

Zemětřesení ve službách energetiky

Seismika pomáhá těžit ropu a zemní plyn i čerpat geotermální energii

**JAN ŠÍLENÝ
TOMÁŠ FISCHER**

Jezdíte rádi autem? Nebo ho prostě jen potřebujete? Ať tak či onak, musíte tankovat. Fandíte alternativním zdrojům energie – co takhle zemské teplo? Ve fosilní klasice i v zelené alternativě je v pozadí vždy seismika – geofyzikální disciplína zabývající se procesy vzniku a šíření elastických vln v materiálu zemského tělesa. Tento obor se široce rozkročil mezi vědou a průmyslem. Patří do něj na jedné straně rozrušování horninového prostředí v pekelných podmínkách zemětřesného ohniska a teorie šíření vln prostředím hromadícím všechny myslitelné komplikace, jako jsou viskozita, anizotropie či nehomogenita (to vše spojitě i nespojitě), a na straně druhé rutina seismického průzkumu při hledání ložisek nerostných surovin.

Průmyslová rutina

Seismologie pomáhá sledovat vysokotlaké injektáže v ropných, plynových a některých geotermálních vrtech. Naměřená data interpretuje způsobem běžným v zemětřesné seismologii a zpracovává je metodami, jež v průmyslu zatím nejsou běžné, avšak nabízejí nadstandardní informace.

Zásadní fyzikální parametr ovlivňující výtěžnost ložiska je propustnost sedimentární horniny, která nese ropu a zemní plyn. U ropy se navíc přírodní kanály, tvořené propojenými přirozenými trhlinami, po čase zanášejí a musí obnovovat. V ropném průmyslu se to provádí standardní procedurou – tlakovou injektáží. Speciálními „zátkami“ se uzavře vybraná část vrtu v hloubce těženého horizontu. Ta se natlakuje vodou, popřípadě vhodnější kapalinou, až dojde k rozrušení okolní horniny (k hydraulickému štěpení). Do injektážní kapaliny se často přidává i jemná granulární příměs (*proppant* – drobné keramické kuličky nebo jen obyčejný písek), která po odčerpání injektovací kapaliny zabrání uzavření trhlín. Takto nově vytvořené přírodní kanály obnovují žádoucí výtěžnost ropného nebo plynového ložiska.

Podobná metoda se používá při exploataci geotermální energie. Moderní systémy (Enhanced Geothermal Systems, EGS) pracují se soustavou dvou nebo více blízkých vrtů. Do jednoho se vtlakuje voda, která prochází puklinami horké horniny podzemního geotermálního výměníku. Zahřátá je posléze ze sousedních vrtů čerpána na povrch, kde se v důsledku snížení tlaku přemění na páru a pohání turbínu. Zásadním parametrem pro účinnost celého systému je opět propustnost

horniny podzemního výměníku. Nástrojem jsou zase vysokotlaké injektáže.

Při rozrušování horniny injektáží vznikají slabá „zemětřesení“, jež jsou energeticky o mnoho řádů menší než zemětřesení přirozená. Ta jsou v naprosté většině střížná (jejich ohniskovým procesem je tečný skluz podél existujícího tektonického zlomu), zatímco u mikrootřesů vyvolaných vysokotlakými injektážemi může být ohniskový proces obecnější. Skluz po zlomové ploše má navíc i normálovou složku (odpovídající jeho otevření), popřípadě vzniknou nové – tahové – trhliny. Čím víc je normálového pohybu v ohniskovém procesu, tím lépe plní vzniklá trhlinka účel celé injektážní procedury – zvýšit propustnost prostředí.

Texaská ropa

Při rutinním zpracování měřená seismicity, kterou vyvolávají vysokotlaké injektáže, se běžně určuje jen poloha ohnisek mikrootřesů. Pro praxi to je nesmírně cenná informace o tom, do jakých vzdáleností od vrtu byla okolní hornina rozrušena a jak rychle. Při obnově výtěžnosti ropných vrtů tlakovou injektáží však není tuto „seismologicky standardní“ proceduru snadné aplikovat. Důvodem je řídké rozložení snímačů, které bývají zpravidla umístěny v řadě nad sebou v blízkém monitorovacím vrtu. Pak musíme pro lokalizaci znát nejen časy příchodu seismických vln, ale i směry, odkud přicházejí – azimuty. Azimut je běžně stanovován z podélných (P) vln, jejichž polarizační vektor je orientován ve směru paprsku (v anizotropním prostředí to platí pouze přibližně, avšak s vyhovující přesností); ukazuje tedy přímo do ohniska otřesu. Podélné vlny však bývají slabé, často ztracené v soustavném seismickém neklidu, proto je výhodnější zpracovávat silnější střížné (S) vlny, polarizované v rovině kolmé na paprsek. Stanovení azimutu je pak složitější, novou metodu vyvinul T. Fischer s kolegy. Dokázali tak lokalizovat mnohem více indukovaných otřesů generovaných injektáží do ložiska zemního plynu v Texasu, a to navíc přesněji než s použitím podélných vln (viz obr.). Polohy hypocenter několika tisíc jevů zmapovaly vertikální trhlinku s přednostnějším zhorováním rozšiřováním. Srovnání rychlosti jejího rozšiřování s rychlostí injektáže vedlo k odhadu šířky trhliny asi 7–10 mm. Dále se ukázalo, že větší injektované kapaliny posloužila k žádou-

