

УДК 550.344

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В СЕЙСМОЛОГИИ И СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

А.Л. Левшин, М.Х. Ритцволлер

Центр по изучению земных недр, Колорадский Университет, Боулдер, США

Теоретическое и экспериментальное изучение поверхностных волн имеет долгую историю и составляет важную часть сейсмологической теории и практики. Нужно особо отметить существенный вклад В. И. Кейлис-Борока в теорию возбуждения и распространения поверхностных волн, в том числе в решение обратных задач в этой области. В последние годы теория поверхностных волн широко используется на практике на самых различных уровнях. Здесь приводится краткое описание наших последних результатов в региональной томографии континентов по поверхностным волнам и в исследованиях скоростей поперечных волн в рыхлых осадках под океанами.

SURFACE WAVES IN SEISMOLOGY AND SEISMIC PROSPECTING

A.L. Levshin, M.H. Ritzwoller

Department of Physics, University of Colorado, Boulder, USA

Theoretical and experimental studies of seismic surface waves have a long history and constitute the important part of seismological theory and practice. The significant contributions of V.I. Keilis-Borok to theory of surface wave excitation and propagation, and to the inversion of surface wave observations should be especially mentioned. In recent years surface waves have found wide applications in various seismological studies of a very different scale. We present a brief description of our recent results in regional surface wave tomography of continents and in studying shear-velocity structure of soft sediments below sea bottom.

Введение

Поверхностные волны образуют сильнейшую и наиболее продолжительную часть сейсмических колебаний, возбуждаемых взрывами и неглубокими землетрясениями. Пересекая различные геологические структуры, они “впитывают” информацию о свойствах этих сред. Эта информация лучше всего отражена в дисперсии – зависимости их скорости от частоты. Другие свойства поверхностных волн – такие, как поляризация, частотный состав, затухание, азимутальные вариации амплитуды и фазы – тоже контролируются средой между источником и приемником. Некоторые из них зависят также от свойств излучающего источника и среды вокруг него.

Информация о строении Земли и характере сейсмического источника, содержащаяся в сейсмограммах, может быть извлечена из них современными методами спектрального и спектрально-временного анализа и использована для решения многочисленных научных и практических задач. Перечислим здесь важнейшие из них:

- определение (в региональном и глобальном масштабах) скоростного строения и поглощающих свойств земной коры, литосферы и верхней мантии Земли;
- рекогносцировочное изучение осадочных бассейнов на суше и на море;
- изучение зоны малых и промежуточных скоростей при сейсмической разведке углеводородов и определение статических поправок, в особенности при многокомпонентных съемках с использованием обменных отраженных волн PS ;

- определение строения и упругих свойств грунтов в разнообразных инженерно-геологических, археологических и экологических исследованиях на суше и в мелком море;
- определение свойств сейсмических источников, включая магнитуду, тензор сейсмического момента, динамические параметры очага (размер зоны разрыва, направление и скорость разрыва в очаге землетрясения, силы подземного взрыва);
- распознавание подземных ядерных взрывов среди сейсмических событий естественного и искусственного происхождения.

Приведенные ниже данные дают некоторое представление о различных областях применения, частотном и волновом диапазоне и глубинах проникания поверхностных волн.

Частота, Гц	Период, с	Длина волны, км	Фазовая скорость, км/с	Глубина проникания, км	Приложение
10–50	0.02–0.1	0.002–0.05	0.1–0.5	0.020	Инженерная геология. Археология
1–5	0.2–1	0.15–1.5	0.1–1.5	0.2	Статические поправки. Изучение осадочного чехла
0.1–0.2	5–10	7–30	2–3	5	Изучение осадочных бассейнов
0.03–0.1	10–35	30–100	3.0–3.5	40	Изучение земной коры
0.003–0.03	35–350	200–1000	4–5	300	Изучение верхней мантии

Широкое применение поверхностных волн в сейсмологии стало возможным в результате длительных теоретических и экспериментальных исследований, начатых еще лордом Рэлеем в 1887 г. и продолженных в работах Лява, Голицына, Джеффриса, Стоули, Пикериса, Канаи, Сезава, Сато, М. Наймарка, Шермана, Лэпвуда, Юинга, Пресса, Кнопва, Хаскелла, Харкрайндера, Е. Саваренского и многих других исследователей.

