

УДК 550.34

Вклад БОРИСА ВИКТОРОВИЧА КОСТРОВА В СЕЙСМОЛОГИЮ: К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ

Г.С. КУШНИР
В.И. ОСАУЛЕНКО

*Институт физики Земли
им.О.Ю.Шмидта РАН,
г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ Борис Викторович Костров – выдающийся советский и российский геофизик всю жизнь работал в Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта. Огромный талант и трудолюбие позволили ему в кратчайшие сроки стать

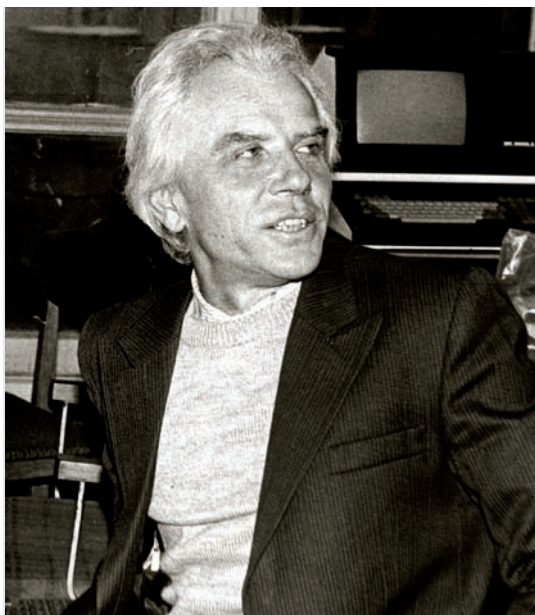
ученым с мировой известностью и авторитетом. Далее изложены основные результаты Б. В. Кострова и его учеников. Об уровне его результатов свидетельствует неизменно высокий индекс цитируемости работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмология, механика землетрясений, история, персоналии, Костров Б.В.

Борис Викторович Костров (17.11.1933 – 17.05.1998) родился в Томске, в семье профессора физики Томского Университета. Детство его было очень тяжелым – отец, был арестован и расстрелян в 1937 году, после чего мать Б.В. Кострова с двумя детьми переехала жить на родину, в Крым. Все время оккупации Крыма фашистами они жили в деревне в горном Крыму; массовые расстрелы, показательные казни оставили свою тяжелую печать на всю жизнь. В 1951 г. Борис Викторович, окончив с золотой медалью школу в Севастополе, пытался поступить на физический факультет в Московский и Киевский Университеты, но не прошел мандатную комиссию как член семьи врага народа. В итоге, при моральной поддержке соученика и товарища отца по Таврическому Университету Иннокентия Ивановича Попова он поступил в Крымский Государственный педагогический институт на физико-математический факультет, по окончании которого в 1955 году и после службы в рядах Советской Армии в 1958 г. поступил работать на геофизическую станцию "Ялта" ИФЗ АН СССР. Начав с должности лаборанта, Борис Викторович в 1960 г. стал и.о. заведующего станцией. Огромный талант и одаренность, задатки исследователя привлекли к нему внимание проф. Е. Ф. Саваренского, по рекомендации которого Б. В. Костров поступил в 1961 г. в аспирантуру ИФЗ АН СССР к заведующему отделом волновых полей доктору физико-математических наук выдающемуся механику Н. В. Зволинскому. В целом, жизнь была очень неласкова к Борису Викторовичу, но здесь ему явно повезло – он попал в отдел, который был одним из самых сильных теоретических коллективов в истории мировой геофизики. 50-60-е гг были вре-

менем расцвета отечественной науки, в том числе, и геофизики, она была востребована обществом и на фоне этого спроса произошел взрывной рост выдающихся личностей и результатов, реализовавших этот рост. Нечасто в жизни бывает так, чтобы одновременно совпало все – спрос на науку, наличие школы и талантливых ученых, потребность в их работе. В этих условиях огромный талант Бориса Викторовича мгновенно породил феерические результаты.

Это было время появления первых серийных универсальных вычислительных машин и операционных систем, пакетов прикладных программ, становление методов вычислительной математики и математической физики – родная стихия Б. В. Кострова, его



БОРИС ВИКТОРОВИЧ
КОСТРОВ
(1933–1998)

среда обитания, где Борис Викторович творил свою музыку, которой отдавался целиком. В 1964 г. после защиты в МГУ кандидатской диссертации и реорганизации отдела Б. В. Костров стал заведующим Отделом волновых полей – единственный случай в истории Института, когда заведующим отделом был назначен младший научный сотрудник. Большинство результатов получено или осознано именно в это время – вся дальнейшая работа была процессом реализации того, что было задумано в эти годы. Именно тогда Борис Викторович проявил себя как крупный специалист с мировым именем в области механики и геофизики, специализировавшийся в динамической теории упругости, механике разрушения и их приложений в геофизике. Итогом этой работы стала докторская диссертация, защищенная Борисом Викторовичем в 1973 г. Основные результаты, полученные Борисом Викторовичем, изложены в двух монографиях: "Механика очага тектонического землетрясения" [17] и "Principles of earthquake source mechanics" [67] в соавторстве с Ш. Дас.

В работах Б. В. Кострова развит и продвинут метод функционально-инвариантных решений Смирнова-Соболева, и на основе этого получены, ставшие классическими, результаты в решении широкого круга автотомельных задач теории упругости. Огромный вклад Бориса Викторовича в решение задач механики разрушения и теории очага землетрясения явился основополагающим в мировой геофизике. На основе этих результатов разработана методика определения основных характеристик очага землетрясения, которая используется в наблюдательной геофизике и сегодня. Результаты, полученные Борисом Викторовичем в теории распространения трещин с переменной скоростью, стали новым этапом в решении динамических задач механики сплошной среды и математической геофизики. Потребность в наблюдательных данных, необходимых для реализации разработанных идей потребовала непосредственного участия в создании современных методов и систем регистрации. В результате существенный вклад Борис Викторович внес в решение практической проблемы автоматизации геофизической сети – современные системы сбора и обработки геофизической информации в значительной степени основываются на результатах, полученных под его руководством и при непосредственном участии в руководимой им лаборатории в 1970–1980-х гг.

Здесь необходимо отметить разработку автоматизированной системы сбора и обработки геофизической информации для локальных полигонов (Проект СВК АСПЗ), разработку аппаратных средств машинной графики, выпускавшихся большой серией на предприятиях Минприбора СССР, и комплекс национальной системы мониторинга за подземными ядерными испытаниями – СНВ-1, в рамках которого был разработан весь комплекс прикладного программного обеспечения, включая интерактивную графическую систему обработки сейсмограмм. Несмотря на сравнительно небольшое число работ (около 50), опубликованных Б. В. Костровым за его яркую научную жизнь, большая часть из них вошла в золотой фонд мировой науки и каждый уважающий себя механик, геофизик считает долгом сослаться на эти работы, являющиеся и по сей день фундаментом для продвижения вперед. Он много сделал в своей творческой жизни, но еще больше не успел. Классические результаты работ Бориса Викторовича в механике оказали большое влияние на продвижение вперед многих ранее нерешенных задач механики разрушения. Ниже кратко изложены результаты, полученные Борисом Викторовичем Костровым за время его работы в Институте Физики Земли. Для адекватного понимания атмосферы в науке того периода и места Б.В. Кострова далее рассматриваются результаты как самого Б.В. Кострова, так и сотрудников Института и его лаборатории.

