

УДК 550.347

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СКОРОСТНОГО РАЗРЕЗА МЕТОДОМ ФУНКЦИИ ПРИЕМНИКА

Гоев А.Г.¹, Косарев Г.Л.², Санина И.А.¹, Ризниченко О.Ю.¹

¹Институт Динамики Геосфер им. М.А. Садовского РАН, г.Москва, andr.goev@gmail.com

²Институт Физики Земли им. О.Ю.Шмидта, г.Москва

Введение.

Метод функций приемника, впервые предложенный более 40 лет назад [1, 9] получил широкое распространение в сейсмологии при решении задач восстановления глубинного скоростного строения. Он применим как для создания 3D моделей на основе интерполяции результатов реконструкции скоростных разрезов [10], полученных по одиночным станциям, так и для получения скоростных разрезов локальных структур по данным только одиночных широкополосных сейсмических станций (например [8]). Последнее обстоятельство особенно важно с учетом отсутствия разветвленных сетей на некоторых территориях (например в центральной части Восточно-Европейской платформы или на крайнем севере). Его суть состоит в использовании кратных и обменных волн, генерируемых на контрастных сейсмических границах. В качестве источника возбуждения используются телесеизмические события.

Разделяют два типа функций приемника - Р функцию приемника (PRF) и S функцию приемника (SRF). Они отличаются по типу первой проходящей волны и, соответственно, по пути луча. Метод PRF построен на использовании обменной волны Р-в-S. Он с успехом применяется, в основном, для восстановления структуры коры и оценки параметров зоны Мохо [7], однако может также дать достаточно достоверные представления о структуре верхней мантии и наличия контрастных сейсмических границ в ней. Метод SRF построен на использовании обменной волны S-в-Р. Впервые предложенный в 2000 году [5], метод позволяет в значительной степени повысить точность обнаружения мантийных границ. Возможность рассчитать функции приемника различных типов для каждой отдельно взятой станции зависит от времени наблюдений (около 1 года для получения PRF и не менее 2-3 лет для SRF).

При решении обратной задачи используется совместное обращение как PRF, так и SRF для улучшения устойчивости и точности получаемой модели [10]. Однако, из-за разных путей волн, корректность такого подхода может вызывать сомнения. Отдельным фактором, влияющим на устойчивость получаемой модели, является наличие детальных знаний о структуре приповерхностного низкоскоростного слоя. Он, несмотря на малую, в сравнении с целевой моделью, мощность, ввиду наличия резко контрастных границ генерирует обменные волн больших амплитуд. Тем самым, наблюденная трасса зашумляется, что ведет к риску ее неверной интерпретации.

Кроме задач восстановления глубинного строения функции приемника позволяют оценить границы зоны фазовых переходов 410-660 км. Эти границы являются резко контрастными по скоростям сейсмических волн и обменные фазы от них должны выявляться на суммированных функциях приемника [9]. Однако, в ряде случаев (например в [2]) на суммарных трассах уверенно определяется только одна 660 километровая граница. Мы видим причину этого явления также во влиянии осадочного слоя, реверберации от которого достигают времени 40-45 секунд с момента прихода первой продольной волны.

В работе мы будем рассматривать только PRF т.к. при проведении экспериментальных работ часто не удается накопить достаточное количество событий для получения надежной SRF и возникает необходимость проанализировать PRF как можно более детально.

Влияние осадочного слоя на PRF

Осадочный слой различной мощности присутствует на большей части территории земли. Его негативное влияние на точность получения оценок глубинного строения различными сейсмологическими методами хорошо известно [3]. Экспериментально установлено его влияние и на функции приемника (рис. 1). Трасса, полученная на основе данных группы NORSAR (Балтийский щит), может быть достаточно просто интерпретирована. Например, не вызывает сомнений вступление обменной волны от зоны Мохо на времени порядка 5 секунд. Трасса полученная для станции Обнинск достаточно сильно зашумлена, несмотря на то что установлена в шахте на глубине

30 метров в толще известняковых пород. Это связано с тем, что станция установлена в центре Русской платформы, где осадочный слой в среднем имеет мощность порядка 1.5 км. Станция Калькутта приведена здесь как абсолютный рекордсмен по амплитуде обменных волн, возникающих на границе осадочных и коренных пород. Они по меньшей мере в четыре раза превышают обменную волну от зоны Мохо, полученную на Балтийском щите.

