 metr a zrychlení pohybu činí třeba až 10 m/s². Seismografy však stejně dobře zaznamenají i slabé pohyby od ohniska zemětřesení vzdáleného tisíce kilometrů, nebo dokonce až na druhé straně Země (kmity povrchu o výchylce několika mikrometru).

Záznam časového průběhu kmitavého pohybu v místě seismické stanice se nazývá seismogram. Ve větších vzdálenostech jsou na seismogramu nejsilnější skupinou vlny povrchové. Povrchové vlny dominují na záznamech až ve vzdálenějších stanicích díky jejich interferenčnímu charakteru. Nicméně povrchové vlny mají typicky delší periody než vlny prostorové, a proto s nimi může být spojeno menší zrychlení než s vlnami prostorovými. To znamená, že nemusejí mít ničivé účinky na menší budovy, ale rezonančním efektem dokážou doslova rozhoupat výškové stavby nebo mosty a způsobit jejich zřícení.

Myšlenka systému včasného varování pochází z roku 1868, kdy J. D. Cooper navrhl instalovat seismické detektory do blízkosti ohnisek zemětřesení; v případě aktivace detektorů měl být telegrafem vyslán signál do radnice v San Francisku, kde by bylo varování obyvatelstvo rozeznáním zvonu. Měl se

RNDr. František Gallovič, Ph.D. (*1979) vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu UK. Jako odborný asistent na katedře geofyziky MFF UK se zabývá výzkumem ohnisek zemětřesení včetně jejich počítačového modelování.

¹ Katedra geofyziky MFF UK provozuje v Řecku již od roku 1997 několik seismických stanic ve spolupráci s Univerzitou v Patrasu. Záznamy posloužily k výzkumu významných zemětřesení z posledních let.

využít fakt, že se elektrický signál šíří mnohem rychleji než seismické vlny.

První skutečné pokusy o implementaci systému musely počkat více než sto let, když vznikaly první varovné systémy pro síť vysokorychlostních vlaků Šinkanzen v Japonsku. Vedle jednoduchých detektorů přicházejících vln šlo o první přístroje, které byly založeny na analýze přicházejících P vln v reálném čase. Jedná se o tzv. on-site přístupy, kdy se využívá faktu, že vlny P přicházejí dříve než ničivé vlny S. Konkrétně se z přicházejících P vln snažíme pomocí empirických vztahů odhadnout následné silnější pohyby vlivem vln S a vln povrchových (určuje se tzv. intenzita pohybů). Pokud by odhadnutá intenzita měla překročit definovanou mezní hodnotu, je vyhlášeno varování a blížící se nebo projíždějící vlak je zastaven. Tím se pochopitelně předejde vykojení, popřípadě se sníží jeho následky.

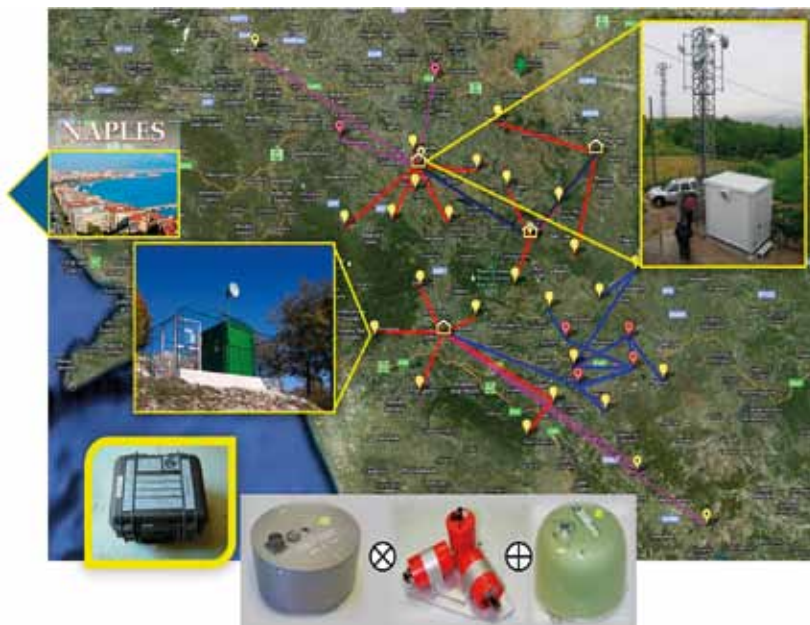
On-site režim je jednoduché řešení, ale nemožňuje rozšířit varování do větší oblasti. Navíc používané empirické vztahy umožňující odhadnout maximální intenzity z přicházejících P vln vykazují velké rozptyly, což vede ke značným chybám odhadů. To možná nemusí tolik vadit při preventivním zabrzdování vlaků, ale při zastavování jaderných elektráren již ano. Důvody existence těchto rozptylů jsou známy, což ovšem neznamená, že je lehké se s nimi vyrovnat. Vyzařování vln při zemětřesení vykazuje totiž složitosti způsobené zejména