Раздел геофизики, в котором наиболее активно работал Б.В. Костров, в настоящее время в наиболее общем виде называется математической сейсмологией.

Математическая сейсмология как раздел науки о Земле входит в общую ее часть, называемую математической геофизикой, в которой рассматривается применение математических методов и моделей, необходимых для решения задач геофизики и прогресса в изучении Земли. С научной точки зрения **землетрясение является источником информации, извлечение которой составляет предмет сейсмологии.** Информация, содержащаяся в сейсмических волнах, может быть разделена на две принципиально различные части, связанные с:

- условиями распространения на пути от очага до станции, т.е. строением среды;
- процессом возбуждения волн в источнике – очаге землетрясения.

В соответствии с таким разделением интерпретация данных сейсмических наблюдений

ний заключается в решении двух основных проблем:

- построении сейсмического разреза;
- определении характеристик очага землетрясения.

Эти проблемы возникли практически одновременно, но их удельный вес и пути развития в сейсмологии различны. Изучение очагов землетрясений до начала 60-х годов привлекало меньше внимания, чем исследование строения Земли: изучение строения Земли сейсмологическими методами – основной источник информации об условиях и состоянии вещества на больших глубинах и служит основой для большинства разделов науки о Земле, в то время как изучение очагов землетрясений является более трудной проблемой по сравнению с изучением среды.

Для определения сейсмического разреза в большинстве случаев достаточно знания кинематики сейсмических волн, которая легко устанавливается из сейсмограмм (идентификация фаз и времена их вступления – для объемных волн, дисперсионные кривые – для поверхностных), результаты представимы в компактной форме и в первом приближении не зависят от процесса в очаге, слабо искажается регистрирующей аппаратурой и другими факторами. Информация о движении и условиях в очаге содержится, в основном, в динамике волн (форме записи сейсмических колебаний), которая с большим трудом поддается представлению в компактной форме, искажается аппаратурой и условиями распространения (частично при этом утрачивается безвозвратно). Получение информации об очаге с экспериментальной точки зрения более трудная задача по сравнению с получением информации о разрезе. Поскольку условия распространения оказывают существенное влияние на динамические характеристики сейсмических волн, для извлечения информации об очаге необходимо предварительно определить строение среды.

Основной методов интерпретации сейсмических данных при изучении строения Земли является теория упругости, основные принципы которой установлены в XIX в., а математический аппарат в основном разработан в конце XIX – начале XX в.в. Развитие вычислительных методов и появление ЭВМ произвели переворот в методах интерпретации, но прогресс происходил в рамках классических понятий и сводился к усовершенствованию и обобщению классических результатов.

Решение перечисленных проблем диктовалось развитием геофизики как научного направления и практическими потребностями различных областей народного хозяйства. Наиболее важные результаты, полученные Б.В. Костровым и его сотрудниками в этих двух областях теории упругости, состоят в следующем:

Слоистые среды. Основной класс задач, решенных в этой области – распространение лучей в плоскопараллельных слоистых средах с различными упругими свойствами слоев. Такие модели среды наиболее часто используются в сейсморазведке и инженерной сейсмологии и являются основными для построения моделей в сейсмологии. Разрабатывались два подхода к расчету сейсмического поля в слоистой среде:

- решение задачи методом интегральных преобразований, который не связан (на первом этапе) с выделением индивидуальных волн;
- метод последовательных преломлений и отражений, требующий при реализации больших вычислительных ресурсов.

Значительный вклад в решение задач этого класса внесли сотрудники отдела волновых полей института, в котором работал Б.В. Костров, Н.В. Зволинский [9-11], Н.В. Зволинский, Л.П. Зайцев [27], А.А. Гвоздев, Б.С. Чекин [27], Г.С. Подъяпольский [39, 40], Г.С. Подъяпольский, Ю.И. Васильев [27], Г.А. Скуридин [27], В.И. Кейлис-Борок [27]. Позднее Г.С. Подъяпольский показал при помощи преобразования Каньяра, что задача во временной области имеет точное решение. Этот подход развит и доведен до программной реализации в работах Б.В. Кострова и А.Г. Елифанского [8, 20].

Лучевая асимптотика. Фронт распространяющейся в среде волны представляет собой поверхность разрыва для производных от смещения. В силу этого в окрестности фронта изменение поля смещений по нормали к фронту значительно интенсивнее, чем вдоль фронта волны. Это обстоятельство позволяет рассматривать окрестность каждой точки фронта как локально-плоскую волну. На этой идее построен асимптотический метод изучения окрестности фронтов, известный как лучевой метод. Описание поля в окрестности фронта можно строить с разной степенью точности, хотя обычно в прикладных задачах ограничиваются первыми приближениями. Существенные результаты в этом направлении получены сотрудниками Отдела волновой динамики Института А.А. Гвоз-

девым [27], Н.В. Зволинским, Г.А. Скуридиным [27], Г.С. Подъяпольским [27, 39-41]. В практической реализации программных комплексов, построенных на базе лучевого метода, отметим работы Л.И. Ратниковой [27], предложившей приближенный метод, являющийся синтезом лучевого подхода и метода синтетических сейсмограмм, учеников и сотрудников Б.В. Кострова Г.С. Кушнера, Ф.М. Пручкиной [26], В.Н. Фридмана, разработавшего и реализовавшего экстраполяционный численно-аналитический метод решения задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих в лучевом приближении распространение сейсмических волн в неоднородной изотропной среде [7].

Дифракция и излучение. Под дифракцией в широком смысле обычно понимаются волновые явления, которые не описываются с помощью лучевых представлений или плоских волн. Типичным случаем таких задач является взаимодействие волн с различными препятствиями. Аналитические трудности задач дифракции в теории упругости обусловлены наличием двух типов волн (продольных и поперечных), которые связаны в граничных условиях. Фундаментальные результаты получены сотрудниками отдела волновой динамики Н.В. Зволинским, Г.А. Скуридиным [27], Л.М. Флитманом [45, 47], который впервые решил задачу в плоской постановке для трещины конечной длины [27]. Впоследствии постановка задачи, реализованная Л.М. Флитманом, обобщена на случай трещины, возникающей на границе двух различных, упругих сред: Н.В. Зволинский, Л.М. Флитман, Б.В. Костров и В.А. Афанасьев [12], Л.П. Зайцев, Л.М. Флитман [27], Л.М. Флитман [27], Б.В. Костров, Л.В. Никитин [27]; плоские круговые разрывы и включения Б.В. Костров [27], Б.В. Костров, В.И. Осауленко [24]. В такой постановке размер образующейся трещины или закон ее распространения считаются заданными заранее и, следовательно, условия разрушения и процесс разрушения не рассматриваются. К данному разделу фактически относятся задачи, связанные с излучением волн трещинами, вызываемыми мгновенным нарушением сплошности среды, которые положены в основу современных представлений о механизме очагов землетрясений.

