

**ТЕОРИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ:
РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ (1964 – 2004)**

А.Л.ЛЕВШИН

Колорадский Университет, Болдер, США

**THEORY AND INTERPRETATION
OF SEISMIC WAVE FIELDS IN RETROSPECTIVE
(1964 – 2004)**

A.L.LEVSHIN

University of Colorado at Boulder, USA

Введение

Прошло 40 лет со времени основания ежегодного издания “Вычислительная сейсмология” – значительный промежуток времени для любой науки. Появилась возможность оценить, что из опубликованного оставило заметный след, что ушло в небытие, и что еще не востребовано, но потенциально эффективно и может найти дорогу в будущем. Интересно проследить, насколько выпуски этого издания повлияли на развитие сейсмологии за пределами нашей страны. Автор думает, что он находится в выгодном для этой цели положении, так как первые 27 лет он активно участвовал в публикациях сборника “Вычислительная сейсмология” как автор и редактор, а в последующие годы, работая среди американских сейсмологов, мог оценить, насколько западные сейсмологи знают и используют результаты, опубликованные в этих сборниках и их английских переводах, издаваемых в США.

Хорошо известно, что серия “Вычислительная сейсмология” (ВС) была инициирована В.И. Кейлис-Бороком для развернутого представления результатов, получаемых возглавляемым им коллективом математиков

и геофизиков Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта АН СССР в новом направлении компьютерного анализа и интерпретации сейсмологических данных. Основные задачи вычислительной сейсмологии были сформулированы в программной статье В.И.Кейлис-Борока [1], определившей на многие годы работу этого коллектива и кооперирующихся с ним математических и геофизических ячеек в других научных институтах страны. Эта статья имела также значительный международный резонанс.

Было бы непосильной задачей отразить в кратком обзоре все аспекты той роли, которую сыграли выпуски ВС в развитии современной геофизики. Поэтому я остановлюсь только на тех разделах вычислительной сейсмологии, которыми непосредственно занимался в своей научной работе: анализе сейсмических сигналов, теории и интерпретации сейсмических волновых полей, прямых и обратных задачах сейсмологии.

1. Анализ сейсмических сигналов

1.1. Спектрально-временной анализ

Среди различных аспектов обширной проблемы анализа сейсмических сигналов значительное внимание в научной литературе было уделено анализу диспергирующих сигналов, в первую очередь поверхностных сейсмических волн. В докомпьютерную эпоху дисперсионные кривые волн Лява и Рэлея строились вручную, путем измерения времен и периодов на фотозаписях этих волн. Пионерские работы А.М. Dziewonski и др. [2,3] привели к разработке компьютерной технологии извлечения дисперсионных кривых и других характеристик поверхностных волн из цифровых сейсмограмм, получившей название “Multiple filtering” (Многоканальная фильтрация). Эта технология основывалась на одновременной фильтрации поверхностно-волнового сигнала системой узкополосных частотных фильтров, и двумерном представлении семейства огибающих сигнала на выходе этой системы в виде карт мощности сигнала в функции частоты и времени. Такие представления, в основном в аналоговой форме, использовались и ранее для анализа гидроакустических сигналов (сонограммы) и анализа речи (вспомним хотя бы знаменитый Вокодер в романе А.И. Солженицына “В круге первом”). Цифровая многоканальная фильтрация позволила выделять и измерять параметры диспергирующих сигналов на фоне сейсмического шума, вступлений объемных волн, сейсмической коды. Однако эта методика грешила систематическими ошибками в измерениях дисперсии в условиях, когда амплитудный спектр сигнала быстро изменялся с частотой. В работах А.В.Ландера и др. [4] и А.Л.Левшина и др. [5] был дан

развернутый анализ этой методологии, предложены способы устранения смещений в оценках дисперсии, оценена помехоустойчивость измерений. Был предложен термин, описывающий эту процедуру – Спектрально–Временной Анализ (СВАН). В английском варианте статьи [4] мы предпочли термин Frequency–Time Analysis (FTAN), ставший с тех пор общепринятым в западной литературе.

Дальнейшему развитию этой методологии были посвящены статьи А.В. Ландера в ВС [6, 7] и принадлежащий ему же подробный анализ оптимальности СВАН в книге [8], вышедшей также в английском переводе. Н.М. Шапиро и С. Сингх [9] внесли ряд дальнейших усовершенствований в методику измерений. Разработанные на основе работ [4–9] компьютерные программы нашли широкое применение во всем мире. Методика FTAN использовалась и используется для массовых определений групповых скоростей поверхностных волн в региональном и глобальном масштабах. Примеры региональных исследований, основанных на измерениях дисперсии поверхностных волн при помощи FTAN, можно найти в работах [10–13] и многих других. Данные измерений использовались для исследования поляризации и азимутальных отклонений поверхностных волн от кратчайших путей [14–18], в томографических построениях карт групповых скоростей [19–22]. Эти карты служат исходным материалом для конструирования детальных трехмерных моделей скоростного строения верхней мантии Земли [23–25], позволяющих по новому исследовать региональные тектонические процессы. Те же карты используются для оптимального выделения слабых поверхностных волн на фоне помех в задачах мониторинга подземных ядерных взрывов [26]. В свою очередь, детальные трехмерные модели верхней мантии позволяют улучшить лоцирование региональных сейсмических событий, что также весьма существенно для успешного мониторинга [27, 28]. FTAN нашел также применение при изучении скоростного строения придонных осадков в морской сейсморазведке [29].