Трудно в короткой статье дать содержательный исторический обзор исследований, обогативших теорию и эксперимент в этой области. Однако нам хотелось бы особенно отметить большой вклад, внесенный в изучение поверхностных волн В.И. Кейлис-Бороком. Одного из авторов (А.Л.Л.) связывают с Владимиром Исааковичем долгие годы совместной работы и дружбы. Ему он обязан пожизненным увлечением этой интереснейшей ветвью сейсмологии.

В.И.Кейлис-Бороку принадлежит первое фундаментальное исследование возбуждения и распространения интерференционных сейсмических волн в многослойных средах [1].

В.И.Кейлис-Борок развил концепцию о различии спектров сейсмических волн, возбуждаемых землетрясениями и подземными взрывами, которая послужила основой главного современного метода распознавания ядерных взрывов (так называемый $M_s : mb$ дискриминант) [2–4].

В.И.Кейлис-Борок инициировал использование аппарата спектральной теории дифференциальных операторов для анализа полей интерференционных волн в произвольных вертикально-неоднородных средах. Это привело к развитию эффективных методов расчета и анализа поверхностных волн в реалистических моделях Земли [5–7]. Он впервые сформулировал в наиболее общей форме постановку обратных задач сейсмологии [8] и был инициатором создания эффективной методики решения обратной задачи построения скоростного разреза Земли по совокупности сейсмических наблюдений (времена пробега и амплитуды объемных волн, дисперсионные кривые поверхностных волн). При его решающем участии эта методика была применена к изучению строения Земли в разных регионах мира в отечественных и международных проектах [9–11]. Значение этих работ для развития поверхностно-волновой сейсмологии исключительно велико.

Мы хотели бы остановиться только на двух аспектах применения поверхностных волн в сейсмических исследованиях совершенно различного масштаба, выполненных в недавние годы Центром по изучению внутреннего строения Земли Колорадского Университета. Мы кратко обсудим: (1) поверхностно-волновую томографию континентального масштаба, (2) изучение с помощью поверхностных волн скоростного строения верхней части геологического разреза.

1. Поверхностно-волновая томография

Томографические исследования горизонтальных неоднородностей верхней мантии Земли с помощью поверхностных волн имеют примерно двадцатилетнюю историю. Наиболее далеко продвинуты глобальные исследования, в которых интерпретируются измерения фазовых скоростей между эпицентром и регистрирующей станцией для всевозможных комбинации этих пар. При этом обычно используются не только наблюдения по кратчайшим путям, но и записи волн, прошедших через антиэпицентр [12–16]. Экстром и др. [17] провели глобальную томографию по измерениям групповых скоростей. Как правило, в таких исследованиях используются только достаточно сильные землетрясения ($M_s > 6$) и диапазон периодов ограничен снизу 40–50 с. Измерения обычно полностью автоматизированы и опираются на существующие модели Земли [18,19]. Нолет [20] и Шнидер [21] разработали методику инверсии данных поверхностных волн путем подгонки волновых форм наблюдаемых и расчетных сейсмограмм.

Наш подход к анализу поверхностных волн заметно отличается от перечисленных выше. Мы используем для томографии измерения групповых скоростей поверхностных волн Рэлея и Лява в широком диапазоне периодов (от 10–15 до 200 с), полученные в результате применения спектрально-временного анализа – СВАНа [22–25]. Эти измерения осуществляются с участием интерпретатора в диалоговом режиме, что позволяет существенно расширить диапазон измерений в сторону коротких периодов и анализировать менее сильные землетрясения. Полученные измерения затем проходят автоматический контроль, отвергающий ненадежные или ошибочные данные и объединяющий наблюдения по близким путям в единое измерение. Томографические карты групповых скоростей для фиксированного набора периодов строятся по методике, детально описанной в статье [26]. Карты групповых скоростей используются при построении трехмерной скоростной модели изучаемой территории и для эффективного выделения поверхностных волн от слабых сигналов с помощью так называемых “согласованных по фазе” фильтров [27]. Таким образом, одновременно достигается несколько научных и прикладных целей. Трехмерные модели помогают изучению региональных и глобальных геодинамических процессов. В то же время, они могут использоваться для улучшения лоцирования слабых событий региональными сетями сейсмических станций. Слабые поверхностно-волновые сигналы, извлеченные из шума, используются для различения сейсмических источников на основе $M_s : mb$ дискриминанта. Оба этих результата весьма важны для мониторинга Договора о полном запрещении ядерных испытаний.