Механика очага землетрясения. Необходимость изучения очагов землетрясений на протяжении многих лет заставляла сейсмологов исследовать эти объекты теми сред-

ствами, которые имелись в то время. Отсутствие строгой теории компенсировалось более или менее явно высказываемыми интуитивными соображениями и произвольно принимаемыми упрощающими предположениями, зачастую противоречащими друг другу. В 1923 г. Накано поставил задачу о нахождении сосредоточенного источника в упругой среде, для которого распределение знаков первых вступлений совпадало бы с распределением знаков, наблюдаемым при землетрясениях. В результате из формулы Лява для смещений, вызываемых сосредоточенной силой, были получены выражения для некоторых типов дипольных источников, использование которых явилось началом количественного изучения очагов землетрясений. Выбор и определение ориентации точечного источника составляют часть задачи, поскольку для получения физических параметров очага необходимо связать характеристики источника с физическими представлениями об очаге.

Использование не вполне строгих утверждений при решении задач привело к тому, что с одной и той же вербальной моделью очага сопоставлялись две взаимно исключающих друг друга точечные модели:

двойная сила с моментом (В.И. Кейлис-Борок [13-15]);

две двойных силы с уравновешенным моментом (А.В. Введенская [4]).

Обе точечные модели объясняют существование нодальных плоскостей для продольных волн, причем одна их плоскостей должна совпадать с плоскостью разрыва в очаге. Однако, излучение источника типа двойного диполя без момента симметрично относительно перестановки нодальных плоскостей, в то время как модель типа двойной силы с моментом такой симметрией не обладает. Невозможность определения плоскости разрыва в рамках первой модели заставила искать иную интерпретацию осей, характеризующих ориентацию источника, которая была рассмотрена в работах (Введенская [3], Введенская, Балакина, Широкова [50]), где ориентация точечного источника, эквивалентного очагу, связывалась не с площадкой разрыва, а с ориентацией осей напряжений, действующих в очаге. Аргументация состояла в том, что излучение каждого элемента разрыва эквивалентно излучению некоторой системы сосредоточенных сил, а всего разрыва – системе сил, «образующих тензор», распределенных на поверхности разрыва. Не уточняя определения, авторы

отождествляли этот тензор с тензором напряжений, вызывающих землетрясение, который, как отмечено Б.В. Костровым [19, 63] является тензором момента эквивалентного источника и характеризует распределение фиктивных сосредоточенных сил, создающих в среде без разрыва такое же упругое поле, какое создает разрыв, тогда как тензор напряжений описывает напряженное состояние, которое среда фактически имела перед образованием разрыва. Несмотря на ошибочность, интерпретация А.В. Введенской не лишена смысла: если предположить, что площадка разрыва совпадает с плоскостью максимального касательного напряжения, то оси, введенные А.В. Введенской, совпадут с главными осями тензора напряжения. Однако если пользоваться теорией прочности Кулона–Мора, то плоскость разрыва, в общем случае, не будет совпадать с плоскостью максимального касательного напряжения, что отмечено в упомянутых выше работах Б.В. Кострова. Дискуссия о точечной модели очага завершилась принятием дислокационной модели. Противоречия, содержащиеся в работе А.В. Введенской, были устранены Б.В. Костровым [19, 63], использовавшим динамический вариант метода функций Грина, ранее разработанный для статических задач в теории дислокаций Вольтерра.

Использование методов функций Грина позволяет получить выражения для элементов упругого поля в любой точке через вектор скачка смещения на разрыве, задаваемый как функция координат точки на разрыве и времени. В результате появились работы, в которых исследовалось поле упругих волн для частных случаев распределения скачка смещения, причем в большинстве случаев модель разрыва задавалась в виде дислокации Вольтерра, когда скачок смещения считается постоянным на некоторой зависящей от времени площадке простой геометрической формы.

А.В.Введенская (1965) рассмотрела задачу о круговой, расширяющейся с постоянной скоростью дислокации; ошибки этой работы исправлены А.Г. Москвиной [30], рассмотревшей в более поздних работах (Москвина [30, 31]) ряд задач, в которых фронт разрыва представлял дугу окружности, расширяющуюся с постоянной скоростью в пределах прямоугольной площадки, при этом вектор скачка на разрыве постоянен. В работе Б.В. Кострова В.И., В.Н. Фридмана [25] рассмотрена направленность нестационарного излучения при разрыве сплошно-

сти упругой среды. Б.В. Костров и Р. Дмовска [70] исследовали задачу о предельном равновесии полуплоскости с произвольно ориентированной внутренней (сдвиговой) трещиной и предложили метод численного решения сингулярных интегральных уравнений, который, минуя регуляризацию, приводит к решению конечной системы алгебраических уравнений.

В этих работах закон распределения скачка смещения на поверхности разрыва задается произвольно, при этом не очевидно, насколько получаемые результаты зависят от выбора той или иной модели.

В рамках модели очага землетрясения, сформулированной Б.В. Костровым, его ученик О.Д. Воевода в общем виде рассмотрел статическую задачу о влиянии заглубленного разрыва на деформированное состояние однородного изотропного полупространства. В дальнейшем О.Д. Воевода и Л.М. Вольнец уточнили задачу для случая полупространства с рельефной граничной поверхностью, показав существенное влияние рельефа на перемещения, деформации и наклоны поверхности полупространства.

