

# ŠÍŘENÍ STŘIŽNÝCH VLN V NEHOMOGENNÍM SLABĚ ANIZOTROPNÍM ZEMSKÉM NITRU

*Vlastislav Červený, Luděk Klimeš, Katedra geofyziky, MFF UK,  
Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2*

*Ivan Pšenčík, Geofyzikální ústav AV ČR, Boční II/1401, 141 31 Praha 4*

*Téměř celé jedno století vystačila seismologie s modely zemského nitra, které byly izotropní, tj. vlastnosti prostředí v každém jeho bodě záležely jen na poloze tohoto bodu, nikoliv na směru. Zemské nitro však v mnohých částech vykazuje seismickou anizotropii, to znamená, že vlastnosti seismických vln šířících se v těchto částech jsou závislé nejen na poloze daného bodu, ale i na směru, ve kterém do tohoto bodu vlna přichází. V posledních přibližně dvaceti letech se seismická pozorování natolik zahustila a zkvalitnila, že je možné projevy seismické anizotropie pozorovat. Aby mohly být tyto projevy vysvětleny a využity při studiu zemského nitra, je třeba poznat zákonitosti šíření seismických vln v anizotropních prostředích. I když je v zemském nitru anizotropie většinou slabá, tj. blízká k izotropii, ovlivňuje výrazně vlastnosti střížných vln.*

## SEISMICKÉ VLNY V ANIZOTROPNÍCH PROSTŘEDÍCH

Šíření vln v anizotropních prostředích má celou řadu odlišností od prostředí izotropních, která ve skutečnosti představují speciální, nejsymetričtější případ anizotropního prostředí. Místo 2 parametrů, rychlostí podélných a střížných vln, a hustoty, které specifikují izotropní model prostředí, anizotropní model je obecně specifikován 21 parametry a hustotou. Místo dvou výše uvedených vln se v anizotropních prostředích šíří tři vlny: jedna podélná a dvě střížné. Existují i další odlišnosti, které jsou podrobně popsány v literatuře o šíření seismických vln v anizotropních prostředích.

Existuje celá řada metod jak počítat vlny v anizotropních prostředích. Jsou to např. metody konečných diferencí či prvků nebo tzv. reflektivní metoda. V tomto příspěvku se soustředíme na přibližnou, ale velmi efektivní a široce užívanou metodu, metodu paprskovou [1]. Paprsková metoda existuje ve dvou základních verzích, jedna pro studium šíření seismických vln v izotropních (izotropní paprsková teorie), druhá v anizotropních prostředích (anizotropní paprsková teorie). Pro podélné vlny je možné použít druhou verzi jak v anizotropních tak v izotropních prostředích. V případě střížných vln je situace složitější. Pro střížné vlny představuje izotropní prostředí degenerovaný případ anizotropního prostředí, ve kterém se dvě střížné vlny šíří stejnou rychlostí, a pro který bez úprav nelze použít paprskovou metodu pro anizotropní prostředí. Poznamenejme, že šíření střížných vln stejnou rychlostí existuje i v anizotropních prostředích. Tam je však omezeno jen na určité, tzv. singulární směry,

zatímco v izotropních prostředích degenerace existuje ve všech směrech. Bez problémů však není paprsková metoda pro anizotropní prostředí ani při šíření střížných vln v nehomogenních, slabě anizotropních prostředích. V tomto případě metoda sice dává výsledky, tyto výsledky jsou však nepřesné. Důvodem je vzájemná blízkost rychlostí střížných vln, která vede k párování obou vln, jemuž se v angličtině říká coupling. Toto párování střížných vln není anizotropní paprsková metoda schopna popsat. Lze konstatovat, že uvedené dvě verze paprskové metody fungují jen v jistých hraničních případech. Potřebujeme tedy metodu, kterou by bylo možno použít univerzálně, nejen v nehomogenních izotropních či anizotropních prostředích, ale i v přechodné oblasti mezi nimi, tj. v nehomogenních slabě anizotropních prostředích.