В последние 3–5 лет в результате проведенных нами работ получены детальные карты групповых скоростей Евразии [25] (с детализацией в Средней и Юго-Восточной Азии [28]), Южной Америки [29], Арктики [30], Антарктики [31]. Суммарное количество измерений дисперсионных кривых групповых скоростей превысило 30 000 для волн Рэлея и 25 000 для волн Лява. Разрешающая способность полученных карт в районах с высокой плотностью путей поверхностных волн достигает 250–300 км, в районах с меньшей плотностью наблюдений – 400–500 км. Такое разрешение значительно лучше, чем у существующих глобальных моделей. Например, отчетливо выделяются относительно небольшие осадочные бассейны и области горячих точек в мантии. Совместное использование карт групповых скоростей и глобальных карт фазовых скоростей позволяет строить детальные модели земной коры и верхней мантии, существенно уточняющие известные глобальные модели [32].

Таким образом, роль поверхностных волн в сейсмологических исследованиях земных недр заметно возросла.

2. Изучение малых глубин с помощью поверхностных волн

В последующей дискуссии необходимо различать две практически независимые ветви сейсмической разведки – инженерную и нефтегазовую, нацеленные на различные объекты. Инженерная сейсморазведка применяется для изучения первой сотни метров геологического разреза для получения инженерно-геологических и гидрогеологических характеристик грунтов. В основном для этих целей используются преломленные и, реже, отраженные волны. Неоднократно делались попытки разработать технологию использования поверхностных волн Рэлея для получения разреза по скоростям поперечных волн и оценки упругих свойств грунтов. Некоторые из этих технологий получили относительно широкое применение в практике инженерных исследований [33–36] и дали практически ценные результаты. Однако нельзя не отметить, что в этих работах преобладает упрощенный подход к интерпретации наблюдаемых волновых полей. В частности, практически игнорируется существование высших мод, которые во многих случаях доминируют на записи, что неизбежно ведет к ошибочной интерпретации. Представляется, что использование более продвинутых методов интерпретации, применяемых в сейсмологии, может существенно улучшить результаты инженерной сейсморазведки поверхностными волнами.

Неоднократно высказывались идеи о возможности использования поверхностных волн в целях изучения верхней части скоростного разреза (зоны малых скоростей, в частности) для оценки статических поправок к временам пробега отраженных волн. Однако этот подход не получил применения в практике сейсморазведки продольными отраженными волнами в силу слабой чувствительности поверхностных волн к скорости продольных волн. Недавно в сейсморазведке, особенно на море, стали активно использоваться обменные отраженные волны типа PS . Хотя использование волн PS в сейсмической практике было предметом обсуждения в течение более 40 лет (например, [37,38]), только в последние годы были продемонстрированы значительные преимущества многокомпонентной сейсморазведки при изучении нефтегазоносных структур. Оказалось, что слабая чувствительность поперечных волн к присутствию газов позволяет значительно улучшить сейсмические изображения изучаемых структур [39,40]. Однако широкое использование этой технологии затруднено отсутствием надежных данных о скоростном строении верхней части разреза, в особенности о скоростях поперечных волн, что не позволяет достоверно оценить статические поправки и согласовать получаемые по продольным и обменным волнам сейсмические разрезы.

Наш опыт изучения морских сейсмических данных [41] показал, что в получаемых в ходе трехкомпонентных съемок сейсмических материалах весьма часто содержится значительная информация о скоростях поперечных волн в верхней части разреза. Она переносится несколькими модами поверхностных волн. Основная мода обычно называется волной Стоули – в честь открывшего этот тип волн английского геофизика [42], или волной Шолте – в честь голландского сейсмолога, значительно продвинувшего теорию этих волн [43]. Применяя низкочастотную фильтрацию (подавляющую колебания с частотами выше 3–5 Гц), удастся выделить и измерить дисперсионные параметры нескольких (трех–четырех) мод с различной глубиной проникания и разной чувствительностью к определенным частям разреза. Удастся также выделить и измерить времена пробега рефрагированной S -волны. Анализируя комбинацию данных: годографы волн и дисперсионные кривые нескольких мод, как это было впервые предложено в работе [8], удастся достаточно уверенно определить скоростной разрез по поперечным волнам до глубины 100–150 метров и оценить его надежность. Характерной особенностью полученных скоростных профилей являются исключительно низкие значения скорости v_s (40–50 м/с) и высокие отношения v_p/v_s (от 30 до 5) в верхних 10–15 метрах разреза, сложенного молодыми илстыми отложениями или грязевыми лавами. Очевидно, что неучет влияния столь низкоскоростной зоны на времена пробега PS -волн может приводить к значительным интерпретационным ошибкам.