Для описания разрыва в очаге землетрясения как трещины необходимо задать распределение напряжения на поверхности разрыва перед его образованием (до момента начала землетрясения), закон взаимодействия берегов разрыва и сформулировать некоторые физические законы, управляющие распространением края разрыва. При этом распределение скачка смещения на разрыве является одной из искомым величин. Если распределение найдено, отыскание других величин сводится к применению метода функций Грина. Следовательно, между представлениями разрыва как трещины и как дислокации с переменным вектором Бюргера (дислокация Сомилиана) нет такой глубокой пропасти, как кажется на первый взгляд. При описании разрыва как трещины задаются физические законы, управляющие разрывом, внешнее воздействие на него (начальные напряжения) и ищется движение разрыва и окружающей его среды, тогда как при описании его как дислокации задается движение берегов разрыва. В настоящее время принято (Костров [17], Костров, Никитин [21]) представлять разрыв как дислокации (задание скачка смещения как функции точки и времени, т.е. траекторий относительного движения всех частиц среды, соседствовавших до возникновения разрыва) **кинематическим описанием**, а

как трещины – **динамическим**. Термины «динамика» и «динамический» имеют два значения – как противоположность кинематике и как противоположность статике. Здесь эти термины употребляются в первом значении). Терминология подчеркивает, что оба способа описания относятся к одному и тому же объекту – разрыву. Вместе с тем ясно, что обойтись только кинематикой разрывов для построения теории очага землетрясения невозможно, так как в этом случае скачок смещения на разрыве не может быть связан с физическими законами образования и распространения разрывов в сплошной среде и физическими условиями, вызывающими появление данного разрыва.

В.И. Кейлис-Борок [60] рассмотрел задачу о сдвиговой дискообразной трещине – разрыв в очаге землетрясения трактуется достаточно схематично, но значение этой работы в развитии теории очагов землетрясений трудно переоценить: введены фундаментальные характеристики разрыва: **снятое напряжение, средняя подвижка и площадь разрыва**, вытеснившие в сейсмологической литературе ранее распространенные понятия **объема очага, средней высвобожденной деформации**, которые невозможно формализовать в рамках модели очага как разрыва.

Для неглубоких землетрясений размеры разрыва определяются по протяженности области афтершоков и геодезическим данным, причем первый метод дает, вероятно, завышенные, а второй – заниженные значения. Третий метод, основанный на стопинг-фазах, применим к землетрясениям, для которых такие фазы обнаружимы на записях, но он также дает заниженные значения размеров. Эти три метода, однако, применимы далеко не ко всем, в особенности глубоким, землетрясениям. Вместе с тем можно считать, что размеры и скорость распространения разрыва должны оказывать существенное влияние на спектральный состав (форму записи) излучаемых из очага сейсмических волн, особенно для той части спектра, где длина волны сравнима с размерами источника. На этом основывается способ оценки размеров разрыва по форме спектра или форме импульса изолированных объемных или поверхностных волн путем сравнения с теоретически рассчитанным спектром или импульсом для той или иной модели разрыва. В качестве теоретических моделей в большинстве случаев использовались распространяющиеся дислокации (Москвина [31],

Богданов, Грайзер [2], Грайзер [6]) (последние две работы выполнены при непосредственном участии Б.В. Кострова, который поставил задачи и консультировал авторов). Получаемые результаты были сомнительны из-за использования частных моделей, очень грубо отражающих процесс в очаге, и было очевидно, что для более реалистической модели могли бы быть получены существенно иные результаты. Необходимо было понять насколько те или иные особенности записи, используемые при интерпретации, зависят от выбора моделей. Сомнения в результатах, предсказываемых простыми дислокационными моделями, привели к появлению работ, в которых рассматриваются задачи для динамически заданных разрывов (трещин).

Первые результаты здесь получены Б.В.Костровым [27, 18], который рассмотрел излучение круговой сдвиговой трещины, распространяющейся с постоянной скоростью. Метод решения не позволял учесть в постановке задачи изменение скорости распространения со временем и остановку трещины. В строгой постановке задача рассмотрена Б.В. Костровым [18] для простейшего случая трещины продольного сдвига, который по признанию автора далек от реальности. В этой работе впервые задача о распространении с переменной скоростью трещины продольного сдвига (антиплоская деформация) решена сведением к решению интегрального уравнения Абея. Позднее в работах (Костров [19], Костров, Осауленко [24]) результаты обобщены на случай трещин отрыва и поперечного сдвига-скола при произвольных, зависящих от времени нагрузках. Как показало время, до сих пор нет никаких оснований на достижение серьезных результатов на пути построения аналитических решений задач подобного типа – после работы Б.В. Кострова [16] не получено новых решений, кроме более подробного исследования частных случаев той же задачи А.М. Молчановым и Л.В. Никитиным [29].

Невозможность получения аналитических решений для задач о трещинах, сколько-нибудь реалистически моделирующих распространение разрыва в очаге землетрясения, привела к поиску методов численного решения этих задач. В первой такой работе Б.С. Парийского, В.П. Радченко, В.И. Кейлис-Борока [37] рассмотрена плоская задача о трещине конечной длины, с поверхности которой во всех точках снимается касательное напряжение, причем не мгно-

венно, а по убывающей в течение короткого времени по некоторому, произвольно выбираемому закону. Решение отыскивалось с применением комбинации метода сеток и метода Фурье: скачок смещения на трещине разыскивается как линейная комбинация ортогональных функций, поле вне трещины отыскивается разностным вариационным методом, а результат формулируется в виде теоретических сейсмограмм объемных волн, на основании вида которых делались сейсмологические выводы. Решение было очень грубым, т.к. мощность ЭВМ не позволяла получить удовлетворительную точность при выбранном методе решения. В работе Б.В. Кострова и Н.В. Шебалина [1] исследованы механизмы очагов предшествующих и повторных толчков в зоне подготовки Дагестанского (14 мая 1970 г.) землетрясения, где показано, что афтершоки разгрузочного типа реально существуют и составляют подавляющее большинство повторных толчков, происходящих вблизи средней части площадки разрыва главного толчка. Ж.Я. Аптекман и В.И. Богданов, используя результаты Б.В. Кострова [19], впервые в отечественной сейсмологии разработали методику определения тензора сейсмического момента по реальным материалам сейсмических наблюдений.

Проведенный выше обзор результатов, полученных, в основном Б.В. Костровым, показывает, что если интуитивные представления об очаге землетрясения как разрыве сплошности (или, по крайней мере, разрушения) материала Земли разделяются всеми авторами работ, посвященных данной проблеме, конкретные модели существенно различаются, а часто противоречат одна другой. Основная причина создавшейся ситуации была ясна – недостаток знаний о закономерностях разрушения твердых тел и основных принципов (аксиом), которые однозначно определяют новую, развивающуюся науку – теорию очага землетрясения.

Осознание и корректное разрешение ситуации – важнейшее достижение отечественной школы сейсмологов-теоретиков, признанным лидером которой был Б.В. Костров. Аксиоматика в явном виде сформулирована в работах Б. В. Кострова [21]:

1. Очаг тектонического землетрясения представляет собой разрыв сплошности материала Земли по некоторой (плоской) площадке.

2. Разрыв возникает под действием (сдвиговых) упругих напряжений, накопленных

в процессе тектонической деформации, и приводит к полному или частичному снятию этих напряжений на площадке разрыва.

3. Разрыв возникает сначала в малой области (точке), а затем распространяется от нее со скоростью, не превосходящей скорости продольных волн (принцип причинности).