## PÁROVÁNÍ STŘIŽNÝCH VLN A KVAZIIZOTROPNÍ APROXIMACE

Zmíněného problému si povšiml Kravcov, viz [2] a též [3], a navrhl modifikaci paprskové metody, kterou nazval kvaziizotropní přiblížení. Místo jedné nezávislé vlny navrhl hledat paprskové řešení v slabě anizotropním prostředí jako sumu obou střížných vln. Ukázal, že takový postup vede k určování amplitud řešením systému frekvenčně závislých lineárních rovnic podél společného paprsku, který je počítán v referenčním izotropním prostředí. Anizotropní prostředí tak může být chápáno jako odchylka od referenčního izotropního prostředí. Odtud plyne název kvaziizotropní přiblížení. Kravcov ukázal, že intenzita párovacího efektu závisí na třech veličinách: na frekvenci,

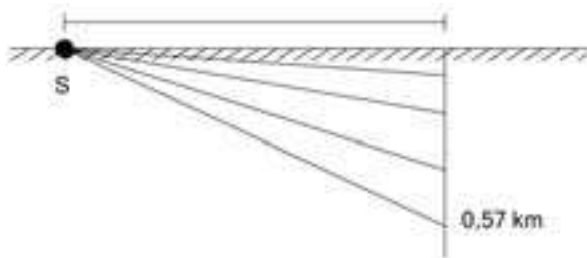
velikosti gradientu nehomogenity prostředí a blízkosti rychlostí interferujících příčných vln. Efekt je větší pro nižší frekvence, vyšší rychlostní gradienty a vzájemně blízké hodnoty rychlostí příčných vln.

Párování střížných vln studovali též Coates a Chapman [4], kteří navrhli metodu, kterou nazvali *Coupling Ray Theory* (CRT). V [5] bylo ukázáno, že kvaziizotropní přiblížení je speciální případ CRT, ke kterému je možno dojít řadou aproximací CRT. To vede ke snížené přesnosti kvaziizotropního přiblížení. Přesnost snižuje kromě řady jiných faktorů aproximace přesného času šíření (což vede k chybným časovým posuvům), nebo též volba společného paprsku jako paprsku v referenčním izotropním prostředí. Podrobný rozbor problému s oceněním chyb způsobených různými aproximacemi je možné nalézt v [6] a dalších článcích uvedených autorů v čísle 1/2004 časopisu *Studia geophysica et geodaetica*. Autoři testují CRT a její různé aproximace na modelu, pro který existuje přesné řešení a poskytují tak přesné odhady chyb různých aproximací CRT.

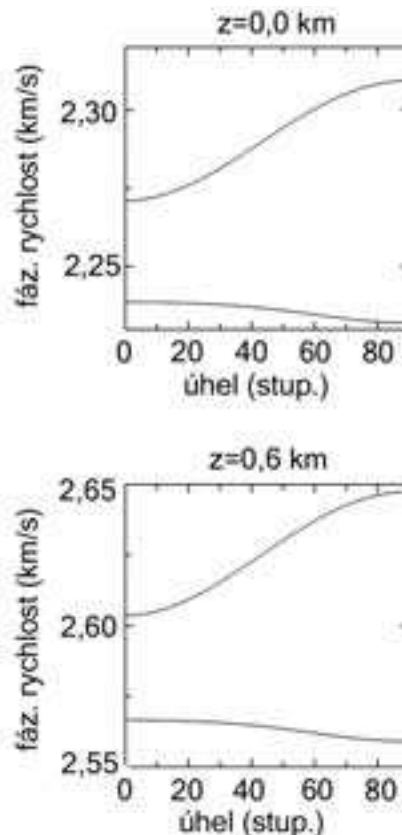
## SYNTETICKÝ EXPERIMENT

Jako ilustraci potenciálu kvaziizotropního přiblížení odstranit selhání obou verzí paprskových metod v slabě anizotropních prostředích uvádíme výsledky z článku [7]. Autoři užili realistický model z vertikálního seismického profilování (VSP) seismické prospekce nafty a plynu. Srovnáním výsledků kvaziizotropního přiblížení s výsledky reflektivní metody ukázali autoři na z praktického hlediska zanedbatelné odchylky. Za zmínku stojí fakt, že podstatné dva rozdíly mezi použitými metodami jsou výpočetní nároky, které byly u reflektivity tisícínásobně větší než u kvaziizotropního přístupu, a možnost použití kvaziizotropního přístupu pro prakticky libovolná třírozměrná nehomogenní prostředí, zatímco reflektivní metoda funguje jen pro jednorozměrná prostředí.

