

УДК 550.3(092)

**А.В. ВВЕДЕНСКАЯ –
СОЗДАТЕЛЬ
МОДЕЛИ ОЧАГА
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

Л.М. Балакина,
А.Г. Москвина

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

АННОТАЦИЯ Дана краткая научная биография Анны Викторовны Введенской, заложившей основы новой модели очага землетрясения и изучения механизмов землетрясений как нового направления в сейсмологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: очаг землетрясения, поля смещений упругих волн, механизм очага землетрясения, дислокации, сетка Вульфа, поле упругих напряжений.

Анна Викторовна Введенская (в девичестве Черепанова) родилась в г. Иркутске 25 января 1923 г. Отец оставил семью в 1925 г., когда Анне было всего два года. Вместе со старшей сестрой она воспитывалась матерью, которая работала секретарем в различных организациях. Мама Анны Викторовны была очень религиозной женщиной, и это чувство она прививала своим дочерям. В них она воспитывала чувство долга, трудолюбие, настойчивость в доведении начатого дела до конца, честность и порядочность в жизни.

По своему характеру Анна Викторовна была живой, активной, целеустремленной и волевой – лидером среди подруг и сверстников. В 1930 г. она поступила в школу. Училась все годы очень хорошо, любимый предмет – математика. В свободное от уроков время очень увлекалась катаньем на коньках. В 1940 г. Анна окончила школу с отличием и поступила в Иркутский государственный университет на физико-математический факультет. В том же году умерла ее мама. Анна Викторовна продолжала жить со своей старшей сестрой Галиной Викторовной Черепановой, работавшей бухгалтером в Иркутской детской больнице.

1940-е годы теоретическую физику и геофизику в Иркутском университете преподавал доцент Андрей Алексеевич Тресков – человек широко образованный, интересующийся многими вопросами. Он был учеником известного советского физика, впоследствии члена-корреспондента АН СССР, Торчиана Павловича Кравца, который в 1920-е годы преподавал в Иркутском университете и заведовал единственной, расположенной в высокосейсмичной рифтовой зоне Прибайкалья, сейсмической станцией «Иркутск». Т.П. Кравец при-

звлек к сейсмологическим исследованиям А.А. Трескова, для которого работа на станции поначалу была дополнительным увлечением к основной работе в университете, но затем занимала все большее и большее место в жизни. Со временем А.А. Тре-



Анна Викторовна
ВВЕДЕНСКАЯ
(1923–1997)

сков стал ведущим сейсмологом не только в Иркутске, но и во всем бывшем Советском Союзе. Он разработал методику определения эпицентров, не задаваясь величинами скоростей распространения продольных и поперечных волн (метод эпицентральной и гипоцентральной) и метод определения толщины земной коры. А. А. Тресков возглавил исследования в регионе, под его руководством была создана сеть сейсмических станций в Прибайкалье и Якутии. Он создал школу иркутских сейсмологов, для которых всегда оставался старшим товарищем, готовым прийти на помощь в трудную минуту. Существенную поддержку он оказал и Анне Викторовне.

Ввиду жизненных трудностей военного времени Анна Викторовна в 1944 г., еще учась в университете, начала работать преподавателем физики в средней школе № 4, в 1944-1945 гг. она преподавала механику в Иркутском авиационном техникуме, а в 1945-1946 гг. работала ассистентом в Иркутском горно-металлургическом институте.

В 1945 г. Анна Викторовна окончила университет, получив диплом с отличием и право поступить в аспирантуру. После успешной защиты диплома она заказала в храме благодарственный молебен. Из-за этого у нее возникли большие трудности, в том числе с трудоустройством. В этот сложный период Анне Викторовне очень помог А. А. Тресков. Часто бывая в Москве, в Сейсмологическом институте АН СССР (СИАН) и будучи знаком с ведущими сейсмологами института – Евгением Федоровичем Саваренским, Дмитрием Петровичем Кириным, Дмитрием Александровичем Хариним и другими, он сумел организовать направление Анны Викторовны в аспирантуру в СИАН. В начале 1946 г. Анна Викторовна приехала в Москву, выдержала вступительные экзамены и поступила в аспирантуру к доктору физико-математических наук Вячеславу Францевичу Бончковскому, который в то время, после смерти в 1944 г. члена-корреспондента АН СССР Павла Михайловича Никифорова, был директором института.

В те годы Сейсмологический институт был небольшим и располагался в Пыжевском переулке. На первом этаже здания находилась большая аспирантская комната. Иногородние аспиранты жили в общежитии Академии наук СССР на ул. Малая

Бронная. Традиционными работами сейсмологов СИАНа в те годы были: составление годографов сейсмических волн разного типа для сейсмически активных районов, определение координат эпицентров и гипоцентров, составление каталогов и сейсмических бюллетеней, построение карт сейсмичности, т.е. эпицентров землетрясений для различных сейсмоактивных регионов. Классификация землетрясений по магнитуде не производилась, это понятие еще не было внедрено в СИАНе.

Свою научную работу в СИАНе А. В. Введенская также начала с разработки годографов продольных и поперечных волн для района Средней Азии, используя записи сейсмических волн от нескольких крупных землетрясений. Но область ее интересов вскоре расширилась. В аспирантской комнате над кандидатской диссертацией работал Владимир Исаакович Кейлис-Борок, который разрабатывал совершенно новое для института направление – исследование механизмов очагов путем сопоставления зарегистрированных сейсмических волн с волновыми полями от теоретических источников. Анна Викторовна заинтересовалась этими исследованиями и стала сотрудничать с В. И. Кейлис-Бороком.

К началу 1950-х годов в мире исследования механизмов очагов были мало известны. Ими занимались всего несколько человек: П.Байерли (США), Дж.Ходжсон (Канада), А.Ритсема (Индонезия), Х.Хонда (Япония). Толчком к постановке этих исследований стали обнаруженные сейсмологами в начале XX в. различия в направленности излучения продольных волн от землетрясений. При одном и том же событии на одних сейсмических станциях регистрировались волны сжатия, тогда как на других – волны разрежения. Возникла идея попытаться определить направления сил, действующих в очаге землетрясения, по наблюдениям над зарегистрированными смещениями в сейсмических волнах, сопоставляя их с рассчитанными от теоретических источников.

Теория излучения упругих волн простейшими (точечными) силовыми источниками разрабатывалась с середины XIX столетия. В своей знаменитой книге по математической теории упругости Л.Ляв [1935] вывел выражения для поля смещений, вызванных силой, приложенной в некоторой точке однородного упругого пространства. Х.Накано [Nakano, 1923] ввел теорию Лява

в сейсмологию. Он рассчитал поля смещений упругих волн от различных точечных источников в виде комбинации простых сил и разного рода диполей, заложив тем самым основы теории сейсмических источников, которая нашла широкое применение при изучении механизма очага землетрясения.

Один из источников, рассмотренных Х.Накано, представлял собой диполь с моментом. Этот источник П.Байерли, а затем Дж.Ходжсон и А.Ритсема в своих исследованиях приняли в качестве эквивалентного очагу землетрясения. Поле смещений продольных волн от этого источника имеет квадрантное распределение: области волн сжатия и разрежения разделяются двумя нодальными плоскостями (плоскостями, на которых величины смещений равны нулю), одна из которых совпадает с плоскостью диполя, другая – ей ортогональна. Приняв диполь с моментом как эквивалент очага землетрясения, они трактовали плоскость действия диполя как плоскость разрыва в очаге, а направления сил в диполе – как направления смещения сторон разрыва. При определении механизмов очагов П.Байерли, Дж.Ходжсон и А.Ритсема по распределению наблюдаемых на сейсмических станциях волн сжатия и разрежения устанавливали положение нодальных плоскостей. Последние рассматривались как две равновероятные плоскости разрыва в очаге, поскольку использование данных только о знаках вступления продольных волн не давало возможности отличить плоскость действия диполя от ортогональной к ней нодальной плоскости.