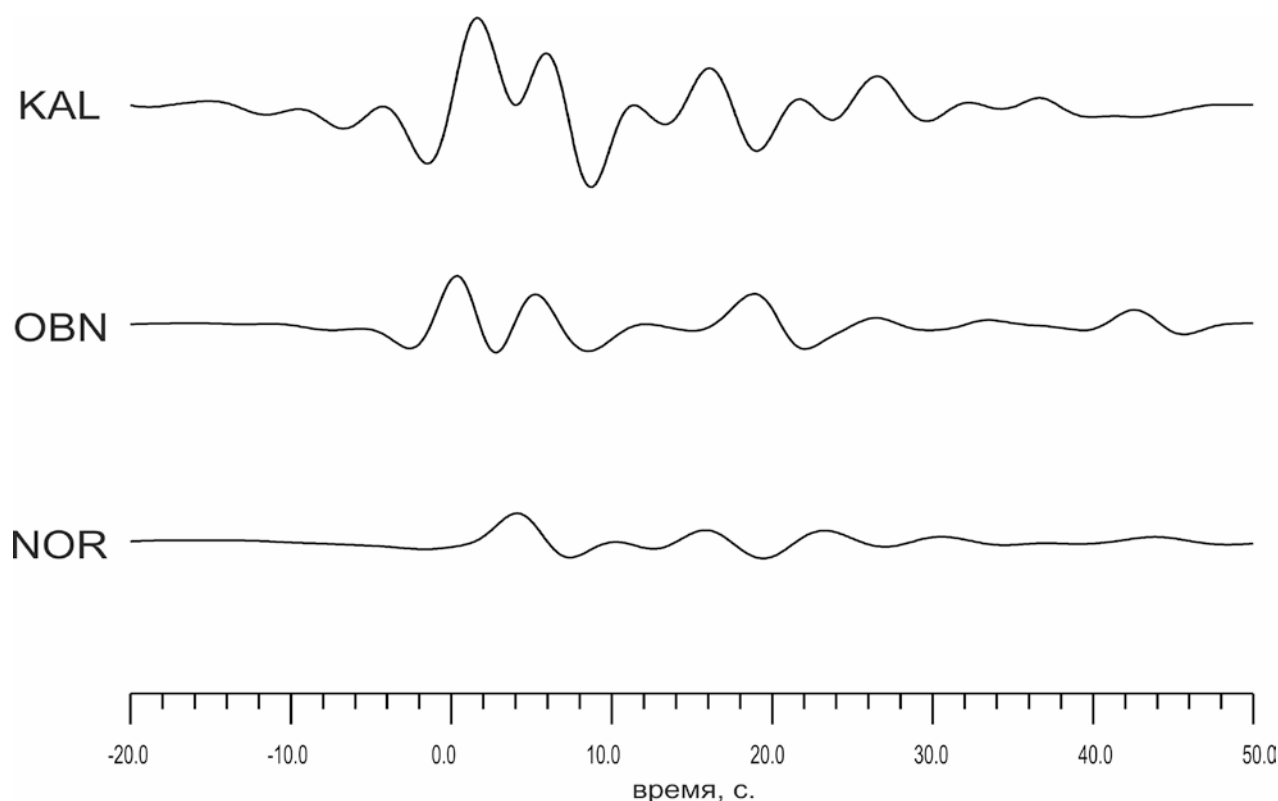


Рис. 1 Наблюдаемые функции приемника для трех регионов с осадочным слоем различной мощности. Станция NOR – центральный прибор группы NORSAR на Балтийском щите (мощность осадочного слоя порядка первых десятков метров), станция OBN – сейсмическая станция Обнинск на Русской платформе (мощность осадочного слоя порядка 1500 метров), станция KAL – сейсмическая станция Калькутта на Индостанской платформе [8] (мощность осадочного слоя порядка 10000 метров).

Для более подробного исследования вопроса влияния осадочного слоя были проведены теоретические исследования на базе стандартной модели IASP91. Модель была составлена из слоев мощностью 1 км до глубины 700 км с четырьмя сейсмическими границами – 20, 35, 410 и 660 км и слабым градиентным повышением скорости между ними вниз по разрезу. Рассматривалась плоская продольная волна, подходящая к подошве этой слоистой пачки. Падающая волна представляла собой импульс Гаусса длительностью 1.6 с и единичной амплитуды, со значением параметра луча 6.3 сек/°. Синтетические сейсмограммы рассчитывались методом Томсона-Хаскелла [6] и от них вычислялись функции приемника.

Было моделировано четыре трассы – на базе модели IASP91; на базе модели IASP91 с добавлением приповерхностного слоя мощностью 200 метров, симулирующего обводненную осадочную структуру; на базе модели IASP91 с добавлением верхнего слоя мощностью 500 метров, симулирующего глинистый слой; на базе модели IASP91 с добавлением трехслойного осадочного слоя, первые 100 метров которого представляют собой обводненную породу, далее 500 метров глин и известняковый слой мощностью 1000 метров (такая структура осадков характерна для Русской платформы). Все трассы, за исключением построенной по базовой модели IASP91, отфильтрованы низкочастотным фильтром Баттерворта с граничным периодом 5 секунд (рис. 2). Трасса IASP91 не фильтровалась для того, чтобы показать и идентифицировать все основные обменные и многократные волны, участвующие в формировании функции приемника.