- vyzařovací charakteristikou (tj. směrovou závislostí danou orientací zlomové plochy a směrem pohybu na ní),
- obdobou Dopplerova efektu, kdy vlny S jsou zesíleny, pokud stanice leží ve směru šíření trhliny a obráceně,
- lokálními geologickými podmínkami, které vedou k různému zesílení (i směrově závislému) vln P a ostatních.

Jeden ze způsobů, jak zpřesnit odhady ohrožení, je pokusit se najít polohu ohniska zemětřesení a jeho velikost. Odhad lze pak navíc rozšířit i na účinky ve větším regionu (tzv. regionální režim). K tomu je již nutná existence více stanic, pokud možno rozmístěných kolem ohniskové oblasti.

Na celém světě je v současné době zhruba desítky regionálních systémů včasného varování. V osmdesátých letech začal jeden z prvních vznikat na jihozápadním okraji Mexika po ničivém zemětřesení o magnitudu 8,1 v roce 1985, které mělo katastrofální účinky i ve vzdáleném Mexico City. Tamní takto velká zemětřesení (podobně jako v Japonsku) vznikají v Tichém oceánu daleko od pobřeží, v místech zanořování oceánské litosférické desky pod pevninskou. Během šíření vln tak vznikne mezi vlnami P a S časový rozdíl o délce 30 s až více než minuty. Vystavěný „narázový“ systém sestává ze sítě seismografů rozložených podél pobřeží.

V Japonsku byl po zemětřesení v Kobe v roce 1995 spuštěn projekt s cílem zahustit síť seismografů po celém souostroví. V roce



2007 pak byl odstartován ostrý provoz varovného systému založeného na celé síti více než tisícovky seismografů. Systém umožňuje provádět varování nejen před zemětřeseními přicházejícími z oceánu, ale i před těmi, které vznikají v rámci sítě na pevnině. Podobný varovný systém funguje v Kalifornii. Na Tchaj-wanu obdobná síť již několik let varuje železniční soustavu, univerzitu a nemocnici v Taipei. V Bulharsku posílá lokální síť varování výzkumnému nukleárnímu zařízení, v Istanbulu zase jaderné elektrárně a velké bankovní budově.

Relativně malý počet funkčních systémů včasného varování na světě je dán skutečností, že jeho vybudování je nákladnou technikou a administrativní záležitostí. Navíc jeho optimální funkčnost a spolehlivost ještě zdaleka nejsou z vědeckého hlediska dořešeny. To vede k výskytu neúspěšných varování, kdy systém buď nevaruje, nebo vyšle falešné varování. Oboje může být stejně nepříjemné, zejména pokud se jedná o takovou stavbu, jakou je např. jaderná elektrárna. (Zbytečné zastavení jaderné elektrárny po falešném poplachu je samozřejmě lepší varianta než neposkytnuté varování, nicméně finanční náklady a důsledky pro přenosovou soustavu mohou být značné.) Přemíra falešných poplachů ale může mít i negativní vliv na obyvatelstvo a jeho vnímání varování; lidé si mohou po nějaké době na falešné poplachy zvyknout a nezachovat se správně při opravdovém ohrožení.

Podívejme se nyní blíže na komplikace, se kterými se budování a provoz systémů včasného varování potýká, a to na příkladu seismické sítě v oblasti Irpinia v jižních Apeninách 100 km od Neapole. V současné době je tamní systém již ve zkušebním provozu (viz <http://isnet.na.infn.it/PRESToWeb/Bulletin.php>).