1.2. Выделение скрытых периодичностей из наблюдений сейсмических и других геофизических процессов и полей

В 70-е годы эта задача решалась стандартным нелинейным методом наименьших квадратов, т.е. поиском минимума функционала (сумма квадратов невязок), зависящих от $3N$ переменных (N – число гармоник). В трудных ситуациях (низкое отношение сигнал/шум, близкие частоты) эта процедура неэффективна из-за присутствия многочисленных локальных минимумов в $3N$ -м пространстве параметров. В.Ф. Писаренко [30–32] предложил регулярный метод оценки параметров гармоник (амплитуды, фазы, частоты), не связанный с поиском

минимума в многомерном пространстве. Методика спектрального анализа высокой разрешающей способности, предложенная в этих статьях, широко обсуждалась в западной научной литературе (например, [33–38]). В дальнейшем она была обобщена и усовершенствована и способствовала появлению новых методов высокой разрешающей способности, основанных на оценке собственных значений ковариационных матриц (так называемый алгоритм MUSIC [35, гл. 13]). Я нашел 275 ссылок на статью [32] в западных журналах, в разнообразных теоретических и прикладных работах, далеко выходящих за рамки сейсмологии. Сравнительный количественный анализ разрешающей способности различных методов спектрального анализа, включая алгоритм MUSIC, был несколько позже выполнен Г.М. Молчаном в серии статей, опубликованных в ВС [39–41].

1.3. Выделение сейсмических сигналов по наблюдениям малоапертурных сейсмических групп

В связи с проблемой мониторинга подземных ядерных взрывов в 80-е годы стала весьма актуальной проблема обнаружения слабых сейсмических сигналов по наблюдениям небольших сейсмических групп. Эта задача была детально исследована группой математиков (А.Ф. Кушниц и др.) в ряде выпусков ВС [42–44]. Ими были предложены оптимальные алгоритмы выделения, идентификации и оценки параметров сигналов на фоне пространственно коррелированных шумов, существенно улучшающие ранее применявшиеся методики. Некоторые из этих алгоритмов включены в систему матобеспечения Международного Центра Данных для контроля за ядерными испытаниями в Вене [45–48]. Адаптивный статистический алгоритм для частотно-пространственного анализа данных малоапертурных групп был реализован в автоматической и интерактивной системах для обработки данных сейсмических групп (Seismic Networks Data Analysis, сокращенно SNDA) [49, 50]. SNDA установлена в нескольких западных университетах и используется американской фирмой RefTek, производящей системы сбора сейсмологической информации. Отечественная служба Мониторинга также использует эту автоматизированную систему.

1.4. Идентификация последующих фаз в сейсмологических бюллетенях

В связи с автоматизацией обработки сейсмической информации, поступающей в центры сбора, возникла проблема оптимальной идентификации сейсмических фаз, следующих за первыми вступлениями, по временам их прихода. Алгоритм идентификации, разработанный на-

шим коллективом, был описан в статье [51] и программно реализован автором в 1966 году в Международном Сейсмологическом Центре (Великобритания). Эта процедура, включенная в комплекс обработки сейсмических данных и выпуска Сейсмических Бюллетеней, используется в этом Центре до настоящего времени.

2. Теория сейсмических волновых полей и прямые задачи сейсмологии

2.1. Применение теории дифференциальных операторов в теории и численном моделировании поверхностных сейсмических волн

Теория поверхностных сейсмических волн в период до 1965 г. разрабатывалась в рамках слоисто-однородных моделей (М. Наймарк, Д. Шерман, В. Кейлис-Борок, К. Sezawa, К. Kanai, N. Haskell, L. Knopoff, F. Press, D. Nakrider и др.). Этот подход привел к эффективным вычислительным алгоритмам, однако специфика выбранных моделей существенно сужала сферу применимости теории. В работах [52, 53] и последующих статьях [54–56], опубликованных в ВС, был развит более общий подход, основанный на теории дифференциальных операторов, и основанные на нем вычислительные алгоритмы, позволяющие моделировать поля поверхностных волн в произвольных вертикально- и радиально-неоднородных средах. Так в работе [57], опубликованной в ВС, путем численного моделирования была впервые объяснена природа широко используемых в сейсмологии фаз Lg, Rg и Sa. Теоретические результаты нового подхода использовались в ряде зарубежных публикаций [58, 59].

2.2. “Уплотнение Земли”

При переходе от теории поверхностных волн в вертикально-неоднородной Земле к аналогичной теории для радиально-неоднородного шара были встречены определенные трудности благодаря усложнению соответствующих краевых задач.

М.Л. Гервер и Д.А. Каждан, анализируя единственность восстановления скоростного разреза по дисперсионной кривой волн Лява, заметили, что в этом случае переход от сферической модели к плоской осуществляется точным образом с помощью замены переменных [60]. Это наблюдение было использовано в работе [61] и вошло в западную сейсмологическую литературу под названием “Biswas-Knopoff transformation”. Цикл работ по аналогичному преобразованию для волн Рэлея, выполненных С.Г. Киселевым, А.Н. Кузнецовым и В.М. Маркушевичем

[62, 63], не нашел еще отклика среди западных сейсмологов, пользующихся приближенным преобразованием Бисваса–Кнопова [64] или точными интегральными формулами.

2.3. Комбинирование лучевых и волновых подходов в моделировании полей объемных волн

В получившем в 60-е годы широкое применение лучевом методе описания волновых полей объемных волн не учитывались интерференционные эффекты, вызванные существованием в среде тонких слоев, тонкослойных пачек и переходных зон. Комбинируя лучевой и волновой подходы, Л.И. Ратникова и Т.Б. Яновская разработали алгоритмы моделирования волновых полей в такого рода средах [65, 66], получившие широкое применение в сейсморазведке, общей и инженерной сейсмологии (см., например, [67]).