Японский ученый Х.Хонда с 1930-х годов основывал исследование механизмов очагов на сопоставлении наблюдаемых смещений объемных волн со смещениями от сферических источников, рассчитанными Х.Кавасуми [Kawasumi, 1937]. В этих источниках на поверхности сферы задавалось распределение сил, выражающееся различными функциями. Работы Х.Хонда не были хорошо известны в СИАНе, так как публиковались в основном на японском языке. В.И. Кейлис-Борок рассмотрел группу точечных силовых источников в виде различных комбинаций простых сил и диполей. Каждому из этих источников он приписал (без математических доказательств) определенные деформации в очаге землетрясения. Вслед за П.Байерли он принял, что площадке сдвига в очаге соответствует ди-

поль с моментом. Но в отличие от подхода П.Байерли, В.И. Кейлис-Борок разработал специальную методику определения механизма очага, основанную на сопоставлении наблюдаемых и теоретических отношений смещений в продольных и поперечных волнах. Поскольку излучение поперечных волн для дипольного источника асимметрично относительно нодальных плоскостей продольных волн, то привлечение их позволяло однозначно устанавливать плоскость действия диполя, которая и принималась за плоскость разрыва в очаге. Определения производились по малому числу сейсмических станций.

Внедрение В.И. Кейлис-Бороком исследований механизмов очагов было несомненным прогрессивным шагом в развитии сейсмологических исследований. Анна Викторовна при подготовке кандидатской диссертации, помимо построения годографов, провела по методике В.И. Кейлис-Борока исследование механизмов очагов четырех крупнейших среднеазиатских землетрясений, происшедших в период сейсмогенной активизации района: Гармского 1941 г., Чаткальского 1946 г., Казанджикского 1946 г., Ашхабадского 1948 г. В диссертации рассмотрены вопросы, связанные с излучением упругих волн от различных точечных источников, влиянием неоднородностей строения Земли и сейсмических границ на регистрируемые смещения сейсмических волн; подробно рассмотрена процедура определения механизма очага для каждого из исследованных землетрясений. В работе проводилась проверка, какому из силовых точечных источников наиболее соответствуют наблюдаемые смещения в продольных и поперечных волнах четырех исследованных землетрясений. Заключение было сделано в пользу диполя с моментом. По ориентации плоскости диполя установлены ориентация и тип разрыва в каждом из исследованных очагов. В конце 1950 г. Анна Викторовна успешно защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Во время учебы в аспирантуре Анна Викторовна тяжело заболела туберкулезом с поражением обоих легких, заразившись от одной из аспиранток, которая болела открытой формой туберкулеза. Вместе с ней Анна Викторовна работала в аспирантской комнате и жила в одной комнате в общежитии. Анна Викторовна, будучи человеком

очень волевым, организованным и целеустремленным, принимала все необходимые меры для излечения и в конце концов сумела преодолеть болезнь, так что была снята с учета в туберкулезном диспансере. Правда, на это ушло более 10 лет.

Среди молодежи института Анна Викторовна была одной из самых очаровательных девушек. В 1947 г. на одном из институтских вечеров она познакомилась с Валентином Александровичем Введенским, братом ведущего сейсмолога института Надежды Александровны Введенской. Вскоре после знакомства они поженились. По желанию Анны Викторовны их брак был закреплен венчанием в церкви, однако из-за ареста мужа их совместная жизнь была недолгой. Валентин Александрович окончил механико-математический факультет Московского университета и был направлен в учреждение, связанное с авиацией. В 1949 г. он вместе с группой работавших с ним сотрудников был арестован и осужден на длительный срок. В 1956 г. В. А. Введенский был освобожден и реабилитирован.

Все это время Анна Викторовна снимала “угол” в коммунальной квартире, в комнате у одинокой пожилой женщины, с которой у нее сложились добрые отношения, продолжавшиеся и впоследствии. С жильем в Москве было очень тяжело. Изредка институт получал квартиры для своих сотрудников, но нуждающихся было много. Несколько квартир институту выделили в 1958 г., в одной из них наряду с еще четырьмя сотрудниками получила комнату и Анна Викторовна. В этой коммунальной квартире Анна Викторовна вместе с мужем прожила до 1967 г. В это время институт получил еще несколько квартир, одну из которых дирекция института предложила Анне Викторовне. Однако будучи человеком исключительной щепетильности, она отказалась, мотивируя свой отказ тем, что список очередников велик и в нем много тех, чья зарплата значительно меньше, чем у нее, а нужда в площади больше, так как в семьях растут ребяташки. В собственную двухкомнатную небольшую квартиру, купленную в кооперативном доме, Введенские переехали только тогда, когда Анне Викторовне было уже 45 лет.

К этому времени А. В. Введенская становится сейсмологом, известным не только в Советском Союзе, но и за рубежом. Одна-

ко путь к этому был нелегким. После окончания аспирантуры решением Президиума АН СССР Анна Викторовна была направлена в распоряжение Геофизического института АН СССР (ГЕОФИАН, бывший СИАН), а с 1 декабря 1950 г. после защиты кандидатской диссертации была зачислена в штат института, в отдел геодинамики. С 1 сентября 1951 г. она перешла в отдел сейсмологии и сейсмической службы, которым руководил доктор физико-математических наук, впоследствии член-корреспондент АН СССР Евгений Федорович Саваренский. В этом отделе, ставшим впоследствии лабораторией общей сейсмологии, она оставалась до конца своей работы в институте. Переход в отдел сейсмологии в значительной степени определялся тем, что еще во время учебы в аспирантуре Евгений Федорович проявлял большой интерес к ее работе и наряду с В. Ф. Бончковским был официальным научным руководителем ее кандидатской диссертации.

В отделе сейсмологии А. В. Введенская сосредоточилась на разработке теоретической модели очага, более адекватной реальному очагу землетрясения, чем точечные источники. Она исходила из представления, что наиболее вероятным процессом в очаге землетрясения является образование разрыва со смещением граней в его плоскости. Для расчета полей смещений объемных волн от разрыва она обратилась к теории дислокаций.

Понятие «дислокация», первоначально под термином «искривление» (*distorsion*), было введено В. Вольтерра [Volterra, 1907]. Вначале теория дислокаций использовалась для объяснения существования и развития дефектов в кристаллах и лишь потом была перенесена на твердые, сплошные тела. В континуальных средах дислокация может быть имитирована разрезом, сопровождающимся смещением граней его в противоположных направлениях и последующим склеиванием сторон. Восстановление сплошности среды приводит к тому, что образуется новое однородное сплошное тело, подчиняющееся уравнениям равновесия сплошной среды. Особенность такого тела заключается в том, что даже при отсутствии внешних сил оно будет находиться в состоянии напряжения и создавать статическое поле смещений в окружающей среде, которое, как показал В. Вольтерра, тождественно (если описывать его в терминах

теории упругости) полю, возбуждаемому системой взаимно уравновешенных сил. Эта система сил в пределах каждой элементарной площадки образует симметричный тензор второго ранга. Отнесенная к главным направлениям тензора, она может быть представлена двумя равными по величине перпендикулярными двойными силами без момента (силами сжатия и растяжения), ориентированными под углом 45° к площадке разрыва, или двумя взаимно уравновешенными диполями, образующими систему с нулевым результирующим моментом.