Síť sestává z 29 seismických stanic Irpinia Seismic Network (ISNet, viz obrázek), pokrývající oblast asi 100×70 km. Monitoruje množství aktivních zlomů v oblasti, jež byly

1. Mapa zobrazuje rozložení stanic seismické sítě ISnet u italské Neapole, vybudované pro včasné varování před zemětřesením. Přenos dat do vyhodnocovacího centra v Neapoli je zajištěn pomocí bezdrátové komunikace. Rychlé algoritmy umožňují z měřených seismických pohybů průběžně (v reálném čase) statisticky odhadovat polohu seismického zdroje a jeho velikost (magnitudo). Na základě těchto informací jsou okamžitě odhadovány předpokládané zemětřesné pohyby v regionu a rozhoduje se o případném varování ještě před příchodem ničivých vln.

2) Magnitudo je číslo, kterým se charakterizuje velikost zemětřesení. Bez dalších technických podrobností – jde o dekadický logaritmus výchylky seismografu. Zemětřesení o jeden stupeň větší znamená desetkrát větší výchylku a 32krát větší množství uvolněné energie.

odpovědné např. za zemětřesení o magnitudu 6,9 v roce 1980. Všechny stanice fungují jak v režimu on-site, tak regionálním (viz dále).

Výstavba sítě ISNet byla technicky složitá. Celý systém musí být odolný vůči zemětřesnému pohybu, aby docházelo jen k minimálnímu množství výpadků. Nezbytný je bezdrátový přenos dat, jež ale není úplně jednoduché zajistit v oblastech, jako jsou hornaté Apeniny. Jako nejvhodnější se jeví paprskovité uspořádání sítě (viz obrázek), kde data o pohybu půdy získaná na stanicích směřují do datových subcenter a z nich se dále přenášejí do hlavního vyhodnocovacího centra v Neapoli.

Již během výstavby sítě se připravovaly algoritmy určené k automatickému odhadu ohrožení v reálném čase. Byl vyvinut originální přístup (nazvaný PRESTo) pracující s teorií pravděpodobnosti. Prvním krokem je rychlé určení polohy hypocentra a magnitudo přicházejícího zemětřesení. Obě veličiny se matematicky popisují pomocí hustoty pravděpodobnosti. Sítí systému čeká, až se v oblasti aktivuje zlom a první stanice zaznamenají příchod seismických vln. Časy příchodu vln spolu s odhadem jejich chyb a se znalostí rychlosti šíření seismických vln umožňují statisticky popsat polohu hypocentra. Ke zpřesňování polohy si algoritmus vypomáhá i informací ze stanic, kam ještě vlny nedorazily – tyto stanice vlastně nesou informaci, že v jejich okolí se ohnisko nenachází. Hustota pravděpodobnosti pro odhad magnituda nejprve vychází ze známé magnitudově závislé četnosti výskytu zemětřesení (tzv. Gutenbergův-Richterův vztah říkájící, že zemětřesení o magnitudu o jednotku větším se vyskytuje zhruba desetkrát méně často). Tento odhad je postupně modifikován podle aktuálně zaznamenávaných maximálních posunutí povrchu Země ve stanicích. Postupem času se s využitím dalších přicházejících dat odhady lokace a magnituda „zaostřují“ (tzv. evoluční přístup). Pomocí empirických vztahů se pak opět v pravděpodobnostním smyslu určují očekávané intenzity pohybů v regionu na základě vzdálenosti od ohniska zemětřesení. Evoluční přístup tak v konečném důsledku vede k postupnému zpřesňování odhadů ohrožení.

Funkčnost systému je samozřejmě třeba testovat. A to nejen z hlediska technického, ale i algoritmického, tj. z hlediska spolehlivosti určování parametrů vzniklého zemětřesení a odhadů intenzity pohybů půdy. Zájmová oblast Irpinia je sice seismicky aktivní, ale velká ničivá zemětřesení nejsou častá. Místo čekání na odpovídající jev se nabízejí dvě možnosti. První je síť virtuálně přenést do jiné oblasti, kde k velkému zemětřesení již došlo, a na existujících datech výkonosti systému varování otestovat. Druhá možnost je využití existujících matematicko-fyzikálních modelů zemětřesení, které umožňují simulovat záznamy dané parametry zemětřesení tak, jak by je síť stanic zaznamenala. Posledně zmíněného testu se zúčastnil autor článku; výsledek numerického experimentu pak byl publikován v prestižním časopise *Geophysical Research Letters*.