RNDr. Jan Šílený, CSc., (*1952) vystudoval geofyziku na Matematicko-fyzikální fakultě UK, vědeckou aspiranturu absolvoval v Geofyzikálním ústavu ČSAV. Po krátkém zaměstnání v Ústavu geologie a geotechniky ČSAV (nyní Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i.) pracoval v GFÚ ČSAV a po vzniku Akademie věd ČR v GFÚ AV ČR, v. v. i., kde se zabývá modelováním seismického zdroje.

RNDr. Tomáš Fischer, PhD., (*1961) vystudoval geofyziku na Přírodovědecké fakultě UK. Pracoval v Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR, později jako programátor, akademickou kariéru zahájil v GFÚ AV ČR, v. v. i., který byl též školícím pracovištěm jeho doktorského studia na MFF UK. V současné době pracuje na PŘF UK i v GFÚ AV ČR, v. v. i. Věnuje se analýze slabé seismicity.

cí tvorbě trhliny, zatímco ztráta průsakem do horninové formace byla malá.¹

Nejen kdy a kde, ale i jak

Seismické metody aplikované v zemětřesné seismologii nedávají odpověď jen na otázky „kdy“ a „kde“ – to je ona zmíněná lokalizace, ale také objasňují, jaký byl mechanismus zemětřesení – říkají, co se v jeho ohnisku událo. Tato hladina zpracování „zemětřesných“ dat ještě není v průmyslové „mikroseismice“ běžná, ač právě tady nabízí možnost získání zajímavé a specifické informace. Zatímco v zemětřesné seismologii odpovídá mechanismus v převážné většině střížnému skluzu po zlomu a zjišťujeme jím orientaci zlomu a směr skluzu (parametry veledůležité pro tektonické interpretace), v mikroseismice může mechanismus naplno zhodnotit svůj potenciál: detekovat typ rozrušení, jinými slovy rozhodnout mezi střížným skluzem a tahovou trhlinou. Informace o takovém rozrušení horninového prostředí jsou mimořádně zajímavé při průmyslových injektážích.

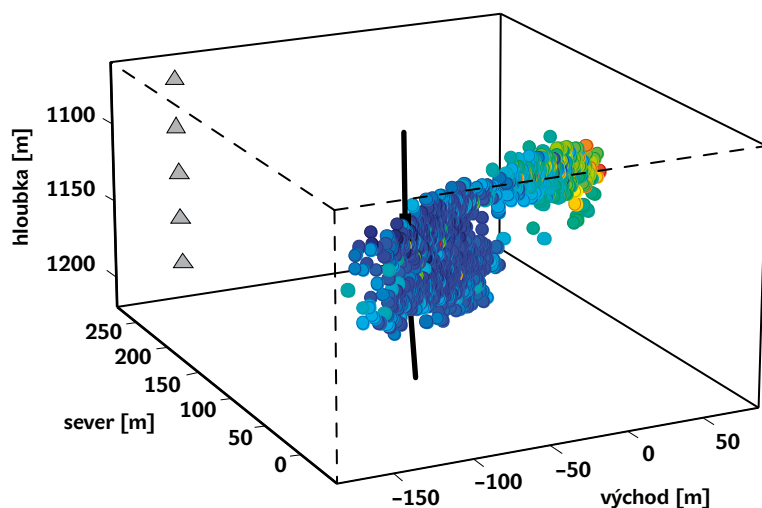
Určení ohniskového mechanismu je ovšem náročnější na data než pouhá lokalizace hypocentra. Když ohnisko a seismické stanice leží v jedné rovině – což je mimo jiné i případ standardní průmyslové konfigurace monitorování injektáže z jednoho vrtu – nejdříve zjistit kompletní mechanismus zdroje.²

Stanovit celý mechanismus, který by popisoval typ rozrušení i jeho orientaci, vyžaduje monitorování alespoň ze dvou vrtů. I potom je tato úloha obtížná a je třeba pečlivě vyhodnotit všechny vlivy, které snižují rozlišovací schopnost (seismický neklid na záznamech, nepřesná lokalizace hypocentra, nedostatečná znalost parametrů prostředí při konstrukci jeho odezvy – Greenovy funkce). Šílený s kolegy ukázali, že mechanismy silných otřesů doprovázejících vtlačování kapaliny do vrtu, dříve považované za čistě střížné skluzy, mají výrazně nestřížné složky a odpovídají tahovému rozrušování horniny plynového ložiska. Tento poznatek významně modifikuje dosavadní představy o mechanice pohybu injektážních roztoků při těchto častých technologických operacích v ropném průmyslu a může ovlivnit způsob jejich navrhování a provádění.³