4. Соответствующий очагу тектонического землетрясения разрыв является разрывом скольжения, т.е. взаимное перемещение его берегов по нормали к площадке (отрыв) равно нулю.

5. Материал Земли вне поверхности разрыва остается линейно-упругим.

Приведенные аксиомы – определение очага землетрясения, как любое формальное определение является искажением, огрублением, упрощением реальности, но эта аксиоматика позволяет сформулировать точное определение исследуемой научной области, которое можно перевести на количественный язык и в рамках этих аксиом разработать набор моделей, которые обеспечили дальнейший прогресс в развитии теории очага землетрясения. Приведенная аксиоматика минимальна и включает только те предположения, которые необходимо вытекают из анализа области исследований и имеющихся фактических данных. Для построения теории и перевода аксиом на естественнонаучный язык математики следовало уточнить содержание входящих в аксиомы терминов "сплошность", "разрыв", "напряжение", "деформация", "упругость". Для преодоления возникших методологических проблем Б. В. Костров сформулировал феноменологическую теорию деформации и описания разрывов в кинематике сплошной среды. Показано, что для описания материала Земли необходимо рассматривать иерархию моделей материала как сплошной среды, причем выбор той или иной модели зависит от масштаба макроскопического описания и на каждом уровне следует учитывать предыдущую ступень, которая в этом случае выступает как микроскопическая модель материала. При анализе понятия напряжения с той же феноменологической точки зрения вводится иерархия напряжений в материале, являющихся для каждого уровня "макронапряжениями" по отношению к "микронапряжениям" предыдущего уровня описания материала моделью сплошной среды, при этом возможно сформулировать уравнения движения и ввести условие непрерывности вектора напряжения на площадке разрыва. Формулировка аксиоматики и феноме-

нологии исследуемой предметной области явились определяющими для дальнейшего становления теории очагов землетрясений, поскольку позволили перейти к построению математических моделей и численному решению задач, связанных с исследованием различных аспектов физики очагов землетрясений. Дальнейшее уточнение изложенных основ проводилось в рамках тщательного анализа механики хрупкого разрушения [32-35, 72].

К середине 1960-х годов механика хрупкого разрушения, занимавшаяся изучением процессов возникновения разрывов в твердых телах, была достаточно хорошо разработана и, казалось, что она и есть фундамент для построения последовательной теории очагов землетрясений. Однако простой перенос результатов механики разрушения в сейсмологию был невозможен ввиду специфики изучаемых природных процессов. В технических приложениях интересен не процесс катастрофического разрушения, а его предотвращение и поэтому в механике хрупкого разрушения разрабатывалась, в основном, теория критического (равновесного) состояния твердых тел с трещинами. Относительно динамики разрушения – процесса распространения трещины, имелся ограниченный экспериментальный материал, и предпринимались первые попытки решения простейших задач.

Для сейсмологических приложений, в соответствии с природой изучаемых явлений, требовалась разработка теории катастрофического распространения разрывов и, первую очередь, сдвиговых (трещин сдвига). Возникла необходимость в обобщении механики хрупкого разрушения и разработки методов решения динамических задач о распространении трещин сдвига. Ряд задач о динамике сдвиговых трещин – плоские задачи о трещинах, распространяющихся с постоянной скоростью в одну и обе стороны; задача о круговой трещине сдвига решен Б.В. Костровым [17], разработавшим общий метод решения автомодельных задач, где впервые доказано в общем виде, что трещины в упругой среде могут распространяться со скоростью, не превышающей критического значения, лежащего, в зависимости от типа разрушения, между скоростями релеевских и поперечных волн. Доказательство в конечном виде приведено в работах (Костров Никитин [21], Костров, Никитин, Флитман [22, 23], Костров, Осауленко [24]).

Определения хрупкого разрушения на

этом этапе исследований у разных авторов различались: сказывалось влияние технических приложений. Хрупкое разрушение определяли как противоположность вязкому, т.е. как процесс разделения тела на части без сколько-нибудь заметных остаточных деформаций. Такое определение невозможно применить к землетрясениям, происходящим на фоне длительной тектонической деформации, более того, оно описывает скорее результат, чем процесс разрушения. В работах (Костров, Никитин, Флитман [22], Костров, Никитин [27], Костров, Фридман [25]) предложено более адекватное определение, справедливое для тел с любыми реологическими свойствами: хрупкое разрушение определяется как разрушение путем развития трещин. В этих же работах проведено четкое методологическое различие между моделью и критерием разрушения и дан аккуратный вывод локальной формы критерия Гриффитса для тел с любыми реологическими свойствами. Результаты этих работ позволили в рамках механики разрушения рассматривать как объект исследований очаг землетрясения. Однако рассмотрение очага землетрясения в рамках приведенной модели требует, знания распределения начального напряжения и прочностных характеристик среды, для чего и в настоящее время нет достаточных экспериментальных и наблюдательных данных.

Приведенные обстоятельства заставили исследователей искать другие подходы к построению теории очага, базирующиеся на кинематическом описании разрыва. При таком подходе распределение вектора скачка смещения на разрыве задается не априори, а рассматривается как искомый параметр. В работах (Костров [21, 27]) рассмотрена обратная задача для трехмерного случая, а в работе (Костров, Никитин [27]) – соответствующая плоская задача. Обратная задача очага землетрясений – задача о восстановлении движения в очаге по записям сейсмических волн – оказалась аналогичной задаче синтеза антенн, разрешимость которой определяется двумя положениями:

- движение в очаге однозначно определяется полем сейсмических волн (единственность);
- можно построить модель очага как угодно малых размеров, создающую на больших расстояниях поле сейсмических волн, как угодно мало отличающееся от наблюдаемого (неустойчивость).

Этот результат показывает, что решение

обратной задачи без привлечения дополнительной информации, не содержащейся в сейсмических записях, невозможно.

В последнее десятилетие много усилий сейсмологов была затрачена на решение этой задачи (Дас, Костров [51-56], Дас, Суходольц, Костров [59]), но полученные результаты по утверждению Б.В. Кострова, не дают основания для продвижения в исследованиях по теории очагов землетрясений.

Б.В. Костровым показано, что физическая природа процессов в очагах землетрясений наиболее адекватно описывается в рамках динамики разрывов с привлечением механики разрушения.

Осознание изложенных фактов и результаты выполненных исследовательских работ привели к формулировке программы применения механики разрушения к теории очага землетрясений, которая изложена в работе Б.В. Кострова и Л.В. Никитина [21], где впервые кратко и последовательно сформулирован вывод, что:

- катастрофическая разрядка сдвиговых напряжений должна в любом случае происходить путем образования узкой зоны концентрации деформации у некоторой поверхности, которую при макроскопическом описании невозможно отличить от разрыва сплошности среды.