Нам представляется, что многоволновая интерпретация, использующая сейсмологические методы, вскоре найдет широкое применение в сейсморазведочных работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кейлис-Борок В.И. Интерференционные поверхностные волны. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 160 с.
2. Keilis-Borok V.I. On estimation of the displacement in an earthquake source and of source dimensions // Ann. Geofis. 1959. Vol.12, N 2. P.205–214.
3. Кейлис-Борок В.И. Различие спектра поверхностных волн землетрясений и подземных взрывов // Тр. ИФЗ АН СССР. 1960. Т.15(182). С.88–100.
4. Keilis-Borok V.I. Series of papers on nuclear explosion recognition // Proc. Geneva conference of technical experts for verification of compliance to Nuclear Test Ban Treaty. 1959–1961, 1987.
5. Keilis-Borok V.I., Neigauz M.G., Shkadinskaya G.V. Application of the theory of eigenfunctions to the calculations of surface wave velocities // Rev. Geophys. 1965. Vol.3, N 1. P.105–109.
6. Andrianova Z.A., Keilis-Borok V.I., Levshin A.L., Neigauz M.G. Seismic surface Love waves. N.Y.: Consultants Bureau, 1967.
7. Левшин А.Л. Поверхностные и каналовые сейсмические волны. М.: Наука, 1973. 176 с.
8. Keilis-Borok V.I. Seismology and logics // Rev. Geophys. 1964. Vol.2. P.61–79.
9. Keilis-Borok V.I., Yanovskaya T.B. Inverse problems of seismology (structural review) // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1967. Vol.13. P.223–234.
10. Валюс В.П., Кейлис-Борок В.И., Левшин А.Л. Определение скоростного разреза верхней мантии Европы // ДАН СССР. 1969. Т.185, N 3. С.564–567.
11. Keilis-Borok V.I. The inverse problem of seismology // Mantle and Core in Planetary Physics. N.Y.: Acad. Press, 1971. P.242–275.
12. Masters G., Johnson S., Laske G., Bolton H. A shear-velocity model of the mantle // Phil. Trans. Roy. Soc. London A. 1996. Vol.354. P.1385–1411.
13. Montagner J.P., Tanimoto T. Global upper mantle tomography of seismic velocities and anisotropies // J. Geophys. Res. 1991. Vol.96. P.20337–20351.
14. Trampert J., Woodhouse J. Global phase velocity maps of Love and Rayleigh waves between 40 and 150 seconds // Geophys. J. Inter. 1995. Vol.122. P.675–690.
15. Trampert J., Woodhouse J. High resolution global phase velocity distributions // Geophys. Res. Lett. 1996. Vol.23. P.21–24.
16. Zhang Y.-S., Lay T. Global surface wave phase velocity variations // J. Geophys. Res. 1996. Vol.101. P.8415–8436.
17. Ekstrom G., Tromp J., Larson E.W.F. Measurements and global models of surface wave propagation // J. Geophys. Res. 1997. Vol.102. P.8147–8158.
18. Woodhouse J.H., Dziewonski A.M. Mapping the upper mantle: Three-dimensional modelling of Earth structure by inversion of seismic waveforms // J. Geophys. Res. 1984. Vol.89. P.5953–5986.
19. Woodhouse J.H., Dziewonski A.M. Seismic modelling of the Earth's large scale three-dimensional structure // Phil. Trans. Roy. Soc. London A. 1989. Vol.328. P.291–3089.
20. Nolet G. Wave form tomography // Seismic tomography with applications in global seismology and exploration geophysics. Reidel Publ., 1987. P.301–302.
21. Snieder R. Large-scale waveform inversion of surface waves for lateral inhomogeneity. 2: Application to surface waves in Europe and Mediterranean // J. Geophys. Res. 1988. Vol.93. P.12067–12080.
22. Dziewonski A.M., Bloch S., Landisman M. A technique for the analysis of transient seismic signals // Bull. Seism. Soc. Amer. 1969. Vol.59. P.427–444.
23. Levshin A.L., Pisarenko V.F., Pogrebinsky G.A. On a frequency-time analysis of oscillations // Ann. Geophys. 1972. Vol.28. P.211–218.
24. Levshin A.L., Yanovskaya T.B., Lander A.V., Bukchin B.G., Barmin M.P., Ratnikova L.I., Its E.N. Seismic surface waves in laterally inhomogeneous Earth / Ed. V.I.Keilis-Borok. Dordrecht: Kluwer Publ. House. 1989. 293 с.
25. Ritzwoller M.H., Levshin A.L. Surface wave tomography of Eurasia: Group velocities // J. Geophys. Res. 1998. Vol.103. P.4839–4878.
26. Barmin M.P., Ritzwoller M.H., Levshin A.L. A fast and reliable method for surface wave tomography // Pure and Appl. Geoph., Special volume on CTBT monitoring: Surface waves. 2000. In press.
27. Russell D.W., Herrmann R.B., Hwang H. Application of frequency-variable filters to surface wave amplitude analysis // Bull. Seism. Soc. Amer. 1988. Vol.78. P.339–354.
28. Ritzwoller M.H., Levshin A.L., Ratnikova L.I., Egorkin-Jr A.A. Intermediate period group velocity maps across Central Asia, Western China, and parts of the Middle East // Geoph. J. Inter. 1998. Vol.134. P.315–328.
29. Vdovin O.Y., Rial J.A., Ritzwoller M.H., Levshin A.L. Group-velocity tomography of South America and the surrounding oceans // Geoph. J. Inter. 1999. Vol.136. P.324–330.
30. Levshin A.L., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Villasenor A., Padgett C.A. New constraints on the Arctic crust and uppermost mantle: Surface wave group velocities, Pn and Sn // Phys. Earth. Planet. Inter. 2000. In press.
31. Levshin A.L., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Villasenor A., Trampert J. Crustal and upper mantle structure beneath polar regions from broadband surface waves // Seism. Res. Lett. 2000. Vol.71, N 2. 215 p.
32. Villasenor A., Ritzwoller M.H., Levshin A.L., Barmin M.P., Engdahl E.R., Spakman W., Trampert J. Shear velocity structure of central Eurasia from inversion of surface wave velocities // Phys. Earth Planet. Inter. 2000. In press.