Za účelem testování systému varování se předpokládalo zemětřesení s geometrií blízkou jevu z roku 1980 o magnitudu 6,9. Jelikož účelem bylo statisticky ocenit možnosti systému, byly generovány syntetické seismogramy pro 300 různých scénářů průběhu šíření trhliny na zlomu. K tomu byl využit originální počítačový program, který takové simulace umožňuje včetně zahrnutí efektů spojených s šířením trhliny po zlomové ploše (tj. zahrnující výše zmiňované složitosti vyzařovaných seis-

mických vln). Databáze seismogramů pak sloužila jako vstup do algoritmu PRESTo. Ten v rámci svého evolučního statistického přístupu postupně zpřesňoval odhad polohy hypocentra a magnituda. Následně odhadoval i intenzitu pohybu půdy vně sítě, což bylo porovnáváno se syntetickými daty a byla ohodnocována shoda. To umožnilo stanovit pravděpodobnou chybu odhadu, která pak může sloužit při rozhodování o vydání výstrahy. Podobně experiment umožnil vytvořit regionální mapu s rozložením efektivního časového rozdílu mezi příchodem potenciálně ničivých vln a stabilizací odhadu intenzity (a případného následného vydání varování). Například do Neapole vlny S a povrchové vlny dorazí z epicentrální oblasti za zhruba 25 s, což představuje nejranější možnost vydání varování, a tedy i maximální možný čas na reakci. Experiment ale ukázal, že ke spolehlivému určení ohrožení (jemuž předchází určení polohy a velikosti zdroje zemětřesení) je potřeba přibližně 5 s, což zkracuje čas na reakci na 20 s. To je ovšem stále dost času, jenž může výrazně posloužit k ochraně obyvatelstva.

Algoritmy a technická řešení systému včasného varování jsou stále v bouřlivém vývoji (viz celá sekce věnovaná těmto systémům na výročním zasedání Americké geofyzikální unie v prosinci loňského roku). Uvedme zde dva příklady problémů, které se musí v blízké době vyřešit. Za prvé je nutné do odhadů ohrožení integrovat skutečnost, že zemětřesné zdroje nejsou bodové. To nemusí být kritické v oblasti Irpinie, kde aktivovaný zlom je 50 km dlouhý. Ovšem při loňském zemětřesení Tohoku v Japonsku, které se odehrálo na 500 km dlouhém zlomu, zjednodušení na bodový zdroj způsobilo, že varovný systém velmi podcenil ohrožení v regionu Kantó. Ten sice leží relativně daleko od hypocentra zemětřesení, ale je stále relativně blízko aktivované části zlomu. Dalším nevyřešeným problémem zejména u sítí o rozsahu Japonska je rozlišování simultánního příchodu více zemětřesení (jako např. při následných otřesech po velkém zemětřesení). To může v důsledku vést k nadhodnocení magnituda třeba i o dva stupně. Problémů k vyřešení šeká ale na seismology ještě mnohem více.

Na závěr uvedme, jak má vlastně takové varování obyvatelstva vypadat v praxi. V Japonsku více než rok před spuštěním veřejného systému včasného varování probíhalo školení obyvatelstva, jak na varovný signál reagovat. K tomu slouží i názorné příručky, které lze nalézt na internetu (např. na <http://isnet.na.infn.it/images/EW.jpg>).

Informace o vydání varování se šíří zejména televizí a rádiem (i přerušením vysílaného programu) a textovými zprávami na mobilních telefonech. Ukazuje se, že když se veřejnost seznámí s tím, co je třeba při zaznamenání varovného signálu dělat, nevzniká panika a většina lidí zareaguje racionálně. V méně informovaných oblastech, jakou bylo ještě nedávno Turecko, jsou známy případy, kdy při příchodu seismických vln lidé vyskakovali z oken. Osvěta je tedy nejdůležitější.

A co tedy při varování, popřípadě pocítění pohybů dělat? Pokud je možné opustit budovu během pár sekund, je správné tak učinit. Pokud to možné není (např. z důvodu pobytu ve vyšším patře v budově s velkým množstvím lidí), je lepší se schovat pod stůl nebo do rámu dveří. Rozhodně se nesmí použít výtah. Při pobytu venku je nutné se dostat na otevřené prostranství, stranou nejen od padajících budov, ale i padajících komínů, balkonů, střešních tašek a podobně. Všem ale raději přejme, aby se při pobytu v seismicky aktivních oblastech takové zkušenosti vyhnuli. ☺