Динамический вариант дислокационной задачи попытался решить Ф.Набарро [Nabarro, 1951]. По аналогии с тем, что действие статической дислокации может быть заменено воздействием квадрупольного источника, Ф.Набарро предположил, что и динамическая дислокация может рассматриваться как внезапно возникающий двойной диполь. На основе этого им были получены выражения для поля смещений упругих волн от внезапно возникающей элементарной дислокации. А. В. Введенская приняла дислокационный источник конечного размера как возможный аналог очага землетрясения. Физически такой источник мыслился как мгновенный сдвиг по заданной площадке, математически – как мгновенное включение на этой площадке равномерно распределенных точечных квадрупольных источников. Уязвимость такого подхода обусловлена тем, что решение Ф.Набарро было основано на математически не обоснованном предположении. Однако в позднейших работах, выполненных Дж.Стэкетти [Steketee, 1958] и рядом других ученых, было доказано, что динамическая дислокация, как и статическая, тождественна квадрупольному источнику, а конечная дислокация может быть представлена совокупностью источников, распределенных по плоскости скольжения. Следовательно, результирующее смещение может быть получено путем суммирования смещений от отдельных элементарных дислокаций. При разработке новой теоретической модели очага А. В. Введенскую поддерживали Е. Ф. Саваренский и руководитель отдела математической геофизики доктор физико-математических наук Никита Вячеславович Зволинский.

Первая статья А. В. Введенской, посвященная определению полей смещений

продольных и поперечных волн, вызванных внезапным возникновением дислокации конечного размера, была опубликована в 1956 г. [Введенская, 1956]. В статье рассмотрена площадка сдвига круговой формы в однородном упругом изотропном пространстве, вектор подвижки лежит в плоскости площадки. Для получения выражений поля смещений, вызванных возникновением дислокации конечного размера, уравнения, полученные Ф.Набарро для внезапно возникающей и затем непрерывно сохраняющейся элементарной дислокации, были проинтегрированы по ограниченной плоской области, совпадающей с поверхностью скольжения. Для упрощения процедуры интегрирования форма площадки скольжения была выбрана в виде круга. Произведенные расчеты показали, что по направленности излучения продольных волн источники в виде диполя с моментом и двух ортогональных уравновешенных диполей неразличимы. Поле смещений продольных волн от дислокационной площадки сдвига, так же как и от источников в виде диполя с моментом, имеет квадрантное распределение. Области волн сжатия и разрежения разделяются двумя nodальными плоскостями, одна из которых совпадает с площадкой сдвига, другая ортогональна к ней. Однако по направленности излучения поперечных волн площадка сдвига и диполь с моментом существенно различаются. В статье подчеркивалась также необоснованность моделирования площадки сдвига силовым источником в виде диполя с моментом.

Работа А. В. Введенской показала, что существуют разные представления о теоретических источниках, эквивалентных очагам реальных землетрясений. Заключение о несоответствии силового источника в виде диполя с моментом площадке сдвига привело к открытой конфронтации Анны Викторовны с В. И. Кейлис-Бороком, поскольку ставило под сомнение все результаты интерпретации механизмов очагов, полученные по разработанной им методике. Обсуждение работы А. В. Введенской на семинарах и Ученом совете института проходило в условиях жесточайшей дискуссии. Это требовало от А. В. Введенской большого мужества, так как она в то время была еще только молодым специалистом, а В. И. Кейлис-Борок – признанным авторитетом в области сейсмологии.

В 1957 г. В.И. Кейлис-Борок в книге «Исследование механизма землетрясений» [Гоцадзе и др., 1957] опубликовал свое заключение о несостоятельности теоретической модели очага землетрясений, предложенной А.В. Введенской. Он считал, что силовой источник в виде двух ортогональных диполей с нулевым суммарным моментом (равно, как и двух двойных сил сжатия и растяжения) соответствует не возникающей в среде площадке сдвига, а двум одновременно происходящим подвижкам: отрыву по одной из биссекторных к диполям плоскости и сжатию – по другой. Ошибочность этого заключения стала ясной впоследствии.

В статье «О смещениях на поверхности разрыва, сопровождающегося скольжением» [Введенская, 1958] Анна Викторовна доказывает, что поле смещений, полученное при помощи теории дислокаций, действительно описывает разрыв смещений в упругой среде вдоль ограниченной площадки. В статье также сделано заключение, что если в пределах ограниченной площадки равномерно распределена двойная сила с моментом, то в источнике возмущений под действием этой силы возникает дополнительное вращение поверхности скольжения относительно оси, вдоль которой направлен момент двойной силы.

В следующей работе «О поле смещений при разрывах сплошности упругой среды» [Введенская, 1959] сделана попытка, используя результаты теории дислокаций в работах В.Вольтерра и Ф.Набарро [Volterra, 1907; Nabarro, 1957], построить динамическое поле смещений продольных и поперечных волн при мгновенно возникающем нарушении сплошности среды с более сложным заданием перемещений граней разрыва, включающих относительный перенос граней в плоскости разрыва и их вращение друг относительно друга.

Возникшая дискуссия вокруг силового источника, эквивалентного очагу землетрясения, привлекла внимание сейсмологов ГЕОФИАНа к проводимым в Японии работам по исследованию очагов землетрясений. Представляло интерес выяснить, какому из двух точечных источников – диполю с моментом или двум взаимно уравновешенным диполям – соответствует сферический источник, используемый Х.Хонда при определении механизмов очагов.

В 1956 г. Е.Ф. Саваренский привез из Японии фотокопию большой работы Х.Хонда по исследованию механизмов очагов на японском языке. Е.Ф. Саваренский и А.В. Введенская организовали перевод этой работы. Им занимались отставной военный, который знал японский язык, но совершенно не имел представлений о сейсмологии, и Л.М. Балакина, которая после окончания физфака МГУ с конца 1954 г. начала работать в институте под руководством А.В. Введенской. Общими усилиями перевод работы Х.Хонда был сделан. Выяснилось, что используемый японскими сейсмологами источник представляет собой сферу, на поверхности которой силы распределены таким образом, что в двух противоположных квадрантах сферы действуют силы сжатия, а в двух других – силы растяжения. По направленности излучения продольных и поперечных волн сферический источник соответствует комбинации двух ортогональных диполей.

В конце 1950-х годов в Оттаве (Канада) состоялся специальный симпозиум по механике разломов, на котором обсуждались разногласия по вопросу силовой модели, эквивалентной очагу землетрясения. При обсуждении этого вопроса японские сейсмологи подтвердили, что используемый ими сферический силовой источник эквивалентен двойному диполю с нулевым суммарным моментом. Идентичность полей смещений продольных и поперечных волн, создаваемое этими источниками, позволила объединить их в одну группу под общим названием «источник типа II». В сейсмологической литературе эта модель получила название «квадрупольный источник», если имелся в виду его точечный силовой аналог, или «модель Хонда–Введенской», если в модель вкладывалось физическое содержание. Работа Х.Хонда, содержащая описание используемого теоретического источника, методику исследования с его помощью очагов землетрясений и результаты соответствующих исследований поверхностных и глубоких землетрясений Японии, была опубликована отдельной книгой [Honda, 1962].

К 1960-м годам дискуссия о выборе теоретического источника, адекватного очагу землетрясения, была завершена. Длительность ее в большой степени может быть объяснена тем, что силовые источники в виде диполя с моментом и двух уравнове-

шенных диполей имеют одинаковое азимутальное распределение знаков смещений в продольных волнах – волны сжатия и разрежения разделяются двумя ортогональными нодальными плоскостями и диаграммы направленности излучения их идентичны. По этой причине данные о продольных волнах не могли служить критерием правильности выбора источника. Ответ могли дать поперечные волны, поскольку диаграммы направленности их излучения для конкурирующих моделей очага различны и соответствующие нодальные поверхности имеют разную форму. Сейсмологи разных стран в конце 1950-х годов предпринимали попытки, используя наблюдательные данные о поперечных волнах, найти доказательства соответствия реальному очагу землетрясения силового источника в виде одного диполя с моментом или двух уравновешенных диполей. Однако эти попытки не дали убедительных результатов из-за сложности надежного выделения поперечных волн на сейсмограммах.