Uvažujeme konfiguraci běžnou při VSP měřeních, viz obr. 1. Ve třech přijímačích umístěných ve vrtu na pravé straně obrázku v hloubkách 0,01, 0,29 a 0,57 km registrujeme střížné vlny buzené zdrojem typu vertikální síla umístěným v bodě S, vzdáleném



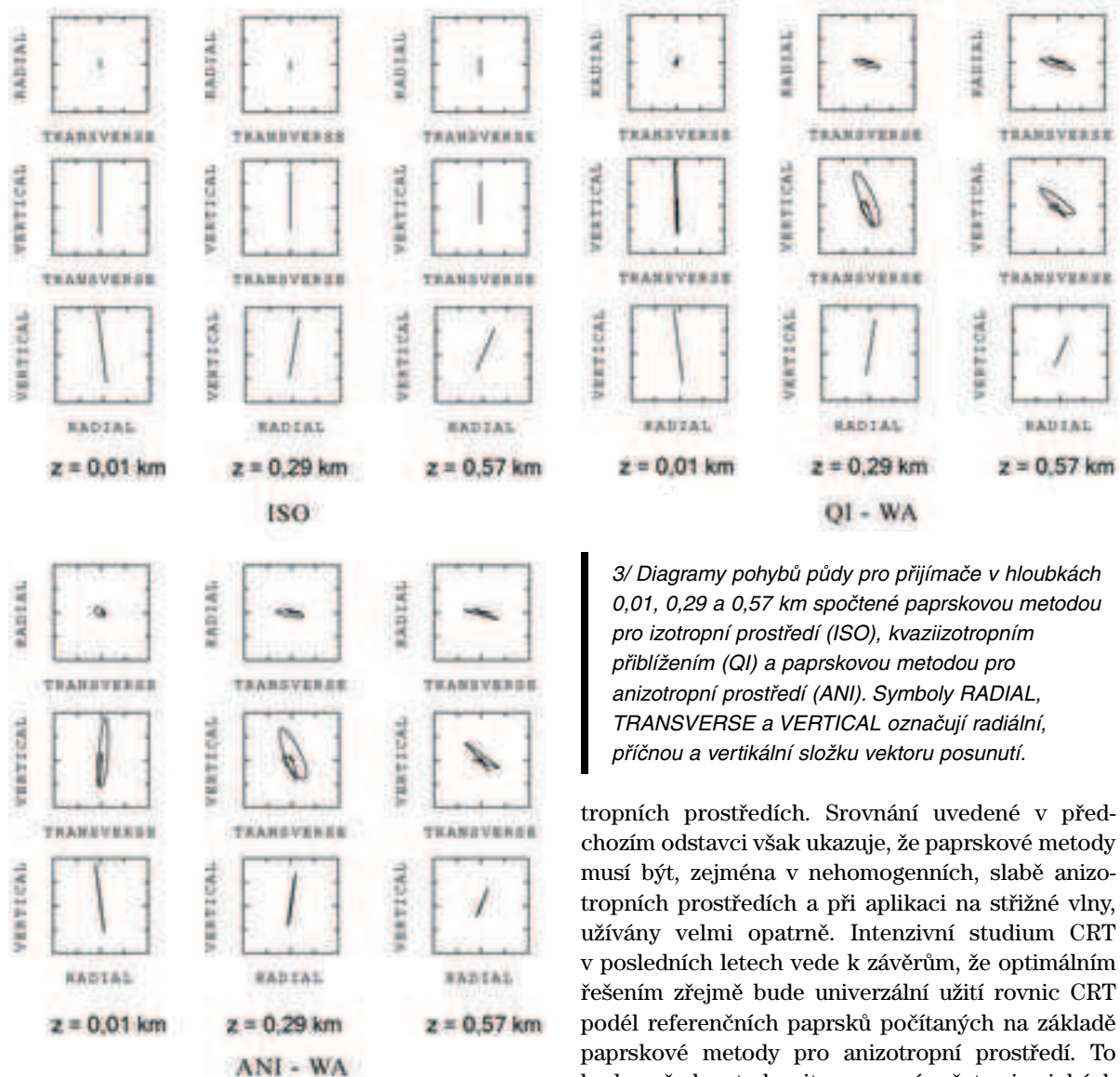
1/ Schematický obrázek konfigurace syntetického experimentu



2/ Vertikální řezy plochami fázových rychlostí v hloubkách 0 a 0,6 km. Fázové rychlosti jsou znázorněny jako funkce úhlu dopadu, 0 stupňů pro horizontální šíření, 90 stupňů pro vertikální šíření.