2.4. Комбинирование лучевых и волновых подходов в моделировании полей поверхностных волн

В начале 70-х годов J. Woodhouse [68] и независимо В.М. Бабич, Б.А. Чихачев и Т.Б. Яновская [69] развили лучевую теорию распространения поверхностных волн в горизонтально-неоднородных средах с плавными неоднородностями. Сложность строения реальной земной коры и верхней мантии требовала учета явлений на границах раздела литосферных плит и крупных тектонических блоков. Серия опубликованных в ВС работ [70–74], посвященная прохождению поверхностных волн через вертикальный и наклонный контакты, позволила найти приближенные решения этой проблемы. Комбинируя этот волновой подход с лучевым методом, удалось описать важнейшие характеристики поверхностно-волновых полей в реальной блоковой модели Земли [8, 75]. Полученные в этих работах результаты неоднократно обсуждались или цитировались в западной литературе [76, 77].

3. Обратные задачи сейсмологии

3.1. Обратная задача геометрической сейсмологии

Теория интерпретации годографов сейсмических волн до 60-х годов базировалась на полученных в начале XX века математических результатах Герглотца и Вихерта. Полученная ими формула для обращения наблюдаемого годографа в скоростной разрез была справедлива только при монотонном возрастании скорости с глубиной. Этот факт не получил достаточного внимания в сейсмической литературе. Между тем, открытие Б. Гутенбергом слоя пониженных скоростей в верхней мантии

требовало пересмотра методов интерпретации годографов. В серии пионерских работ М.Л.Гервера и В.М.Маркушевича, опубликованных в ВС [78–80], впервые была построена строгая теория прямой и обратной кинематической задачи сейсмоки, продемонстрирована и строго описана неустранимая неоднозначность обращения годографа при наличии волноводов.

Графическое описание неоднозначности при построении скоростного разреза в виде фигуры, похожей на жирафа, вошло в несколько западных учебников и монографий (например, [81]). Строгий анализ поведения функции $\tau(p)$, получаемой из годографа $T(X)$, где T – время пробега и X – эпицентральный расстояние, преобразованием

$$\tau(p) = (T - X/p), \quad p = dX/dT$$

выявил важные свойства этой функции, которые были использованы для развития нового метода представления и анализа сейсмической информации, получившего название метода $\tau(p)$. К сожалению, дальнейшие публикации в ВС по теории годографа и анализу инверсии при наличии волноводов [82] не получили должного резонанса на Западе.

3.2. Метод $\tau(p)$

Начало развитию этого метода было положено несколькими статьями Э.Н.Бессоновой, В.М.Фишмана и их коллег [83, 84], опубликованными в ВС и в переводе в западных журналах. В этих работах продемонстрирована эффективная методика трансформации годографов в функцию $\tau(p)$, и обращение этой функции в скоростной разрез, применимая как к рефрагированным, так и к отраженным волнам. Этот метод был подхвачен западными геофизиками и развит применительно к обработке массовых сейсмических данных в сейсморазведке, глубинном зондировании и сейсмологии. Ссылки на работы [83, 84] в английской версии можно найти в нескольких монографиях [77, 81, 85]. Я нашел в западных геофизических журналах более 150 ссылок на статью [83] и более 70 на статью [84] – это, на мой взгляд, замечательный результат!

3.3. Обратные задачи для одномерного волнового уравнения

Исследования М.Л.Гервера по решению обратной задачи для одномерного волнового уравнения [86, 87] нашли значительный резонанс в связи с проблемой восстановления скоростного и плотностного разрезов Земли по спектру ее собственных колебаний, а также в связи с задачей обращения в скоростные разрезы полей отраженных волн в сейсморазведке. Здесь можно отметить работы известных теоретиков-сейсмологов V. Barcilon [88], R.G. Newton [89], J.K. Cohen, N. Bleistein [90].

3.4. Асимптотическая теория собственных колебаний Земли

В работах М.А.Бродского [91–93], опубликованных в ВС, и их обобщении, опубликованном на Западе [94], была впервые разработана асимптотическая теория собственных колебаний Земли, основанная на ВКБ-приближении. Эта теория позволила связать модальный и лучевой подходы к описанию собственных колебаний в единую теорию и переформулировать обратную задачу определения скоростного разреза Земли по частотам собственных колебаний в терминах метода $\tau(p)$. Полученные результаты были также объяснены в терминах конструктивной интерференции элементарных объемных волн в работе [95]. Эти статьи неоднократно цитировались в западной литературе (например, в монографиях [77, 97]).

3.5. Монте-Карло и “Еж”

В середине прошлого века постановка обратных задач сейсмологии еще не была сформулирована с достаточной строгостью. Соответственно и методы решения носили весьма частный характер. В пионерских работах Т. Б. Яновской [98], И.Я.Азбель, В.И.Кейлис-Борока и Т.Б.Яновской [99, 100] была сформулирована обратная задача сейсмологии применительно к годографам и амплитудным кривым объемных волн, и предложен способ ее решения методом Монте-Карло. Этот подход был в дальнейшем активно использован американскими сейсмологами. В.П.Валюс [101] разработал более эффективный алгоритм поиска решений обратной задачи, получивший условное название “Еж”. Этот алгоритм комбинирует случайный поиск возможных решений обратной задачи с детерминированным обследованием под областей вокруг найденных решений. Этот подход был применен В.П.Валюсом и его коллегами к совокупности различных сейсмологических данных: временам пробега и амплитудным кривым объемных волн, дисперсионным кривым поверхностных волн [102, 103]. Вскоре он нашел широкое применение в международных и западных исследованиях строения земной коры объемными и поверхностными волнами (например, [104–106]). Особенно часто этот метод был использован в работах итальянских сейсмологов (G.F.Panza с сотрудниками [107–109]).