Продолжая работы в области изучения механизмов очагов землетрясений, А. В. Введенская перешла к исследованию более сложных дислокационных источников. Если в работах 1956-1959 гг. рассматривалось поле смещений в упругой среде при мгновенной дислокации в пределах конечной плоской площадки, то в работе «Исследование зависимости смещений в объемных волнах от продолжительности и скорости распространения дислокации» [Введенская, 1965] определялись импульсы продольных и поперечных волн в упругой среде, которые возникают от следующего источника: в начальный момент существует статическая дислокация в форме круга заданного радиуса с центром в начале координат со смещением (вектором Бюргерса) вдоль одной из осей координат. От начального момента поверхность дислокации начинает расширяться, сохраняя форму круга. Фронт дислокации в каждый момент времени представляет собой окружность, радиус которой увеличивается с заданной скоростью в течение некоторого времени. Смещение в любой точке фронта происходит в одном и том же направлении и на одну и ту же величину, т.е. подвижка в очаге описывается дислокацией В.Вольтерра. Поскольку волны таким источником излучаются только в момент возникновения дефекта, то в каждый момент времени их излучают толь-

ко те точки, которые находятся на фронте дислокации. Как и в предыдущих работах, в качестве подынтегральной функции было использовано выражение Ф.Набарро для смещений при мгновенно возникающей элементарной дислокации, которое затем было дважды проинтегрировано по площади и времени. Результат оказался неоспорным. Правильное решение было получено А. Г. Москвиной, работавшей под руководством А. В. Введенской и занимавшейся исследованием полей смещений в объемных волнах от источников в виде расширяющихся площадок сдвига разной формы – как осесимметричных, круговых, так и источников, моделирующих однонаправленные либо двунаправленные разрывы [Москвина, 1969 а,б].

Со второй половины 1960-х годов в разных странах мира резко возросло число работ, посвященных исследованию теоретических источников в виде площадок сдвига разной формы и разного вида временных функций нарастания смещений в точках площадки разрыва. Это работы Л.Кнопфа, Н.Хаскела, Дж.Эшелби, Дж.Бруна, Р.Барриджа, Дж.Стэкетти, Дж.Виртмана, Дж.Сэвиджа, Т.Маруяма, А.Бен-Менахема, Р.Мадарьяга и др. В большей части работ в качестве теоретических моделей использовались распространяющиеся дислокации. В некоторых работах рассматривались задачи для динамически заданных разрывов. Однако эти задачи не имели аналитического решения.

В нашей стране к исследованиям теоретической модели очага землетрясения подключился Борис Викторович Костров. Он был приглашен Н. В. Зволинским из Ялты, где заведовал сейсмической станцией, в аспирантуру Института физики Земли АН СССР, образованного в 1956 г. после реорганизации Геофизического института. Первые результаты были опубликованы Б. В. Костровым в 1964-1966 гг. В них рассматривалась трещина в форме круга, распространяющаяся с постоянной скоростью. Итоговые результаты его исследований позже были опубликованы в монографии «Механика очага тектонического землетрясения» [Костров, 1975]. В теоретических исследованиях задач о разрывах участвовал также Л. В. Никитин, а затем В. И. Осауленко – сотрудник Б. В. Кострова.

К этому времени авторитет А. В. Введенской как главного специалиста в области

исследования механизмов очагов землетрясений поднялся в институте очень высоко. Ее доклад был заслушан и получил одобрение на заседании Президиума АН СССР. Критические нападки со стороны школы В.И. Кейлиса-Борока отпали. Анна Викторовна одержала победу в этом научном споре, но жесткие дискуссии, проходившие во второй половине 1950-х – начале 1960-х годов по отстаиванию новой теоретической модели очага, не прошли для нее бесследно. К середине 1960-х годов у нее обнаружился сахарный диабет в тяжелой инсулинозависимой форме. Ее здоровье резко ухудшилось. Правильное лечение было подобрано не сразу. Но в конечном счете, будучи человеком очень мужественным и организованным, она сумела наладить жизнь, не снижая своей работоспособности в научных исследованиях еще многие годы.

Одновременно с разработкой новой теоретической модели очага землетрясения А.В. Введенская начала вести обработку сейсмограмм с помощью этой модели. Она предложила для определения механизмов очагов использовать один из типов азимутальных картографических проекций – стереографическую проекцию (сетку Вульфа) [Введенская, 1953]. До этого при определении ориентации силового источника сейсмологами за рубежом использовались очень трудоемкие процедуры. В работах П.Байерли и Дж.Ходжсона нодальные плоскости проектировались на планшет в виде пересекающихся кругов разного диаметра, который зависел от ориентации источника по отношению к горизонту. Нанесение на такую проекцию наблюдающих станций и определение по ней ориентации нодальных плоскостей было неудобным. Японские сейсмологи использовали только данные близких станций и всю обработку производили на географической карте. На нее наносились векторы смещений продольных и поперечных волн, наблюдаемых на сейсмических станциях. Производился постепенный подбор ориентации сферического источника в географической системе координат, при которой теоретически рассчитанные векторы смещений продольных и поперечных волн наилучшим образом соответствовали наблюдаемым. Внедрение стереографической проекции в обработку механизмов очагов значительно упростило процедуру определения их параметров. На использование различного типа азимуталь-

ных проекций (стереографической, равнопромежуточной или равноплощадной) перешли все сейсмологи, занимающиеся изучением механизмов очагов землетрясений, в том числе и сейсмологи Японии.

Основным исходным материалом при определении механизмов очагов было распределение по азимутам и эпицентральному расстояниям знаков смещений в продольных волнах. Дополнительно привлекались данные об амплитудах смещений в продольных и поперечных волнах. Это поставило вопрос о необходимости учета влияния на амплитуды смещений строения Земли. В 1957-1959 гг. А.В. Введенская совместно с Л.М. Балакиной была предпринята попытка выяснения этого вопроса [Введенская, Балакина, 1957, 1959]. Материалом для исследования послужили сейсмограммы 18 коровых землетрясений из различных районов мира. Измерялись амплитуды смещений в продольных волнах и компонентах поперечной волны, поляризованных в плоскости луча и нормальной к ней. В замеренные амплитуды смещений вводились поправки, учитывающие влияние земной поверхности и характеристики регистрирующих приборов. Вычислялись отношения смещений в продольных волнах к компонентам поперечных волн, поляризованных перпендикулярно плоскости луча, а также отношений в компонентах поперечных волн, поляризованных в плоскости луча и нормально к ней. Наблюдаемые отношения смещений сопоставлялись с теоретически рассчитанными для случая упругой изотропной среды.

Полученные результаты показали, что на эпицентральных расстояниях 18–20°, 35–45°, 52–55°, 68–72° и около 80° наблюдается резкое возрастание полученных величин. Выделенным эпицентральному расстояниям соответствуют глубины проникновения сейсмических лучей приблизительно 250–500, 900–1000, 1200–1300, 1800 и около 2000 км. Обнаруженные особенности авторы [Введенская, Балакина, 1957, 1959] объясняли наличием анизотропии среды на соответствующих глубинах в мантии, на границах разделов, обнаруженных ранее в работе Б.Гутенберга, Ч.Рихтера [Gutenberg, Richter, 1935]. Полученные результаты авторы рассматривали как предварительные, учитывая относительно небольшое число наблюдений и упрощенную процедуру обработки. Однако последующие исследова-

ния сейсмологов из разных стран, выполненных более совершенными методами, подтвердили их выводы.