33. *Бондарев В.И.* Сейсмический метод определения физико-механических свойств нескальных грунтов. Урал. Екатеринбург: Горно-геол. акад.; М-во общ. и проф. образования. 1997.
34. *Kovalevsky E.V., Yefremov V.P., Lumanov A.A.* Application on Stoneley waves in shallow water engineering studies. Proc. of the 6-th Intern. Congress of the Int. Assoc. of Engineer. Geol. Amsterdam. 6-10 Aug. 1990. P.1095–1100.
35. *Yuan D., Nazarian S.* Automated surface wave method: Inversion technique // J. Geotech. Engineer. 1993. Vol.119. P.1112–1126.
36. *Xia J., Miller R., Park C.* Estimation of shear velocity by inverting Rayleigh wave phase velocity // J. Geophys. 1999. Vol.64. P.691–700.
37. *Ратникова Л.И., Рац-Хизгия М.И.* Использование обменных отраженных волн в сейсморазведке // Геофиз. разведка. 1963. N 13.
38. *Берзон П.С., Ратникова Л.И., Рац-Хизгия М.И.* Сейсмические обменные отраженные волны. М.: Наука, 1966. 212 с.
39. *Caldwell J.* Marine multi-component seismology // The Leading Edge. 1999. Vol.18, N 11. P.1274–1282.
40. *Gaiser J.E.* Multicomponent Vp/Vs correlation analysis // J. Geophys. 1996. Vol.61. P.1137–1149.
41. *Ritzwoller M.H., Levshin A.L.* Estimating shallow shear velocities with marine multi-component seismic data. Submitted to Geophysics. 2000. In press.
42. *Stoneley R.* Elastic waves at the surface of separation of two solids // Proc. Roy. Soc. London. A. 1924. Vol.106. P.416–428.
43. *Scholte J.G.J.* Rayleigh waves in isotropic and anisotropic elastic media // Meded. en Verhand. KNMI. 1958. Vol.72. P.9–43.