Результаты этих исследований позволили Б.В. Кострову и Л.В. Никитину [21] сделать вывод о зависимости критического напряжения от величины начального дефекта, которая следует из механики разрушения. Эта зависимость – отсутствие характерного для материала предела прочности – позволила объяснить малые значения снимаемых напряжений, полученных при определениях этих параметров для сильных землетрясений, – в дальнейшем это подтверждено независимо другими исследователями.

Последние два десятилетия исследования в области теории очага землетрясений направлены на построение более адекватных изучаемым процессам моделей очагов, в связи с чем появление новых подходов в описании очага позволяет надеяться на получение дополнительной информации об изучаемых природных явлениях – очагах землетрясений. В традиционном подходе к моделированию очага происходящего тектонического землетрясения как разрыва сплошности материала Земли ограничиваются, как правило, рассмотрением разрывов-разрезов с плоской геометрией. Такие модели протяженного очага землетрясения являются крайней степенью

идеализации, и их использование в сейсмологической практике может быть оправдано с позиций эффективного макроописания нарушения сплошности в напряженном материале Земли. Для "гладкого" разрыва скачок напряжений должен быть равен нулю, что и обеспечивает уравновешенность напряжений, вызывающих подвижку. Результаты решения граничных задач для плоских "гладких" разрывов не позволяют даже на качественном уровне описать целый ряд процессов, сопровождающих акт землетрясения, например, короткопериодное очаговое излучение, механизм которого в должной мере не может быть выявлен при использовании плоских "гладких" моделей очага. В таких моделях короткопериодное излучение обычно связывают со скоростью вспарывания разрыва или, более обще, с фронтом вспарывания. Это, прежде всего, относится к плоскому "гладкому" разрыву, односвязному в плане. Попытки описания короткопериодного излучения привели к рассмотрению эффекта многосвязности, учитываемого в модели плоского "гладкого" разрыва сплошности – так называемой "барьерной" модели. Сохранение отдельных участков сплошности, обходимых фронтом вспарывания разрыва, приводит к снижению величины длинноволнового сейсмического момента очага и одновременно к большей насыщенности спектра сейсмической записи на средних и нижних частотах. В дальнейшем, в развитии барьерной модели была предложена "асперити"- модель, которую в общем случае можно определить как "барьерную", допускающую ту или иную очередность в последовательности вспарывания барьеров. В процессе развития такого подхода рассмотрен ряд задач, в которых очаг землетрясения представляет собой разрыв с барьером или по терминологии зарубежных исследователей – "asperity". Решение задачи с одиночным барьером, приведенное в работах (Костров, Дас [51-58]) позволило перейти к задачам со многими барьерами и сформулировать модель, в которой имитируется сцепление шероховатых поверхностей разрыва (Костров, Дас [56-58]). Полученные решения позволили сделать некоторые дополнительные предположения для дальнейшего продвижения в этой области теоретической геофизики. Основные усилия Б.В. Кострова в последнее десятилетие были сосредоточены именно здесь.

Дальнейшее развитие работ в этой области привело к разработке модели, в которой возможен учет "негладкости" поверхности

разрыва выполнили сотрудники Б.В. Кострова В.И. Осауленко и А.Г. Эпштейн [36]. Действительно, из практических соображений можно ожидать, что реальное нарушение сплошности в очаге землетрясения носит объемный характер, заключающийся в образовании узкой по толщине прослойки дробленого субстрата, разделяющей структурно шероховатые несовместимые границы ненарушенного материала Земли. В процессе развития взаимной подвижки шероховатых граничных поверхностей реального очага, разделенных "третьим телом" – дробленным субстратом, отдельные шероховатости-выступы могут вступать либо в непосредственный парный контакт, либо в разнесенный, т.е. через материал "третьего тела". На качественном уровне частичный учет эффекта парного взаимодействия с взаимным срезом выступов-шероховатостей может быть осуществлен в рамках постановки специфической граничной задачи для плоской модели очага происходящего тектонического землетрясения как сдвигового разрыва сплошности в упругой безграничной среде. Для этого достаточно отказаться, в определенном смысле, от условия локальной силовой уравновешенности на отдельных площадках разрыва сплошности. Из решения задачи в такой постановке следует, что субисточник, связанный с эффектом среза выступов порождает в дальней зоне двухполярный уравновешенный импульс смещений в P - и S -волнах и, следовательно, не вносит вклада в определение величины длинноволнового сейсмического момента соответствующего сдвигового разрыва сплошности. Можно ожидать, что именно с действием такого специфического субисточника связано качественно правдоподобное объяснение происхождения короткопериодного очагового излучения, а в случае совокупного действия таких источников их взаимную некогерентность. Преимущественная направленность P -волн, излученных таким субисточником, приуроченная к плоскости, в которой проявляется разрыв сплошности, может оказаться полезной при выделении в эквивалентной точечной модели очага землетрясения нодальной плоскости как плоскости разрыва сплошности.

Интенсивное развитие исследований очагов землетрясений в последние десятилетия, разработка методов определения физических характеристик разрывов в очагах потребовали вместо создания много-

численных частных моделей, зачастую противоречащих одна другой, построения единой системы физических понятий, связанных причинно-следственными и логическими связями и позволяющими охватить все фактические данные об очагах и построить основы физической теории очагов землетрясений. В основу теории положены механика сплошной среды, в частности, механика разрушения твердых тел, методы теории синтеза антенн и выработанные в сейсмологии физические представления о процессах в очагах землетрясений. Основную часть этой работы в мировой сейсмологии выполнил Б.В. Костров [17, 19, 63, 67, 71], который внес неоценимый вклад в разработку одного из основных разделов теории очага – теорию очага происходящего землетрясения, а, именно, механики очага.

Полная теория включает в себя еще два раздела – теорию подготовки землетрясений и теорию остаточных явлений – афтершоки, влияние землетрясений на процесс тектонической деформации и т.п.:

- пресеismicкой;
- главной (разрывной);
- постсейсмической.

В этих разделах, являющихся предметом исследований, связанных с изучением сейсмического режима, прогноза землетрясений, геотектоники, новейшей тектоники и спутниковой геодезии механика разрушения имеет определяющее значение, однако соответствующие разделы ее – длительная прочность, усталость, взаимодействие разрывов – до настоящего времени изучены достаточно слабо. Дальнейший прогресс в исследовании очагов землетрясений по мнению Б.В. Кострова сдерживается отставанием в методах изучения строения Земли, отсутствием прогресса в применении современных технологий спутниковой геодезии и этот прогресс в значительной степени будет зависеть от продвижения исследований в приведенных выше областях науки. К сожалению, Борис Викторович не успел сделать многое из того, что было задумано им во время работы в Институте физики Земли.