Помимо исследования неоднородности строения мантии А. В. Введенская с коллегами предприняла попытку изучения внешней границы земного ядра, используя амплитудные и фазовые спектры падающих на ядро и отраженных от него поперечных волн. Записи подбирались с таким расчетом, чтобы их компоненты, поляризованные в плоскости луча и перпендикулярно к ней, были записаны раздельно на горизонтальных сейсмографах. Это позволяло провести анализ спектров падающих и отраженных от ядра поперечных волн, поляризованных в горизонтальной и вертикальной плоскостях. С помощью спектров определялась зависимость от частоты коэффициентов отражения и фазовых сдвигов, возникающих при отражении от границы ядра. Экспериментальные зависимости сопоставлялись с теоретическими, рассчитанными для случая границы между упругой и упруго-вязкой средами. Оценки свойств ядра, полученные по данным о коэффициентах отражения и по величинам фазовых сдвигов, оказались несогласующимися, что, по-видимому, свидетельствует о том, что реальные условия отражения сейсмической волны на границе ядра отличаются от условий отражения на границе, принятых при расчетах идеальных сред. Эти исследования были проведены в начале 1960-х годов, когда работы, посвященные изучению внешней границы земного ядра, были очень немногочисленными и, несмотря на неоднозначность результатов, вызвали интерес.

Выявленные неоднородности строения мантии показали, что использование амплитуд, а также векторов смещений поперечных волн может привести к ошибкам в оценке параметров механизмов очагов землетрясений. А. В. Введенской было принято решение использовать не величины смещений, а только знаки в продольных волнах и компонентах смещений поперечных волн, поляризованных в плоскости луча и нормально к ней. Для последних были рассчитаны специальные палетки с соответствующими нодальными линиями в стереографической проекции при разном задании ориентации силового источника. Использование таких палеток значительно облегчало уточнение механизмов очагов с помощью поперечных волн.

На основе разработанной А. В. Введенской методики начались работы по определению параметров механизмов очагов землетрясений из различных геологических районов. Первым сотрудником, приступившим к этой работе под руководством А. В. Введенской, была Людмила Михайловна Балакина. Объектом ее исследований были сильные землетрясения с различной глубиной очагов в Курило-Камчатской островной дуге. Первые результаты исследования [Балакина, 1959, 1962] выявили закономерную ориентацию напряжений сжатия в очагах землетрясений – субгоризонтальную и перпендикулярную к простиранию островной дуги. Плоскости разрывов в очагах курило-камчатских землетрясений оказались ориентированными преимущественно вдоль простирания островодужных структур. Аналогичная закономерность была ранее установлена Х. Хонда для землетрясений Японии.

После получения этих результатов, имевших понятный геофизический смысл, А. В. Введенская поставила задачу провести исследования сильных землетрясений для всех основных сейсмических поясов Земли: Тихоокеанского, охватывающего окраинную зону Тихого океана, в которую входили островные дуги его северной и западной частей и побережья Северной, Центральной и Южной Америки; Азиатско-Средиземноморского, протягивающегося от западной окраины Средиземного моря через горные системы Средней и Центральной Азии на восток, включая Зондские острова в Индийском океане; в отдельный пояс были выделены зоны рифтовых структур в глобальных срединно-океанических хребтах, вместе с которыми исследовалась рифтовая зона Прибайкалья.

К работе по исследованию механизмов очагов присоединилась Елена Ивановна Широкова. Первые результаты, полученные ею для землетрясений Средней Азии и Кавказа, показали, что преимущественная ориентация напряжений в очагах землетрясений из этих районов близка к той, которая наблюдалась в районе северо-западной части Тихого океана [Широкова, 1961, 1962].

Исследования землетрясений из рифтовой зоны Прибайкалья А. В. Введенская начала вместе с Л. М. Балакиной. Позднее к этим исследованиям, а также к исследованиям землетрясений из районов срединно-

океанических хребтов присоединилась сейсмолог из Института земной коры СО АН СССР в Иркутске Лариса Александровна Мишарина. Частично в них принимала участие заведующая сейсмической станцией “Пулково” Альбина Петровна Лазарева. Исследования показали, что, в отличие от районов Кавказа, Средней Азии и Курило-Камчатской дуги, в рифтовой зоне Прибайкалья и срединно-океанических хребтов субгоризонтально и перпендикулярно простираению структур ориентировано напряжение растяжения.

Результаты исследования механизмов очагов, выполненные по методике А. В. Введенской, показали ошибочность выводов, полученных в работах, основанных на методике В. И. Кейлис-Борока, а также П. Байерли и Дж. Ходжсона. Так, определение механизмов очагов по методике В. И. Кейлис-Борока привело к заключению, что разрывы в очагах землетрясений ориентированы не вдоль, а вкрест простираения геологических структур. Этот вывод был опубликован в работах, посвященных районам Средней Азии и Курило-Камчатской островной дуги. На этом основании отрицалась связь очагов землетрясений с активными геологическими разрывами. В работах П. Байерли и Дж. Ходжсона определение механизмов очагов производилось по недостаточному количеству данных о знаках смещений в продольных волнах и преимущественно на удаленных сейсмических станциях. Из-за этого точность определения механизмов очагов была невысокой. Она приводила к тому, что для большинства землетрясений возможные плоскости разрыва имели субвертикальную ориентацию и преимущественно сдвиговую подвижку. Такой тип механизмов очагов был определен и для землетрясений из окраинной зоны Тихого океана. На их основе была выдвинута гипотеза о вращении дна Тихого океана против часовой стрелки.

К концу 1950-х – началу 1960-х годов А. В. Введенская сумела сплотить вокруг себя небольшую группу сейсмологов. Это не была официальная лаборатория – Анне Викторовне был совершенно несвойствен карьеризм, к тому же, учитывая свое слабое здоровье, она боялась распылять свои силы и отвлекаться от того, что составляло главную цель в жизни, своего детища – исследования механизмов очагов земле-

трясений, а позже – попытки осмысления не просто механики, а физики очагового процесса. Группа А. В. Введенской была коллективом единомышленников, разделявших ее взгляды и ведущих целенаправленное исследование механизмов очагов землетрясений. Обязательным при этих исследованиях был анализ сейсмограмм, которые запрашивались со станций не только бывшего Советского Союза, но и зарубежных стран, что позволяло получать более полные и более надежные данные наблюдений. Не удалось использовать сейсмограммы только при исследовании землетрясений из срединно-океанических хребтов Индийского и Атлантического океанов, поэтому точность определения механизмов очагов землетрясений из этих районов оказалась невысокой.

В начале 1960-х годов А. В. Введенская совместно с чехословацким сейсмологом Либушей Рупрехтовой провела исследование механизмов очагов крупных промежуточных (глубины гипоцентров 100–150 км) землетрясений из района Вранча в изгибе Карпатской дуги. Полученная ориентация сжимающих напряжений (субгоризонтально и вкрест изгиба Карпатской дуги) позволила сделать вывод, что на глубинах 100–150 км действуют те же силы, которые определили рельеф и тектонику района.