3.6. Определение параметров сейсмического очага

Б.Г.Букчин и его коллеги [110–112] разработали методику определения параметров сейсмического очага, основанную на совместном использовании данных о поляризации продольных волн и спектров поверхностных волн с учетом горизонтальной неоднородности Земли. Путем

перебора в пространстве параметров очага оцениваются тензор сейсмического момента, глубина очага и моменты второго порядка, характеризующие пространственные и временные размеры источника, направление и скорость подвижки. Метод нашел применение при изучении механизмов сильных землетрясений [113–118] и в проблеме идентификации подземных ядерных взрывов [119].

Заключение

Проведенный обзор не претендует на полноту и, возможно, не отражает всех аспектов воздействия публикаций “Вычислительной сейсмологии” на мировую сейсмологическую практику в направлениях, затронутых в обзоре. Следует отметить, что в силу сложившейся на Западе традиции большинство специалистов ограничивается чтением ведущих геофизических журналов и не распыляет свое внимание на экзотические переводные издания, доступные только в некоторых научных библиотеках. Поэтому наибольший резонанс на Западе получили те статьи, опубликованные в ВС, которые параллельно или вскоре после этого были опубликованы в ведущих геофизических журналах Запада, или упоминались в широко читаемых монографиях. Тем не менее, из сказанного выше вытекает, что многолетний труд, воплощенный в 34 сборниках “Вычислительной сейсмологии”, сыграл значительную роль в развитии мировой сейсмологической науки и практики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кейлис-Борок В.И. Сейсмология и логика // Некоторые прямые и обратные задачи сейсмологии. М.: Наука, 1968. С.317–350. (Вычисл. сейсмология; Вып.4).
2. *Dziewonski A.M., Bloch S., Landisman M.* A technique for the analysis of transient seismic signals // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1969. Vol.59. P.427–444.
3. *Dziewonski A.M., Mills J., Bloch S.* Residual dispersion measurement: A new method of surface wave analysis // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1972. Vol.62. P.129–139.
4. Ландер А.В., Левшин А.Л., Писаренко В.Ф., Погребинский Г.А. О спектрально-временном анализе колебаний // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. М.: Наука, 1973. С.236–249. (Вычисл. сейсмология; Вып.6).
5. *Levshin A.L., Pisarenko V.F., Pogrebinsky G.A.* On a frequency-time analysis of oscillations // Ann. Geophys. 1972. Vol.28. P.211–218.
6. Ландер А.В. О методике интерпретации результатов спектрального анализа. // Машинный анализ цифровых сейсмических данных. М.: Наука, 1974. С.279–314. (Вычисл. сейсмология; Вып.7).
7. Ландер А.В. Некоторые методологические аспекты измерения спектральных характеристик и интерпретации поверхностных волн // Вопросы прогноза землетрясений и строения Земли. М.: Наука, 1978. С.59–70. (Вычисл. сейсмология; Вып.11).

8. Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г., Бармин М.П., Ратникова Л.И., Итс Е.Н. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. М.: Наука, 1987. с. English translation: *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, Boston, London: Kluwer, 1989. 293 p.
9. *Shapiro N.M., Singh S.K.* A systematic error in estimating surface-wave group velocity dispersion curves and a procedure for its correction // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1999. Vol.89. P.1138–1142.
10. *Levshin A.L., Berteussen K.-A.* Anomalous propagation of surface waves in the Barents Sea as inferred from NORSAR recordings // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1979. Vol.56. P.97–118.
11. *Baumont D., Paul A., Zandt G. et al.* Lithospheric structure of the Central Andes based on surface wave dispersion // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol.107. Art. No 2371.
12. *Cotte N., Pedersen H.A.* Sharp contrast in lithospheric structure across the Sorgenfrei-Tornquist Zone as inferred by Rayleigh wave analysis of TORI project data // *Tectonophysics.* 2002. Vol.360. P.75–88.
13. *Chimera G., Aoudia K., Sarao A., Panza G.F.* Active tectonics in Central Italy: constraints from surface wave tomography and source moment tensor inversion // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2003. Vol.138. P.241–252.
14. *Paulssen H., Levshin A.L., Lander A.V., Snieder R.* Time and frequency dependent polarization analysis: anomalous surface wave observations in Iberia // *Geophys. J. Inter.* 1990. Vol.103. P.483–496.
15. *Levshin A.L., Ratnikova L.I., Berger J.* Peculiarities of surface wave propagation across the Central Eurasia // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1992. Vol.82. P.2464–2493.
16. *Levshin A., Ritzwoller M., Ratnikova L.* The nature and cause of polarization anomalies of surface waves crossing Northern and Central Eurasia // *Geophys. J. Inter.* 1994. Vol.117. P.577–591.
17. *Levshin A.L., Ritzwoller M.H.* Characteristics of surface waves generated by events on and near the Chinese nuclear test site // *Geophys. J. Inter.* 1995. Vol.123. P.131–148.
18. *Shapiro N.M., Campilo M., Singh S.K. et al.* Seismic channel waves in the accretionary prism of the Middle America Trench // *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol.25. P.101–104.
19. *Ritzwoller M.H., Levshin A.L.* Surface wave tomography of Eurasia: group velocities // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol.103. P.4839–4878.
20. *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 // *Geophys. J. Inter.* 1998. Vol.134. P.315–328.
21. *Vdovin O.Y., Rial J.A., Ritzwoller M.H., Levshin A.L.* Group-velocity tomography of South America and the surrounding oceans // *Geophys. J. Inter.* 1999. Vol.136. P.324–330.
22. *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.* 2001. Vol.123. P.185–204.
23. *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.* 2001. Vol.123. P.169–184.
24. *Ritzwoller M.H., Shapiro N., Levshin A., Leahy G.* Crustal and upper mantle structure beneath Antarctica and surrounding oceans // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol.106. P.30645–30670.
25. *Ritzwoller M.H., Shapiro N.M., Barmin M.P., Levshin A.L.* Global surface wave diffraction tomography // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol.107. B12,2335, doi:10.1029/2002JB001777.
26. *Levshin A.L., Ritzwoller M.H.* Automated detection, extraction, and measurement of regional surface waves // *PAGEOPH.* 2001. Vol.158. P.1531–1545.
27. *Levshin A.L., Ritzwoller M.H.* Application of a global-scale 3D Model to improve regional locations // *Studia Geoph. et Geod.* 2002. Vol.46. P.289–292.