Широта и неординарность мышления, взглядов на жизнь и науку были тем фундаментом, на котором расцвел талант выдающегося советского и российского геофизика Бориса Викторовича Кострова. Это был необыкновенно талантливый и щедрый человек, даривший свои многочисленные идеи ученикам и соратникам. Он был удивительно разносторонним, энциклопедически об-

разованным ученым – физиком, механиком, выдающимся специалистом по методам вычислительной математики, глубоким фило-софом, блестящим программистом и лингвистом, в совершенстве знал несколько языков и оставил неизгладимый след в душе каждого

человека, которому посчастливилось жить и работать рядом с ним.

Борис Викторович Костров был ТВОР-ЦОМ. МЫСЛИТЕЛЕМ и именно такие люди всегда были и будут золотым фондом отечественной и мировой науки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аптекман Ж.Я., Костров Б.В., Шеба-лин Н.В. Об афтершоках обратной под-вижки последовательности Дагестанских землетрясений 1970 г. // Тез. симп. по сейсмичности Карпато-Балканского ре-гиона. Кишинев, 1975.
2. Богданов В.И., Грайзер В.М. Определение остаточного смещения «почвы» по сейс-мограмме // Докл. АН СССР. Т. 229, № 1. 1976.
3. Введенская А.В. Исследование зависи-мости смещений в объемных волнах от продолжительности и скорости распро-странения дислокации. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. № 1.
4. Введенская А.В. Определение полей смеще-ния при землетрясениях с помощью теории дислокаций. Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1956. № 3.
5. Введенская А.В. Исследование напряже-ний и разрывов в очагах землетрясе-ний при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969.
6. Грайзер В.М. Расчет поля смещений в эпицентральной зоне землетрясения на основе дислокационной модели // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. № 2.
7. Добровольский И.П., Кушнир Г.С., Фрид-ман В.Н. Теоретическое моделирование сейсмического просвечивания // Моде-лирование предвестников землетрясений. М.: Наука, 1980.
8. Епифанский А.Г. Алгоритм построения точных синтетических сейсмограмм для произвольного дипольного источника // Сб. Применение ЭВМ в сейсмологиче-ской практике. М.: Наука, 1985.
9. Зволинский Н.В. Дисперсия поверхност-ных волн Лява в двухслойной среде // Тр. Ин-та геофиз. АН Груз. ССР. 1958. Т. 17.
10. Зволинский Н.В. Отраженные и головные волны, возникающие на плоской грани-це раздела упругих сред. II // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 1.
11. Зволинский Н.В. Отраженные и головные волны, возникающие на плоской грани-це раздела упругих сред. III // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 2.
12. Зволинский Н.В., Флитман Л.М., Костров Б.В., Афанасьев В.А. Некоторые задачи дифракции упругих волн // Тр. Межд. Симп. Приложения теории функций в механике сплошной среды. Тбил. 1963. М.: Наука, 1965.
13. Кейлис-Борок В.И. К вопросу о связи то-чечных и объемных источников // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз. 1956. № 4.
14. Кейлис-Борок В.И. О динамической ха-рактеристике очага по сейсмическим наблюдениям // Докл. АН СССР. 1950. Т. 70, № 6.
15. Кейлис-Борок В.И. Об исследовании ис-точников, приближенно эквивалентных очагу землетрясения // Тр. Геофиан. 1950. № 9.
16. Костров Б.В. Динамическое распро-странение трещин с переменной скоро-стью // Mechanika zniszczenia: Teoria i zastosowania. Ossolineum, 1976.
17. Костров Б.В. Механика очага тектониче-ского землетрясения. М.: Наука, 1966.
18. Костров Б.В. Неустановившееся распро-странение трещины продольного сдвига // Прикл. мат. мех. 1966. Т. 30, № 6.
19. Костров Б.В. Сейсмический момент, энергия землетрясения и сейсмическое течение горных масс // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 1.
20. Костров Б.В., Епифанский А.Г. Построе-ние точных теоретических сейсмограмм для моделирования волнового поля ло-кального землетрясения // Алгоритмы и практика определения параметров ги-поцентров землетрясений на ЭВМ. М.: Наука, 1983
21. Костров Б.В., Никитин Л.В. Применение методов механики хрупкого разрушения к изучению механизма очага землетрясе-ния // Физические основания поисков методов прогноза землетрясений. М.: Наука, 1970. Тр. ИФЗ АН СССР.
22. Костров Б.В., Никитин Л.В., Флит-ман Л.М. Механика хрупкого разрушения // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1969. № 3.
23. Костров Б.В., Никитин Л.В., Флит-ман Л.М. Распространение трещин в

- упруговязких телах // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 1.
24. *Костров Б.В., Осауленко В.И.* Распространение трещины с произвольной переменной скоростью под действием статических нагрузок // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1974. № 3.
25. *Костров Б.В., Фридман В.Н.* Механика хрупкого разрушения при сжимающих нагрузках // Физика очага землетрясения. М.: Наука, 1975. С.30-44.
26. *Кушнир Г.С., Пручкина Ф.М.* Численное определение лучей и годографов в трехмерных неоднородных средах // Вычисл. сейсмология № 7. М.: Наука, 1974.
27. Механика в СССР за 50 лет. Т. 3 Механика твердого деформируемого тела // Под ред. Л.И. Седова. Наука. Гл. ред. физ. мат. лит. М., 1972.
28. *Михайлова Н.Г., Парийский Б.С.* Расчет теоретических сейсмограмм для простейших случаев строения среды при нормальном падении // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 1.
29. *Молчанов А. Е., Никитин Л. В.* Динамика трещины продольного сдвига после потери устойчивости // Изв. АН СССР, МТТ. 1972. № 2.
30. *Москвина А.Г.* Исследование полей смещения упругих волн в зависимости от характера очага // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1969. № 9.
31. *Москвина А.Г.* К возможности определения некоторых характеристик очага землетрясения по спектрам объемных волн // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1971. № 11.
32. *Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г.* Лабораторные и теоретические исследования процесса подготовки землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 10.
33. *Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г.* Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. М.: Наука, 1975. С.6-29.
34. *Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г.* Физика очага и предвестники землетрясений // Тез. Международ. Симп. по предвестникам землетрясений. Ташкент, 1974.
35. *Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г.* Физические процессы подготовки и развития очага землетрясений // Всесоюз. Симп. по сейсмич. режиму. Кишинев, 1971.
36. *Осауленко В.И., Эпштейн А.Г.* Нетрадиционный подход к построению теоретической модели очага происходящего тектонического землетрясения, качественно учитывающей реальную геометрию взаимодействующих берегов сейсмического разрыва // Отчет о результатах работы ОИФЗ РАН по основным направлениям научной деятельности в 1999 году. М.: ОИФЗ РАН, 2000
37. *Парийский Б. С., Радченко В. П., Кейлис-Борок В. И.* Продольные волны, возникающие при разрыве // Вычислительная сейсмология. Вып. 1. М.: Наука, 1966.
38. *Подъяпольский Г.С.* Коэффициенты преломления и отражения упругих волн на слое // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 4.
39. *Подъяпольский Г.С.* Отражение и преломление на границе двух упругих сред в случае нежесткого контакта // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1963. № 4.
40. *Подъяпольский Г.С.* Приближенное выражение для смещения в окрестности основного фронта в случае малого угла между лучом и границей раздела // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1959. № 12.
41. *Подъяпольский Г.С.* Разложение в лучевой ряд для отраженных и проходящих волн // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1966. № 6.
42. *Скуридин Г.А.* Принцип Дюамеля и асимптотические решения динамических уравнений теории упругости. I // Изв. АН СССР, Сер. геофиз. 1959. № 1.
43. *Скуридин Г.А.* Принцип Дюамеля и асимптотические решения динамических уравнений теории упругости. II // Изв. АН СССР, Сер. геофиз. 1959. № 3.
44. *Скуридин Г.А., Гвоздев А.А.* О краевых условиях для скачков разрывных решений динамических уравнений теории упругости // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 2.
45. *Флитман Л.М.* Волны, вызываемые мгновенным разрывом сплошности упругой среды // Прикл. мат. и мех. 1963. Т. 27, № 4.
46. *Флитман Л.М.* Динамическая задача о штампе на упругой полуплоскости // Прикл. мат. и мех. 1959. Т. 23, № 4.