Результаты всех проведенных исследований позволили составить ясную сводную картину особенностей ориентации напряжений и разрывов в очагах землетрясений основных сейсмических поясов земного шара. На их основе была составлена карта-схема, отражающая характеристики поля напряжений соответствующих районов, впервые опубликованная в работе [Балакина и др., 1967]. Позже А. В. Введенская соавторами – Л. М. Балакиной, Н. В. Голубевой, Л. И. Мишариной и Е. И. Широковой – опубликовала монографию «Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений» [Балакина и др., 1972]. В монографии дано обоснование теоретической модели очага, подробное описание процедуры обработки данных и определения по ним механизмов очагов как по близким, так и по удаленным станциям. В работе приведены также палетки нодальных линий поперечных волн, поляризованных в плоскости луча и нормально к ней; подробно рассмотрены примеры исследования механизмов очагов и соответствия

их параметров геологическим данным, а также остаточным сейсмодислокациям для нескольких сильнейших землетрясений. Авторами даны критический разбор определений механизмов очагов, полученных другими авторами, а также характеристика поля напряжений Земли в основных сейсмических поясах.

Результаты этих работ вызвали большой интерес у геологов и приобрели широкую известность. В них просматривалась физически понятная взаимосвязь сейсмических и геологических параметров. Работы А. В. Введенской и ее сотрудников неоднократно докладывались на многочисленных сейсмогеологических совещаниях и конференциях, как общесоюзных, так и международных. Опубликование монографии 1972 г. с подробным описанием процедуры определения механизмов очагов помогло сейсмологам из разных сейсмологических, геофизических и геологических институтов включиться в исследования механизмов очагов землетрясений в их районах: в Средней Азии – О. В. Соболева, И. Г. Симбирева, Г. Н. Шкляр, Е. М. Безродный, А. И. Захарова, Т. А. Аннаорова; на Кавказе – Н. К. Карапетян, Э. Б. Агаларова; в Сибири – И. Д. Цыбульчик, Н. В. Солоненко; на Дальнем Востоке – В. Н. Аверьянова, Р. Н. Бурымская, В. М. Зобин. Этому способствовал также интерес, проявляемый к получаемым результатам. По результатам исследования механизмов очагов было защищено более 10 диссертаций, половина из них – под непосредственным руководством А. В. Введенской.

Ряд работ, посвященных массовому определению механизмов очагов слабых землетрясений, дополняли исследования А. В. Введенской с коллегами, направленные на изучение механизмов очагов крупных землетрясений. Так, Л. А. Мишарина разработала способ определения обобщенного механизма очага для совокупности слабых землетрясений с близко расположенными очагами. Исследование совокупностей слабых землетрясений Прибайкалья показало, что механизмы их очагов, сохраняя основные особенности, характерные для крупных толчков из тех же геологических структур, отражают и мелкие неоднородности в их строении. Преобладающее направление осей растяжения в очагах как слабых, так и крупных землетрясений, ориентировано субгоризонтально и вкрест

простираения рифтовых структур. В Гармском районе, согласно результатам исследования И. Г. Симбиревой, оси сжатия в очагах слабых землетрясений имели субгоризонтальную ориентацию, так же как и в очагах крупных землетрясений Средней Азии, но в разных участках района азимуты их несколько отличались. Различия проявлялись и в ориентации осей растяжения и промежуточной. Исследования в середине 1970-х годов аспирантки А. В. Введенской Э. Б. Агаларовой показали, что в механизмах очагов слабых землетрясений в складчатых структурах Восточного Кавказа, как и при сильных толчках, субгоризонтально ориентированы оси сжатия, а в окраинных областях Куринской низменности в очагах слабых землетрясений субгоризонтально ориентированы оси растяжения.

Массовые определения механизмов очагов слабых землетрясений, начатые под руководством и при консультациях А. В. Введенской и ее сотрудников, получили затем широкое развитие в нашей стране. На основе полученных результатов О. И. Гущенко и С. А. Юнгой были разработаны программы по определению характеристик напряженно-деформированного состояния соответствующих областей, для которых были проведены массовые определения механизмов очагов слабых землетрясений.

Определение механизмов очагов крупных землетрясений и выявление ориентации в них осей напряжений в наиболее сейсмоактивных областях Земли с конца 1960-х годов начали широко вести многие зарубежные сейсмологи. Активизация этих исследований была связана с разработкой гипотезы тектоники плит. В особенностях ориентации напряжений в очагах землетрясений в разных геологических районах пытались найти доказательства движения соответствующих литосферных плит. Однако в целом полученные зарубежными сейсмологами результаты подтвердили основные особенности ориентации напряжений в очагах крупных землетрясений, установленные коллективом сотрудников А. В. Введенской для большинства исследованных ими сейсмоактивных районов земного шара.

В 1968 г. А. В. Введенская успешно защитила докторскую диссертацию, в которой были суммированы ее теоретические разработки применительно к очагу землетрясения; рассмотрены методические вопросы

исследования механизмов очагов, а также основные результаты исследований механизмов очагов, выполненных в группе ее сотрудников. Дано описание напряженно-го состояния в очагах землетрясений и поля упругих напряжений Земли. Изложен подход к оценке величин напряжений, действующих в очагах землетрясений. Полученные ею для нескольких сильнейших землетрясений величины напряжений составили 107-108 дин/см². Докторская диссертация А. В. Введенской была опубликована в виде монографии «Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций» [Введенская, 1969].

В 1984 г. А. В. Введенской была опубликована заключительная монография «Сейсмодинамика». В монографии [Введенская, 1984] изложены взгляды автора на физические процессы, протекающие в очагах реальных тектонических землетрясений, на роль физических дислокаций в развитии пластических деформаций в очаге, на соотношение в очаге пластических и хрупких деформаций. Описан подход автора к решению обратной задачи сейсмодинамики – определению параметров очага (его размера, характера и скорости разрастания) путем сопоставления теоретических и наблюдаемых сейсмограмм. Построение теоретических сейсмограмм исходило из выражений для поля смещений сейсмических волн, полученных А. В. Введенской. В монографии приведены примеры соответствующих определений параметров очагов для нескольких крупных землетрясений, описаны особенности записей продольной волны на примере группы сильных курилокамчатских землетрясений, которые, по мнению автора, могут служить прогностическим признаком возможного повторения крупного толчка в одной и той же области. Рассмотрение этого вопроса ранее было опубликовано в отдельных статьях.

Подытоживая творческий путь А. В. Введенской, можно сказать, что она была пионером в мировой сейсмологии в разработке новой теоретической модели очага, в значительно большей степени соответствующей реальным очагам тектонических землетрясений и заменившей применявшиеся до того точечные и сферические модели. Ее работы и связанные с ними дискуссии

вокруг «одного диполя» стали толчком к резко возросшему интересу в мировой сейсмологии к исследованиям механизма очагов землетрясений. В результате слабенький еще в середине 1950-х годов ручеек из работ по этой тематике уже к концу 1960-х годов заменился бурным потоком теоретических, методических, экспериментальных исследований очагов землетрясений, проводившихся как отечественными, так и зарубежными сейсмологами. Работы А. В. Введенской были отмечены медалью «За трудовую доблесть», Именной медалью О. Ю. Шмидта, Серебряной медалью ВДНХ.

Анна Викторовна была человеком исключительно корректным. Она никогда не позволяла себе повысить голос, сделать какое-либо обидное, резкое или пренебрежительное замечание. Все ее отношения с коллегами строились на взаимном сотрудничестве, а личные – на доброжелательном отношении не только к самому человеку, но и к его семье, особенно к детям. Несмотря на глубокое увлечение своей работой, Анна Викторовна не замыкалась только на ней. Она любила литературу, особенно Ф. М. Достоевского, поэзию, отдавая предпочтение А. С. Пушкину, понимала и ценила русский романс, большой интерес проявляла к русской истории. Ее отношение к стране можно охарактеризовать словом, которое, к сожалению, выходит сейчас из употребления – патриотизм. Она была настоящей сибирячкой не по физическому здоровью, а по сильной воле и твердому духу. Здоровье же с годами стало значительно ухудшаться. Заболел и нуждался в помощи ее муж. В 1986 г. она, учитывая семейные обстоятельства, решает уйти на пенсию.