28. *Ritzwoller M.H., Shapiro N.M., Levshin A.L., Bergman E.A., Engdahl E.A.* The ability of global models to locate regional events // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol.108. B7,2353, doi:10.1029/2002JB002167.
29. *Ritzwoller M.H., Levshin A.L.* Estimating shallow shear velocities with marine multi-component seismic data // *Geophysics.* 2002. Vol.67. P.1991–2004.
30. *Писаренко В.Ф.* О выделении скрытых периодичностей // *Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных.* М.: Наука, 1973. С.250–286. (Вычисл. сейсмология; Вып.6).
31. *Писаренко В.Ф.* Выделение гармоник из корреляционной функции // *Машинный анализ цифровых сейсмических данных.* М.: Наука, 1974. С.160–181. (Вычисл. сейсмология; Вып.7).
32. *Pisarenko V.F.* The retrieval of harmonics from a covariance function // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1972. Vol.33. P.347–366.
33. *Larimore M.G.* Adaptation convergence of spectral estimation based on Pisarenko harmonic retrieval // *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 1983. Vol.ASSP-31. P.955–962.
34. *Sakai H.* Statistical analysis of Pisarenko's method for sinusoidal frequency estimation // *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 1984. Vol.ASSP-32. P.95–101.
35. *Marple-Jr. S.L.* Digital spectral analysis with application. Prentice-Hall. New Jersey: Englewood Cliffs. 1990.
36. *Ulrych T.J., Sacchi M.D.* Sompi, Pisarenko and the extended information criterion // *Geophys. J. Inter.* 1995. Vol.122. P.719–724.
37. *Fuchs J.-J.* Rectangular Pisarenko method applied to source localization // *IEEE Trans. on Signal Processing.* 1996. Vol.44. P.2377–2383.
38. *Fuchs J.-J.* Extension of the Pisarenko method to sparse linear arrays // *IEEE Trans. on Signal Processing.* 1997. Vol.45. P.2413–2421.
39. *Молчан Г.М.* О потенциальной возможности разрешения частот в спектральном анализе // *Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных.* М.: Наука, 1989. С.160–179. (Вычисл. сейсмология; Вып.22).
40. *Молчан Г.М., Ньюман У.И.* Теоретический анализ метода гармонического разложения // *Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных.* М.: Наука, 1989. С.179–193. (Вычисл. сейсмология; Вып.22).
41. *Молчан Г.М.* Возможности оценивания пиковых частот по главным спектральным компонентам сигнала // *Современные методы интерпретации сейсмологических данных.* М.: Наука, 1991. С.227–252. (Вычисл. сейсмология; Вып.24).
42. *Кушнир А.Ф., Лапшин В.М., Пинский В.И., Писаренко В.Ф., Цванг С.Л.* Статистически оптимальное выделение сейсмических сигналов с помощью группы станций. Модельные исследования алгоритмов // *Теория и алгоритмы интерпретации геофизических данных.* М.: Наука, 1989. С.193–210. (Вычисл. сейсмология; Вып.22).
43. *Кушнир А.Ф., Лапшин В.М., Кбарна Т., Фьен Я.* Алгоритмы статистически оптимальной обработки данных малоапертурных сейсмических групп: тестирование на реальных записях // *Теоретические проблемы геодинамики и сейсмологии.* М.: Наука, 1994. С.288–309. (Вычисл. сейсмология; Вып.27).
44. *Кушнир А.Ф.* Оценивание вектора кажущейся медленности плоской волны по данным трехкомпонентной сейсмической группы: статистическая задача с мешающими параметрами // *Теоретические проблемы в геофизике.* М.: Наука, 1997. С.197–214. (Вычисл. сейсмология; Вып.29).
45. *Pisarenko V.F., Kushnir A.F., Savin I.V.* Statistical adaptive algorithms for estimation of onset moments of seismic phases // *Phys. Earth Planet Inter.* 1987. Vol.47. P.888–900.
46. *Kushnir A.F., Lapshin V.M., Pinsky V.I., Fyen J.* Statistically optimal event detection using small array data // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1990. Vol.80. P.1934–1947.
47. *Kushnir A.F.* Algorithms for adaptive statistical processing of seismic array data // *Monitoring a comprehensive test ban treaty* // Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publ. 1995. P.565–586.
48. *Kushnir A.F., Troitsky E.V., Haikin L.M., Dainty A.* Statistical classification approach to discrimination between weak earthquakes and quarry blasts recorded by Israel Seismic Network // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. Vol.113. P.161–182.