1 km od ústí vrtu. Prostředí je vertikálně nehomogenní, transversálně izotropní s horizontální osou symetrie. Osa symetrie je pootočena o 45 stupňů od roviny experimentu, tj. vertikální roviny zahrnující zdroj a vrt. Kdyby nebyla, obě střížné vlny by se šířily nezávisle, jedna s polarizací ve vertikální rovině, druhá s polarizací v horizontální rovině. V důsledku pootočení osy symetrie dochází k párování střížných vln. Průběh fázových rychlostí obou příčných vln v rovině experimentu na povrchu (0 km) a v hloubce (0,6 km) je ukázán na obr. 2. Úhel 0 stupňů odpovídá horizontálnímu šíření, úhel 90 stupňů vertikálnímu šíření. Pro mělké přijímače je tedy rozdíl v rychlostech malý a prostředí je bližší izotropnímu. Naopak pro hlubší přijímače je rozdíl v rychlostech větší a prostředí je bližší anizotropnímu.

Pro zadanou konfiguraci byly prováděny tři výpočty: první na základě paprskové metody pro izotropní prostředí (ISO), druhý na základě kvaziizotropního přiblížení (QI) a třetí na základě paprskové metody pro anizotropní prostředí (ANI). Na obr. 3 jsou uvedeny diagramy pohybu půdy (particle motion diagrams) vypočtené uvedenými třemi způsoby, ve třech přijímačích. Můžeme vidět, že pohyby jsou v případě ISO čistě lineární, což odpovídá existenci jediné střížné vlny v izotropním



3/ Diagramy pohybů půdy pro přijímače v hloubkách 0,01, 0,29 a 0,57 km spočtené paprskovou metodou pro izotropní prostředí (ISO), kvaziizotropním přiblížením (QI) a paprskovou metodou pro anizotropní prostředí (ANI). Symboly RADIAL, TRANSVERSE a VERTICAL označují radiální, příčnou a vertikální složku vektoru posunutí.

prostředí. V případech QI a ANI se objevují nelineární pohyby indikující existenci dvou vln. V případě ANI to není překvapení, protože pohyby byly počítány pro dvě nezávislé vlny. Překvapivější je to v případě QI, ve kterém byly výsledky získány podél jediného společného paprsku v referenčním izotropním prostředí. Ze srovnání je jasně vidět, že přístupy ISO a ANI dávají zcela rozdílné výsledky. Přístup QI představuje hledaný, i když pouze přibližný, přechod mezi oběma přístupy. Pro mělký přijímač, pro který jsou rychlosti obou příčných vln velmi blízké, QI dává téměř lineární pohyby jako v případě ISO. Pro hlubší přijímače dává QI výsledky, které jsou podobnější výsledkům ANI.

## ZÁVĚR

Je zřejmé, že z hlediska efektivity paprskové metody patří a budou patřit mezi nejdůležitější nástroje studia šíření seismických vln v nehomogenních anizo-

tropních prostředích. Srovnání uvedené v předchozím odstavci však ukazuje, že paprskové metody musí být, zejména v nehomogenních, slabě anizotropních prostředích a při aplikaci na střížné vlny, užívány velmi opatrně. Intenzivní studium CRT v posledních letech vede k závěrům, že optimálním řešením zřejmě bude univerzální užití rovnic CRT podél referenčních paprsků počítaných na základě paprskové metody pro anizotropní prostředí. To bude vyžadovat algoritmy pro výpočet seismických paprsků, které budou spolehlivé a univerzálně pracovat jak v izotropních, tak i v slabě a silně anizotropních prostředích. Na odpovídajících univerzálních algoritmech se nyní pracuje v rámci konsorcia *Seismické vlny v 3-D komplikovaných strukturách (SW3D)*, <http://sw3d.mff.cuni.cz/>, na MFF UK a v GFÚ AV ČR.

## Literatura

- [1] V. Červený: *Seismic ray theory*. Cambridge University Press, Cambridge 2001.
- [2] J. A. Kravcov, Dokl. AN SSSR **183**, 74 (1968), rusky.
- [3] J. A. Kravcov, Ju. I. Orlov: *Geometrická optika nehomogenních prostředí*. Nauka, Moskva 1980, rusky.
- [4] R. T. Coates, C. H. Chapman, Geophys. J. Int. **103**, 301 (1990).
- [5] P. Bulant, L. Klimeš, Pure and Appl. Geophys. **159**, 1419 (2002).
- [6] L. Klimeš, P. Bulant, Stud. Geophys. Geod. **48**, 117 (2004).
- [7] I. Pšenčík, J. Dellinger, Geophysics **66**, 308 (2001).