Скончалась Анна Викторовна Введенская 19 ноября 1997 г. Она завещала похоронить себя на территории ныне действующего Никольского монастыря, живописно расположенного на берегу когда-то судоходной, а сейчас тихой речки Сейм, на окраине старейшего русского города Рыльска, который стоял в XVI в. на страже Московских земель, охраняя их с юга, со стороны немирной степи. Мы не можем принести цветы на ее могилу. Пусть этот очерк будет низким поклоном большому ученому, обаятельной женщине, скромному и деликатному человеку.

- Балакина Л. М. О распределении напряжений в очагах землетрясений северо-западной части Тихого океана // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1959. № 11. С. 1599–1604.
- Балакина Л. М. Общие закономерности в направлениях главных напряжений, действующих в очагах землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1962. № 11. С. 1471–1483.
- Балакина Л. В., Введенская А. В., Мишарина Л. А., Широкова Е. И. Напряженное состояние в очагах землетрясений и поле упругих напряжений Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. № 6. С. 3–15.
- Балакина Л. М., Введенская А. В., Голубева Н. В., Мишарина Л. А., Широкова Е. И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. 192 с.
- Введенская А. В. О применении сетки Вульфа при определении динамических параметров очагов землетрясений // Тр. ГЕОФИАН. 1953. № 20 (147). С. 47–50.
- Введенская А. В. Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1956. № 3. С. 277–284.
- Введенская А. В. О смещениях на поверхности разрыва, сопровождающегося скольжением // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 2. С. 175–183.
- Введенская А. В. О поле смещений при разрыве сплошности упругой среды // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1959. № 4. С. 516–526.
- Введенская А. В. Исследование зависимости смещений в объемных волнах от продолжительности и скорости распространения дислокаций // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. № 1. С. 3–11.
- Введенская А. В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 134 с.
- Введенская А. В. Сейсמודинамика. М.: Наука, 1984. 142 с.
- Введенская А. В., Балакина Л. М. О некоторых особенностях поля смещений продольных и поперечных волн, распространяющихся в оболочке Земли // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1957. № 3. С. 1052–1054.
- Введенская А. В., Балакина Л. М. Двойное лучепреломление в оболочке Земли // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1959. № 8. С. 1139–1146.
- Гоцадзе О. Д., Кейлис-Борок В. И., Кириллова И. В. и др. Исследование механизма землетрясений // Тр. ГЕОФИАН. 1957. № 40 (166). 146 с.
- Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 148 с.
- Ляв Л. Математическая теория упругости. ОНТИ, 1935. 647 с.
- Москвина А. Г. Поле смещений упругих волн, создаваемое распространяющейся дислокацией // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1969а. № 6. С. 3–10.
- Москвина А. Г. Исследование полей смещений упругих волн в зависимости от характеристик очага землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1969б. № 9. С. 3–16.
- Широкова Е. И. О напряжениях, действующих в очагах землетрясений Средней Азии // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 6. С. 876–881.
- Широкова Е. И. О напряжениях, действующих в очагах землетрясений Кавказа и прилегающих районах // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1962. № 10. С. 1297–1306.
- Honda H. Earthquakes mechanism and seismic waves // Geophys. Notes. 1962. V. 15. Suppl. 97 p.
- Gutenberg B., Richter C. F. On seismic waves // Gerl. Beitr. Geophys. 1935. V. 45. P. 280–360.
- Kawasumi H. An historical sketch of the development of knowledge concerning the initial motion of an earthquake // Publ. Bur. Centr. Seismol. Int. 1937. Ser. A. Fasc. 15. P. 1–76.
- Nabarro F. R. N. The synthesis of elastic dislocation fields // Phil. Mag. 1951. V. 42, N 4.
- Nakano H. Notes on the nature of the forces which give to the earthquakes motion // Seismol. Bull. Centr. Met. Observ. Yapan. 1923. V. 1. P. 92–120.
- Steketee J. A. Some geophysical applications of the elasticity theory of dislocations // Canad. J. Phys. 1958. V. 36, N 9. P. 1168–1197.
- Volterra V. Sur l'équilibre des corps élastiques multiplément connexes // Ann. Ecole norm. super. Paris, 1907. V. 24.

**Список
НАУЧНЫХ ТРУДОВ
А.В.ВВЕДЕНСКОЙ**

А. МОНОГРАФИИ

- Введенская А. В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 134 с.
- Балакина Л. М., Введенская А. В., Голубева Н. В. и др. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений // Сейсмология. № 8. М.: Наука, 1972. 192 с.
- Введенская А. В. Сейсמודинамика. М.: Наука, 1984. 142 с.

Б. СТАТЬИ

- Введенская А. В. К вопросу о динамической характеристике очагов удаленных землетрясений // Тр. ГЕОФИАН. М., 1953. № 20 (147). С. 37-46.
- Введенская А. В. О применении сетки Вульфа при определении динамических параметров очагов землетрясений // Тр. ГЕОФИАН. М., 1953. № 20 (147). С. 47-50.
- Кейлис-Борок В. И., Введенская А. В. Исследование напряжений в очагах хайтской эпицентральной зоны // Тр. ГЕОФИАН. М., 1954. № 25 (152). С. 113-123.
- Введенская А. В. Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1956. № 3. С. 277-284.
- Введенская А. В., Балакина Л. М. О некоторых особенностях поля смещений продольных и поперечных волн, распространяющихся в оболочке Земли // Бюл. Совета по сейсмологии. 1957. № 6. С. 59-66.
- Введенская А. В., Балакина Л. М. О некоторых особенностях поля смещений продольных и поперечных волн, распространяющихся в оболочке Земли // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1957. № 3. С. 1052-1054.
- Введенская А. В., Балакина Л. М. О некоторых особенностях поля смещений продольных и поперечных волн, распространяющихся в оболочке Земли // Тез. докл. на XI генеральной ассамблее Международного геодез. и геофиз. союза. Международная ассоциация сейсмологии и физики недр Земли. М., 1957. С. 22-23.
- Введенская А. В. О смещениях на поверхности разрыва, сопровождающегося скольжением // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 2. С. 175-183.
- Введенская А. В. О поле смещений при разрывах сплошности упругой среды // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1959. № 4. С. 516-526.
- Введенская А. В., Балакина Л. М. Двойное лучепреломление в оболочке Земли // Изв.

- АН СССР. Сер. геофиз. 1959. № 8. С. 1139-1146.
- Vvedenskaya A. V., Balakina L. M. On some peculiarities of the displacement fields of the longitudinal and transverse waves propagating in the earths mantle // Union Geod. Geophys. Intern. Ser. A. 1959. N 20. P. 145-149.
- Введенская А. В. Об определении напряжений, действующих в очагах землетрясений, по наблюдениям сейсмических станций // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1960. № 4. С. 513-519.
- Введенская А. В., Балакина Л. М. Методика и результаты определения напряжений, действующих в очагах землетрясений Прибайкалья и Монголии // Бюл. Совета по сейсмологии. 1960. № 10. С. 73-84.
- Balakina L. M., Vvedenskaya A. V. Study of stresses and ruptures in earthquakes foci with the help of dislocation theory // Publ. Dominion Observ. Ottawa. 1960. N 24 (10). P. 321-327.
- Введенская А. В. К дискуссии по поводу теоретической модели очага землетрясения // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 2. С. 261-263.
- Введенская А. В. Особенности напряженного состояния в очагах Прибайкальских землетрясений // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 5. С. 666-669.
- Введенская А. В., Рупрехтова Л. Особенности напряженного состояния в очагах землетрясений у изгиба Карпатской дуги // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 7. С. 953-965.
- Введенская А. В. Изучение напряжений и разрывов в очагах землетрясений // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1961. № 36 (2). С. 127-128.
- Vvedenskaya A. V., Balakina L. M. Double refraction in aelotropic layers and some peculiarities of low velocity layer in earths mantle // Travaux sci. Ser. A. 1961. N 21. P. 87-98.
- Savarensky E. F., Balakina L. M., Vvedenskaya A. V. On determination of earthquake mechanism // Physics and chemistry of the Earth. London, 1961. № 4. P. 211-239.
- Балакина Л. М., Введенская А. В. Изменение упругих свойств и плотности вещества на границе земного ядра // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1962. № 11. С. 1457-1470.
- Введенская А. В. Основы методики изучения напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций // Тез. докл. совещания по проблемам тектоники. М., 1962. С. 161-165.