49. *Haikin L. M., Kushnir A.F., Dainty A.M.* Combined automated and off-line computer processing system for seismic monitoring with small aperture arrays // *Seismol. Res. Lett.* 1998. Vol.69. P.235–247.
50. *Passmore P., Pavel P., Rozhkov M., Zimakov L., Haikin L., Mishin D.* Advanced seismic networks // *Seismol. Res. Lett.* 2001. Vol.72. P.383–387.
51. *Арнольд Э.П., Вилмор П.Л., Кейлис-Борок В.И., Левшин А.Л., Пятецкий-Шаниро И.И.* Автоматическая идентификация вступлений сейсмических волн // *Некоторые прямые и обратные задачи сейсмологии.* М.: Наука, 1968. С.170–182. (Вычисл. сейсмология; Вып.4).
52. *Keilis-Borok V.I., Neigauz M.G., Shkadinskaya G.V.* Application of the theory of eigen-functions to the calculations of surface waves velocities // *Rev. Geophys.* 1965. Vol.3.
53. *Андрианова З.С., Кейлис-Борок В.И., Левшин А.Л., Нейгауз М.Г.* Поверхностные волны Лява. М.: Наука, 1965. 107 с. English translation: *Andrianova Z.S., Keilis-Borok V.I., Levshin A.L., Neigauz M.G.* Seismic Love waves. N.-Y.: Consult. Bureau. 1967.
54. *Нейгауз М.Г., Шкадинская Г.В.* Метод расчета поверхностных волн Релея в вертикально-неоднородном полупространстве // *Машинная интерпретация сейсмических волн.* М.: Наука, 1966. С.121–129. (Вычисл. сейсмология; Вып.2).
55. *Шкадинская Г.В.* Метод расчета поверхностных волн Релея в шаре // *Алгоритмы интерпретации сейсмических данных.* М.: Наука, 1971. С.178–188. (Вычисл. сейсмология; Вып.5).
56. *Левшин А.Л., Янсон З.А.* Поверхностные волны в вертикально- и радиально-неоднородных средах // *Алгоритмы интерпретации сейсмических данных.* М.: Наука, 1971. С.147–177. (Вычисл. сейсмология; Вып.5).
57. *Грудева Н.П., Левшин А.Л., Французова В.И.* О природе каналовых сейсмических волн // *Алгоритмы интерпретации сейсмических данных.* М.: Наука, 1971. С.189–198. (Вычисл. сейсмология; Вып.5).
58. *Harkrider D.G., Anderson D.L.* Surface wave energy from point sources in plane layered Earth models // *J. Geophys. Res.* 1966. Vol.71. P.2967–2980.
59. *Herrmann R.B.* Computer programs in earthquake seismology, 2. St. Louis: St. Louis Univ. 1978.
60. *Гервер М.Л., Каждан Д.А.* Нахождение скоростного разреза по дисперсионной кривой. Вопросы единственности // *Некоторые прямые и обратные задачи сейсмологии.* М.: Наука, 1968. С.78–94. (Вычисл. сейсмология; Вып.4).
61. *Biswas N.N., Knoroff L.* Exact earth-flattening calculation for Love waves // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1970. Vol.60. P.1123–1127.
62. *Киселев С.Г., Кузнецов А.Н., Маркушев В.М.* Задача уплощения Земли: происхождение, методы точного решения и разложение в ряд // *Теоретические проблемы в геофизике.* М.: Наука, 1997. С.44–69. (Вычисл. сейсмология; Вып.29).
63. *Киселев С.Г., Кузнецов А.Н., Маркушев В.М.* Применение алгоритма точного уплощения Земли для Р-SV колебаний к разрезу Гутенберга // *Проблемы динамики и сейсмичности Земли.* М.: Наука, 2000. С.88–100. (Вычисл. сейсмология; Вып.31).
64. *Biswas N.N.* Earth-flattening procedure for propagation of Rayleigh waves // *РА-ГЕОРН.* 1972. Vol.96. P.61–74.
65. *Ратникова Л.И., Яновская Т.Б.* Приближенный расчет волновых полей в средах с тонкими слоями // *Некоторые прямые и обратные задачи сейсмологии.* М.: Наука, 1968. С.252–262. (Вычисл. сейсмология; Вып.4).
66. *Ратникова Л.И.* Методы расчета сейсмических волн в тонко-слоистых средах. М.: Наука, 1973.
67. *Cerveny V.* Seismic ray theory. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 2001.
68. *Woodhouse J.* Surface waves in the laterally varying layered structure // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1974. Vol.37. P.461–490.
69. *Бабич В.М., Чизачев Б.А., Яновская Т.Б.* Поверхностные волны в вертикально-неоднородном полупространстве со слабой горизонтальной неоднородностью // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1976. N 4. С.24–31.