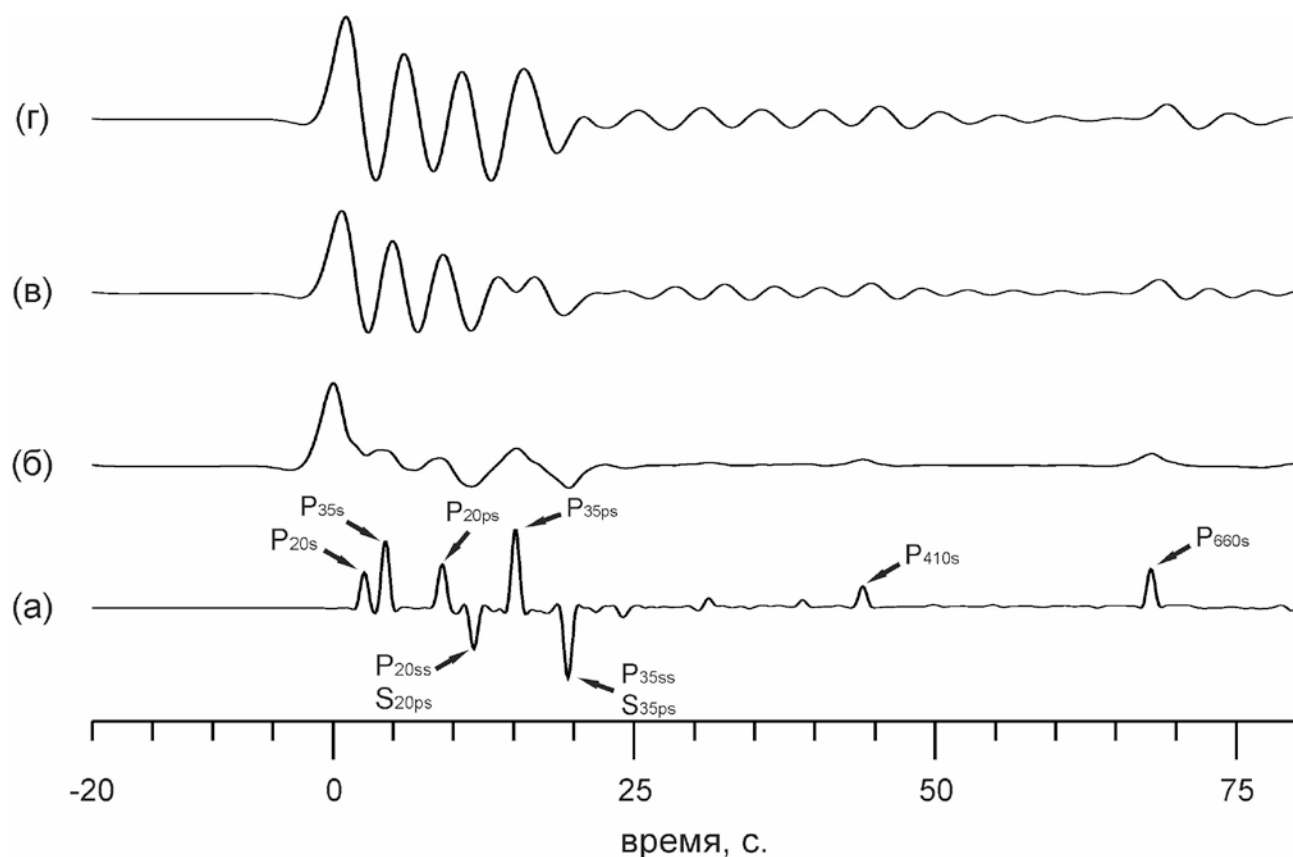


Рис. 2 Синтетические функции приемника. (а) – на базе модели IASP91; (б) – на базе модели IASP91 с добавлением приповерхностного слоя мощностью 200 метров ($V_s = 0.5$ км/с; $V_p/V_s = 3$); (в) – на базе модели IASP91 с добавлением верхнего слоя мощностью 500 метров ($V_s = 1$ км/с; $V_p/V_s = 3$); (г) – на базе модели IASP91 с добавлением трехслойного осадочного слоя, первые 100 метров которого представляют собой обводненную породу ($V_s = 0.5$ км/с; $V_p/V_s = 3$), далее 500 метров глин ($V_s = 1$ км/с; $V_p/V_s = 3$) и известняковый слой мощностью 1000 метров ($V_s = 2$ км/с; $V_p/V_s = 2$).