- Ruprechtova L., Vvedenskaya A. V. On the stresses acting of the foci of earthquakes near the bend of the Carpathian arc // *Studia Geophys. Geod.* 1962. N 6 (2). P. 140-151.
- Введенская А. В. Исследование зависимости смещений в объемных волнах от продолжительности и скорости распространения дислокации // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1965. № 1. С. 3-11.
- Балакина Л. М., Введенская А. В., Колесников Ю. А. Исследование внешней границы земного ядра при помощи спектрального анализа сейсмических волн // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1966. № 8. С. 22-35.
- Балакина Л. М., Введенская А. В., Мишарина Л. А., Широкова Е. И. Напряженное состояние в очагах землетрясений и поле упругих напряжений Земли // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1967. № 6. С. 3-15.
- Введенская А. В. Возможности определения величин напряжений, действующих в очагах землетрясений // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1967. № 7. С. 14-17.
- Балакина Л. М., Введенская А. В. Напряженное состояние в очагах землетрясений и поле упругих напряжений Земли // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1967. № 6. С. 3-15.
- Vvedenskaya A. V. Possibilities of determination of values of stresses acting in earthquake foci // *Tectonophysics.* 1967. N 4 (3). P. 213-218.
- Balakina L. M., Micharina L. A., Shirokova E. I., Vvedenskaya A. V. Stressed state in earthquakes foci and the field of the earth elastic stresses // *Comptes rendus des seances de la quatorzieme conference Reune a Zurich du 25 september au 6 octobre 1967.* N 15. 1967. P. 172.
- Балакина Л. М., Введенская А. В. Исследование напряжений в очагах землетрясений // *Вест. АН СССР.* 1968. № 1. С. 64-70.
- Vvedenskaya A. V., Balakina L. M., Misharina L. A., Shirokova E. I. The field of elastic stresses associated with earthquakes // *The Earth crust upper mantle.* Washington, 1969. P. 166-170.
- Введенская А. В. Волновое поле распространяющегося источника в форме площадки скольжения // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1973. № 6. С. 11-27.
- Введенская А. В. Особенности процесса разрушения и энергетический баланс в очагах землетрясений // *Земная кора сейсмоопасных зон. Верхняя мантия.* М., 1973. № 11. С. 25-37.
- Vvedenskaya A. V. Specific features of the wave field of an expanding source in the form of a slip plane // *Publication of the Inst. of Geophys. Polish Acad. Sci. Warszawa,* 1973. P. 3-24.
- Введенская А. В. Исследование процесса развития очага землетрясений по сейсмограммам объемных волн // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1975. № 6. С. 12-24.
- Vvedenskaya A. V. Investigation of the earthquake focus development on the basis seismograms of the body waves // *Publications of the Inst. of Geophys. Polish Acad. Sci. Warszawa,* 1975. P. 5-19.
- Введенская А. В. Скорость испарывания в очаге землетрясения и форма сейсмограмм объемных волн // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1976. № 8. С. 16-30.
- Введенская А. В., Голубева Н. В. Особенности процесса развития очагов сильнейших землетрясений мира // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1978. № 8. С. 3-16.
- Введенская А. В., Голубева Н. В. Динамика очага и энергетический баланс волнового поля сильнейших землетрясений мира // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1980. № 8. С. 22-40.
- Введенская А. В., Голубева Н. В. Кинематика и динамика процесса развития сейсмического очага в статическом поле напряжений Земли // *Физические процессы в очагах землетрясений.* М., 1980. С. 140-157.
- Введенская А. В., Голубева Н. В., Рупрехтова Л. Особенности напряженного состояния района изгиба Карпатской дуги и параметры механизма развития очага землетрясения 4 марта 1977 г. // *Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. и его последствия.* М.: Наука, 1980. С. 106-134.
- Введенская А. В. Развитие очагов и прогноз повторных сильнейших землетрясений // *Докл. АН СССР.* 1981. Т. 261, № 1. С. 59-62.
- Введенская А. В. Прогноз повторного сильнейшего землетрясения // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1982. № 11. С. 3-12.
- Интерпретация сейсмических наблюдений / Отв. ред. А. В. Введенская, О. Н. Соловьева. М., 1983. 135 с.
- Введенская А. В., Голубева Н. В. Параметры механизма развития очагов главных толчков // *Газлийские землетрясения 1976 г.: Геолого-геофизическая природа очагов.* М., 1984. С. 62-79.
- Введенская А. В. Прогноз повторного сильнейшего землетрясения // *Тез. докл. Евро-*

- пейской сейсмологической комиссии. XIX Генеральная ассамблея. Москва, окт. 1984 г. М., 1984. С. 12.
- Агаларова Э.Б., Введенская А.В. Прогностический признак повторного сильного толчка в последовательности землетрясений на территории Азербайджана // Тез. докл. Европейской сейсмологической комиссии. XIX Генеральная ассамблея, Москва, окт. 1984 г. М., 1984. С. 22.
- Vvedenskaya A. V. Prediction of repeated strong earthquake // XIX Gen. Assemb. Europ. Seismol. Commis. Moscow, oct. 1-6, 1984. М., 1984. P. 25.
- Agalarova E. B., Vvedenskaya A. V. Prognostic symptom of recurrent large shock in earthquakes sequence in Azerbaijan // XIX Gen. Assemb. Europ. Seismol. Commis. Moscow, oct. 1-6, 1984. М., 1984. P. 30.
- Аннаоразова Т.А., Введенская А.В. Движущий момент и силы инерции в очаге на примере сильных землетрясений Ирана // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № 5. С. 74-82.
- Vvedenskaya A. V., Savarenskaya O. E. The process at the earthquake source of the Gazli (April 8, 1976; May 17, 1976) and Algeria (October 1, 1980) // Quantification of Earthquakes. New York, 1985. P. 365-372.
- Введенская А.В. Инерциальная модель очага и возможности прогноза повторного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 49-57.
- Введенская А.В. Прогноз повторного сильнейшего землетрясения // Современное состояние сейсмологических исследований в Европе. М., 1988. С. 206-212.
- Введенская А.В., Саваренская О.Е. Положение площадок вязкого и хрупкого разрушения в очагах последовательности сильнейших землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. № 11. С. 31-42.

**СВЕДЕНИЯ
ОБ АВТОРАХ**

БАЛАКИНА Людмила Михайловна
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.
123995, Москва, Б. Грузинская ул., 10.
Тел.: 254-94-95

МОСКВИНА Антонина Григорьевна
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.
123995, Москва, Б. Грузинская ул., 10.
Тел.: 254-94-95

**A. V. VVEDENSKAYA –
THE CREATOR
OF EARTHQUAKE
SOURCE MODEL**

A brief science biography of Anna Victorovna Vvedenskaya developed the basis for a new

**LUDMILA M. BALAKINA,
ANTONINA G. MOSKVINAVZ**

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

earthquake source model and source solutions as a new branch of seismology is given