Ropný průmysl používá vrtu, které dosahují hloubek 2–3 km a vedou do málo zpevněných sedimentárních vrstev. Naproti tomu injektáže při formování geotermálních výměníků se odbývají v krystalické hornině v hloubkách až 5 km. Vznikající seismicity je zpravidla silnější a bývá monitorována z povrchu, plošně rozloženou sítí stanic. Situace pro určování mechanismu ohniska je tedy příznivější než při monitorování z vrtů, kvalita signálu ovšem bývá následkem neklidu výrazně nižší a samotné signály jsou vinou komplikované přípovrchové stavby kůry složitější.⁴

Alsaský geotermální výměník

Jeden z nejznámějších geotermálních výměníků EGS je v rýnském prolomu v alsaském



Hypocentra mikrozemětřesení, která provázejí růst trhliny po tlakové injektáži. Barvy od modré k červené – čas vzniku otřesu, plná čára – injektážní vrt, trojúhelníčky – seismometry v monitorovacím vrtu.

Soultz-sous-Forets (viz též Vesmír 87, 790, 2008/11). Zemský tepelný tok zde dosahuje vysokých hodnot a teplota v hloubce 5 km je zhruba 200 °C. Soustava tří vrtů zasahujících do této hloubky realizuje tepelný výměník, který sytí parní turbínu o výkonu 1,5 MW. Pro žádoucí zvýšení propustnosti mezi zmíněnými vrtu bylo provedeno několik tlakových injektáží, které vyvolaly rozsáhlou seismicitu. Pomocí záznamů několika desítek mikrozemětřesení z injektáže v roce 2003 byl překvapivě nalezen dominantní střížný mechanismus bez významnějších objemových změn v ohniscích otřesů,⁵ přičemž směry střížných trhlin a posunů souhlasily s místní tektonikou. Při této injektáži zřejmě nevzniklo mnoho tahových trhlin, ale kapalina vtlačovaná do horniny pomohla aktivovat existující tektonické zlomy. Snižila koeficient tření („namazala“ zlomové plochy kapalinou) či snížila normálové napětí a tak iniciovala skluz. Pro praxi to znamená, že se injektáž víceméně minula účinkem, protože vytvořila málo tahových trhlin a příliš nepřispěla ke zvýšení propustnosti geotermálního výměníku.

Pomáhá seismika v praktickém životě?

Bez ní bychom sotva věděli, kde těžít ropu a jiné nerostné suroviny. Cílevědomým využitím metodik vyvinutých při sledování přirozených zemětřesení – tedy v základním výzkumu – však může sloužit ještě víc. V průmyslové praxi tlakových injektáží do ropných a geotermálních vrtů – velmi nákladných technologických operací – pomáhají metody zemětřesné seismologie zjišťovat mechanismy ohniska a ověřovat tím její úspěšnost – zvýšení propustnosti horniny. Zde však pomoc seismologů končí a je na specialistech průmyslového výzkumu navrhnout řešení, jak postupovat co nejlépe. ☞

1) L. Eisner, T. Fischer, J. Rutledge: Determination of S-wave slowness from a linear array of borehole receivers, *Geophys. J. Int.* 2008, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03939.x.

T. Fischer, S. Hainzl, L. Eisner, S. Shapiro, J. Le Calvez: Microseismic signatures of hydraulic fracture growth in sediment formations: Observations and modeling, *J. Geophys. Res.* 113, 2008, B02307, doi:10.1029/2007JB005070.

2) V. Vavryčuk: On the retrieval of moment tensors from borehole data, *Geophysical Prospecting* 55 (3), 381–391, 2007.

Byl však navržen postup, jak v takových případech získat alespoň indikaci nestřížného posunutí v ohnisku, a ověřen na jevech zaznamenaných při injektáži v Texasu (Z. Jechumtálová, L. Eisner: Seismic source mechanism inversion from a linear array of receivers reveals non-double-couple seismic events induced by hydraulic fracturing in sedimentary formation, *Tectonophysics* 460, 124–133, 2008, doi:10.1016/j.tecto.2008.07.011).

3) J. Šílený, L. Eisner, D. Hill, F. Cornet: Non-double-couple mechanisms of microearthquakes induced by hydraulic fracturing, *J. Geophys. Res.* 114, 2009, doi:10.1029/2008JB005987.

4) J. Šílený: Resolution of non-double-couple-mechanisms: simulation of hypocenter mislocation and velocity structure mismodeling, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 99, 2009, doi: 10.1785/0120080335.

5) J. Horálek, Z. Jechumtálová, L. Dorbath, J. Šílený: Source mechanisms of micro-earthquakes induced in a fluid injection experiment at the HDR site Soultz-sous-Forets (Alsace) in 2003 and their temporal and spatial variations, *Geophys. J. Int.*, submitted.