Анализируя полученные трассы можно обратить внимание на то, что маломощный осадочный слой (рис. 2б) даже с очень высоким отношением V_p/V_s хотя и зашумляют трассу, но не препятствуют выделению основных кратных и обменных волн. Более мощный и более консолидированный осадочный слой (рис. 2в) радикально искажает запись препятствуя выделению обменных волн от границ в коре. Также реверберации от него продолжаются порядке 60 секунд после вступления первой продольной волны и препятствуют надежному обнаружению обменной волны от границы 410 км. Сопоставляя ее с трассой, смоделированной с учетом трехслойного осадочного слоя общей мощностью 1600 метров (рис. 2г) можно отметить что записи хотя и отличаются, но не так радикально, как отличаются, например, трассы (б) и (в) на рис.2.

Можно заключить что маломощный сильноконтрастный осадочный слой (100-200 метров) генерирует быстро затухающие колебания высокой амплитуды, которые не оказывают радикально влияния на запись, более мощный осадочный слой (500 метров) создает реверберации, которые препятствуют надежному обнаружению всех целевых фаз, включая и обменную волну от верхней границы зоны фазовых переходов.

Метод разделения функций приемника по частотному составу.

С целью получения устойчивого скоростного разреза коры и верхней мантии и получения как можно более детальных сведений о скоростном разрезе и мощности осадочного чехла предлагается обрабатывать экспериментальные данные в двух частотных диапазонах. Его суть состоит в разделении всего массива функций приемника на короткопериодные и широкополосные использованием различной фильтрации. Характеристики фильтров определяются индивидуально для каждой станции оценкой характерного частотного состава записей. После формирования этих групп данных для них независимо решается обратная задача.

Моделирование “короткопериодного” набора данных позволяет дать точные оценки осадочного чехла и основных границ в консолидированной коре, вплоть до зоны Мохо. Полученное таким образом решение используется в качестве априорной модели при восстановлении всей скоростной структуры вплоть до глубины 300 км. Причем, наиболее контрастные верхние слои в осадочной толще (первые сотни метров), исключаются из обращения, а их мощности и скоростные характеристики фиксируются. Это связано с тем, что информация о них присутствует в широкополосной функции приемника в искаженном виде, что не позволяет корректно восстанавливать их по данным только ее, однако должна быть обязательно учтена с целью получения устойчивого и корректного результата. Данный подход с успехом применяется для Русской платформы [3, 4], характеризующейся наличием достаточно мощного осадочного чехла (порядка 1.5 км).

Список литературы

1. Винник Л.П. Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. с. 16–27.
2. Винник Л.П., Эрдуран М., Орешин С.И., Косарев Г.Л., Кутлу Ю.А., Чакир О., Киселев С.Г. // Совместное обращение Р- и S- приемных функций и дисперсионных кривых волн Рэлея: результаты для центрального Анатолийского плато // Физика Земли. 2014. № 4. с. 1–11.
3. Гоев А.Г., Косарев Г.Л., Ризниченко О.Ю., Санина И.А. Скоростная модель западной части Волго-Уралии методом функции приемника // Физика Земли. 2018. № 6. с. 154–169.
4. Санина И.А., Королёв С.А., Косарев Г.Л., Ризниченко О.Ю. Строение литосферы в зоне сочленения мегаблоков Восточно-Европейской платформы по данным функции приемника // Докл. РАН. 2014. Т. 456. № 3. С. 338–341.
5. Farra V., Vinnik, L. Upper mantle stratification by P and S receiver functions // Geophys. J. Int. 2000. V. 141. P. 699–712.
6. Haskell, N.A. Crustal reflections of plane P and SV waves // J. Geophys. Res. 1962. V. 67. P. 4751–4767
7. Kind R., Kosarev G.L., Petersen N.V. Receiver functions at the stations of the German Regional Seismic Network (GRSN) // Geophys. J. Int. 1995. V. 121. P. 191–20.
8. Kosarev, G. L., Oreshin, S. I., Vinnik, L. P., Kiselev, S. G., Dattatrayam, R. S., Suresh, G., Baidya, P. R. Heterogeneous lithosphere and the underlying mantle of the Indian subcontinent // Tectonophysics. 2013. V. 592. P. 175–186.
9. Vinnik L.P. Detection of waves converted from P to S in the mantle // Phys. Earth Planet. Inter. 1977. V. 15. P. 39–45.
10. Vinnik L.P., Reigber C., Aleshin I.M., Kosarev G.L., Kaban M.K., Oreshin S.I., Roecker S. Receiver function tomography of the central Tien Shan // Earth and Planetary Science Letters. 2004. V. 225. P. 131–146/0.