70. Левшин А.Л., Яновская Т.Б. Отражение и преломление волн Лява на вертикальной границе // Исследование сейсмичности и моделей Земли. М.: Наука, 1976. С.160–173. (Вычисл. сейсмология; Вып.9).
71. Итс Е.Н., Яновская Т.Б. Отражение и преломление релеевских волн на вертикальной границе раздела // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии. М.: Наука, 1977. С.214–222. (Вычисл. сейсмология; Вып.10).
72. Букчин Б.Г. Распространение волн Лява через вертикальный контакт двух четвертьпространств // Теория и анализ сейсмических наблюдений. М.: Наука, 1979. С.70–79. (Вычисл. сейсмология; Вып.12).
73. Итс Е.Н., Яновская Т.Б. Отражение и преломление поверхностных волн при наклонном падении на вертикальную границу // Теория и анализ сейсмических наблюдений. М.: Наука, 1979. С.86–92. (Вычисл. сейсмология; Вып.12).
74. Bukchin B.G., Levshin A.L. Propagation of Love waves across a vertical discontinuity // Wave motion. 1980. Vol.2. P.293–302.
75. Левшин А.Л. О влиянии горизонтальных неоднородностей на измерения поверхностных волн // Математическое моделирование и интерпретация геофизических данных. М.: Наука, 1984. С.118–126. (Вычисл. сейсмология; Вып.16). English translation: Levshin A. L. Effects of lateral inhomogeneities on surface wave amplitude measurements // Ann. Geophys. 1985. Vol.3. P.511–518.
76. Malischewsky P. Surface waves and discontinuities. Berlin: Akademie-Verlag. 1987.
77. Kennet B.L.N. Seismic wave propagation in stratified media. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1983.
78. Гервер М.Л., Маркушевич В.М. Определение по годографу скорости скорости распространения сейсмической волны // Методы и программы для анализа сейсмических наблюдений. М.: Наука, 1967. С.3–51. (Вычисл. сейсмология; Вып.3). English translation: Gerver M. L., Markushevich V.M. Determination of a seismic velocity from the travel time curve // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1966. Vol.11. P.165–173.
79. Гервер М.Л., Маркушевич В.М. Свойства годографа от поверхностного источника // Некоторые прямые и обратные задачи сейсмологии. М.: Наука, 1968. С.15–63. (Вычисл. сейсмология; Вып.4). English translation: Gerver M. L., Markushevich V.M. On the characteristic properties of travel time curves // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1967. Vol.13. P.241–246.
80. Маркушевич В.М. Характеристические свойства годографа от глубинного источника // Некоторые прямые и обратные задачи сейсмологии. М.: Наука, 1968. С.64–77. (Вычисл. сейсмология; Вып.4).
81. Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology. San Francisco: W. H. Freeman and Co. 1980.
82. Гервер М.Л. Новое в классической задаче обращения годографа // Вопросы геодинамики и сейсмологии. М.: Наука, 1998. С.191–206. (Вычисл. сейсмология; Вып.30).
83. Бессонова Э.Н., Рябой В.З., Ситникова Г.А., Фишман В.М. Решение обратной кинематической задачи ГСЗ методом $\tau(p)$ // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. М.: Наука, 1973. С.134–159. (Вычисл. сейсмология; Вып.6). English translation: Bessonova E.N., Fishman V.M., Sitnikova G.A., Ryaboy V.Z. The tau method for inversion of travel times. I. Deep seismic sounding data // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1974. Vol.36. P.377–398.
84. Бессонова Э.Н., Джонсон Л.Р., Ситникова Г.А., Фишман В.М. Решение обратной задачи сейсмологии методом $\tau(p)$ // Машинный анализ цифровых сейсмических данных. М.: Наука, 1974. С.82–98. (Вычисл. сейсмология; Вып.7). English translation: Bessonova E.N., Fishman V.M., Shnirman M.G., Sitnikova G.A., Johnson L. R. The tau method for inversion of travel times. II. Earthquake data // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1976. Vol.46. P.87–108.
85. Stoffa P.L. (Ed.) Tau-p, a plane wave approach to the analysis of seismic data. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publ. 1989.
86. Gerver M.L. Inverse problem for 1-D wave equation // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1970. Vol.21. P.337–357.
87. Gerver M.L. Inverse problem of seismology // Tectonophysics. 1972. Vol.13. P.483–495.