47. Флитман Л.М. О движении под действием сейсмической волны жесткой массивной полосы, лежащей на упругом полупространстве // Прикл. мат. и мех. 1962. Т. 26, № 6.
48. Чекин Б.С. О спектре волн, отраженных и преломленных на пластине // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 11.
49. Чекин Б.С. Отражение и преломление сейсмических волн на слабой границе раздела // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1959. № 1.
50. Balakina L. M., Shirokova H. I., Vvedenskaja A.V. Study of stresses and ruptures in earthquake foci with the help of dislocations theory. In "A Symposium on earthquake mechanism". Ottawa, 1960.
51. Das S., Kostrov B.V. An Investigation of the Complexity of the Earthquake Source Time Function Using Dynamic Faulting Models // J. Geoph. Res. 1988. V. 93, #B7.
52. Das S., Kostrov B.V. Determination of the polynomial moments of the seismic moment rate density distribution with positivity constraints // Geophys. J. Int. 1997. V. 131.
53. Das S., Kostrov B.V. Diversity of solutions of the problem of earthquake faulting inversion: application to SH waves for the great Macquaire Ridge earthquake // Phys. Earth Plan. Interiors. 1994. V. 85.
54. Das S., Kostrov B.V. Inversion for Seismic Slip Rate History and Distribution With Stabilizing Constraints: Application to the 1986 Andean Islands Earthquake // J. Geophys. Res. 1990. V. 95, #B5,
55. Das S., Kostrov B.V. An elliptical asperity in shear: Fracture process and seismic radiation // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1985. 80, 725-742.
56. Das S., Kostrov B.V. An elliptical asperity on a finite fault: a model for weak earthquakes? // Earthquake source mechanics, ed. by S. Das, J. Boatwright, and C.H. Scholz, AGU Monograph No.37, Washington, D.C. 1986. P.91-96.
57. Das S., Kostrov B.V. Breaking a single asperity: Rupture process and seismic radiation // J. Geophys. Res. 1983. v. 88, pp 4277-4288.
58. Das S., Kostrov B.V. On the numerical boundary integral equation method for three-dimensional dynamic shear crack problem // J. Appl. Mech. 1987. v. 54, pp 99-104.
59. Das. S., Suhadolc P., Kostrov B. V. Realistic inversions to obtain gross properties of the earthquake faulting process // Tectonophys. 1996. V. 261.
60. Keilis-Borok V. I. On estimation of the displacement in an earthquake source and of source dimensions. Ann. Geophys. 1959. V. 12, N 2.
61. Kostrov B.V. An inverse problem for seismic coda // Proc. Of the 17 Ass. Of the ESC. Budapest. 1980.
62. Kostrov B.V. On the crack propagation with variable velocity // Int. J. of Fracture. 1974. v. 2.
63. Kostrov B.V. Seismic moment and energy of earthquakes and seismic flow of rock // Izv. Phys. Solid. Earth. 1974. v. 13, pp 13-21.
64. Kostrov B.V. Self similar problems of propagation of shear cracks // J. Appl. Math. Mech. 1964. v. 28, pp 1077-1087.
65. Kostrov B.V. Unsteady propagation of longitudinal shear cracks // J. Appl. Math. Mech. 1966. v. 30, pp .1241-1248.
66. Kostrov B.V., Das. S. Evaluation of stress and displacement fields due to an elliptical plane shear crack // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1984. v. 78, pp 19-33.
67. Kostrov B.V., Das. S. Principles of earthquake source mechanics, Cambridge University Press, 1988.
68. Kostrov B.V., Nikitin L.V. Some general problems of mechanics of brittle fracture // Arch. Mech. Stosowanej. 1970. No.22.
69. Kostrov B.V., Nikitin L.V., Flitman L.M. The mechanics of brittle fracture // MTT (Eng. transl.) 1969. v. 4. pp 112-125.
70. Kostrov B.V., R. Dmowska. A shearing crack in a semispace under plane strain conditions // Arch. Mech. Stosowanej. 1973. v. 25, p 3.
71. Kostrov W.W., Kunin I.A., Rogula D. Teoria defektow w osrodkach stalych, Ossolimeum, 1973 (Polska Akademia Nauk, Biuro Kadr Naukowych i Spraw Osobowych).
72. Myachkin V.A., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G. Fundamentals of physics of the earthquake focus forerunners // Physics of the earthquake focus. Moscow: Nauka, 1985. Eng. transl. for US Dept. of the Interior and National Science Foundation, by Amer. Publ., New Dehli, 1985.

**СВЕДЕНИЯ
ОБ АВТОРАХ**

КУШНИР Григорий Семенович

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ИФЗ РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10.. E-mail: grig_kush@mail.ru

ОСАУЛЕНКО Виталий Иванович

ведущий научный сотрудник, ИФЗ РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10.. E-mail: grig_kush@mail.ru

**BORIS VICTOROVICH KOSTROV'S
CONTRIBUTIONS TO SEISMOLOGY:
TO THE 75TH ANNIVERSARY
OF THE BIRTHDAY**

**GREGORY S. KUSHNIR,
VITALY I. OSAULENKO**

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia*

Boris Kostrov, an outstanding soviet and russian geophysicist, who worked in the Schmidt Institute of Physics of the Earth during all his life. His great gift and diligence allowed him to become a world-famous

and authoritative scientist very quickly. Further, we describe the main results of the works by Kostrov and his pupils. The level of his results is clearly seen from his invariably high citation index.