88. *Barcilon V.* Well-posed inverse eigen-value problems // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1973. Vol.42. P.375–383.
89. *Newton R.G.* Inversion of reflection data for layered media – a review of exact methods // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1983. Vol.65. P.191–215.
90. *Cohen J.K., Bleistein N.* Inverse method for determining small variations in propagation speed // *SIAM J. Appl. Math.* 1977. Vol.32. P.784–789.
91. *Бродский М.А.* О применении асимптотических методов в обратной задаче крутильных колебаний // *Интерпретация данных сейсмологии и неотектоники.* М.: Наука, 1975. С.162–168. (Вычисл. сейсмология; Вып.8).
92. *Бродский М.А.* О применении асимптотических методов в обратной задаче крутильных колебаний. II. Немонотонный случай // *Исследование сейсмичности и моделей Земли.* М.: Наука, 1976. С.134–148. (Вычисл. сейсмология; Вып.9).
93. *Бродский М.А.* Асимптотический метод исследования прямой и обратной задач сферидальных колебаний упругого шара // *Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии.* М.: Наука, 1977. С.150–157. (Вычисл. сейсмология; Вып.10).
94. *Brodskii M.A., Levshin A.L.* An asymptotic approach to the inversion of free oscillation data // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1979. Vol.58. P.631–654.
95. *Левшин А.Л.* О связи между временами пробега волн P и S , фазовыми скоростями высших релеевских мод и частотами сферидальных колебаний в радиально-неоднородной Земле // *Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных.* М.: Наука, 1980. С.101–108. (Вычисл. сейсмология; Вып.13).
96. *Dahlen, F.A., Tromp J.* Theoretical global seismology. Princeton: Princeton Univ. Press. 1998.
97. *Kennet B.L.N.* The seismic wave field. I. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 2001.
98. *Яновская Т.Б.* Вычисление скоростных разрезов верхней мантии как обратная математическая задача // *Изв. АН СССР. Сер. геофиз.* 1963. N 8.
99. *Yanovskaya T.B., Azbel I.Y.* The determination of velocities in the upper mantle from the observations on P-waves // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1964. Vol.8, N 3.
100. *Азбель И.Я., Кейлис-Борок В.И., Яновская Т.Б.* Методика совместной интерпретации годографов и амплитудных кривых при изучении верхней мантии // *Машинная интерпретация сейсмических волн.* М.: Наука, 1966. С.3–45. (Вычисл. сейсмология; Вып.2).
101. *Валюс В.П.* Определение сейсмических разрезов по совокупности наблюдений // *Некоторые прямые и обратные задачи сейсмологии.* М.: Наука, 1968. С.3–14. (Вычисл. сейсмология; Вып.4).
102. *Валюс В.П., Левшин А.Л., Сабитова Т.М.* Совместная интерпретация объемных и поверхностных волн для одного из районов Средней Азии // *Машинная интерпретация сейсмических волн.* М.: Наука, 1966. С.95–103. (Вычисл. сейсмология; Вып.2).
103. *Валюс В.П., Кейлис-Борок В.И., Левшин А.Л.* Определение скоростного разреза верхней мантии Европы // *Доклады АН СССР.* 1969. Т.185. С.564–567.
104. *Knopoff L.* Observations and inversion of surface wave dispersion / in Ritsma A. R. (Ed.) *Tectonophysics. The Upper Mantle.* 1972. Vol.13. P.497–519.
105. *Knopoff L., Panza G.F.* Resolution of upper mantle structure using higher modes of Rayleigh waves // *Ann. Geophys.* 1977. Vol.28. P.211–218.
106. *Sambridge M., Mosegaard K.* Monte Carlo methods in geophysical inverse // *Review of Geophys.* 2002. Vol.40. P.1–29.
107. *Guiardeli M., Sarao A., Panza G.F.* Surface wave tomography and seismic source studies at Campi Flegrei (Italy) // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2002. Vol.134. P.157–173.
108. *Pontevivo A., Panza G.F.* Group velocity tomography and regionalization in Italy and bordering area // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2002. Vol.134. P.1–15.
109. *Vuan A., Russi M., Panza G.F.* Group velocity tomography in subantarctic Scottish Sea region // *Pure Appl. Geophys.* 2002. Vol.157. P.1337–1357.
110. *Букчин Б.Г.* Оценка временных и геометрических характеристик очага землетрясения по пространственно-временным моментам тензора избыточных напряжений // *Математические методы в сейсмологии и геодинамике.* М.: Наука, 1986. С.145–154. (Вычисл. сейсмология; Вып.19).

111. *Букчин Б.Г., Левшин А.Л.* Оценка параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в горизонтально-неоднородной среде // Проблемы сейсмологической информатики. М.: Наука, 1988. С.115–123. (Вычисл. сейсмология; Вып.21).
112. *Bukchin B.G.* Determination of stress glut moments of total degree 2 from teleseismic surface waves amplitude spectra // *Tectonophysics*. 1995. Vol.248. P.185–191.
113. *Campos J., Madariaga R., Nabelek J., Bukchin B.G., Deschampe A.* Faulting process of the 20 June 1990 Iran earthquake from broadband records // *Geophys. J. Inter.* 1994. Vol.118. P.31–46.
114. *Gomez J.M., Bukchin B., Madariaga R., Rogozhin E.A.* A study of the Barisakho, Georgia Earthquake of October 23, 1992 from broad band surface and body waves // *Geophys. J. Inter.* 1997. Vol.129. P.613–623.
115. *Gomez, J. M., Bukchin B.G., Madariaga R., Rogozhin E.A., Bogachkin B.M.* Rupture process of the 19 August 1992 Susamir, Kyrgyzstan, earthquake // *J. of Seismol.* 1997. Vol.1. P.219–235.
116. *Aoudia K., Sarao A., Bukchin B., Suhadolc P.* The 1976 Friuli (NE Italy) thrust faulting earthquake: A reappraisal 23 years later // *Geophys. Res. Lett.* 2000. Vol.27. P.573–576.
117. *Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponnier P., Gaudemer Y, Mostinsky A., Dailu Rong.* Source parameters and tectonic origin of the June 1st, 1996 Tianzhu ($M_w = 5.2$) and July 21st, 1995 Yongden ($M_w = 5.6$) earthquakes, near Haiyuan fault (Gansu, China) // *Geophys. J. Inter.* 2001. Vol.144. P.206–220.
118. *Clevede E., Bouin M.-P., Bukchin B., Mostinski A., Patau G.* New constraints on the rupture process of the 17 August 1999 Izmit earthquake deduced from estimates of stress glut rate moments. // *Geophys. J. Inter.* 2003. In press.
119. *Bukchin B.G., Mostinsky A.Z., Egorkin A.A., Levshin A.L., Ritzwoller M.H.* Isotropic and nonisotropic components of earthquakes and nuclear explosions on the Lop Nor test site, China // *Pure Appl. Geophys.* 2001. Vol.158. P.1497–1516.