

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ЗЕМЛИ: КОНЦЕПЦИЯ, НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИ

В.Г. Быков

*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН,
680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, Россия*

Предпринята попытка проанализировать развитие концепции деформационных волн Земли за последние 35 лет. Проведена классификация основных типов деформационных волн Земли, описание которых встречается в научной литературе. Выявлены 25 основных терминов, означающих по сути проявление различных признаков деформационного процесса на разных масштабных уровнях. Представлены таблицы с указанием авторского названия и трактовки терминов, формы проявления волн в природе и способов их регистрации, динамических характеристик волн и их источников, предполагаемого физического механизма генерации волн. Показано место концепции деформационных волн Земли в проблеме миграции землетрясений.

Деформационные волны, тектонические волны, механизмы генерации, миграция землетрясений, сейсмология.

STRAIN WAVES IN THE EARTH: THEORY, FIELD DATA, AND MODELS

V.G. Bykov

The presented overview traces the development of the strain wave theory over the past 35 years. The study includes classification of strain waves reported in the literature and analysis of the relevant terminology. Twenty-five basic terms actually denote various features of the deformation process expressed at different scales. The terms are synthesized in tables that display the original definitions and interpretations, the forms of manifestation of strain waves in nature and recording methods, as well as their velocities, sources, and hypothetical generation mechanisms. The strain wave theory can provide a physical background for explaining the driving mechanisms of seismic migration.

Strain wave, tectonic wave, generation mechanism, earthquake migration, seismology

ВВЕДЕНИЕ

С тех пор как Ч. Рихтер в 1958 г. обнаружил направленную миграцию очагов землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома в Турции, не прекращаются попытки объяснить это явление природы. Исследование этой проблемы имеет не только фундаментальное значение для понимания глобальной геодинамики, эволюции и энергетики планеты, но и чрезвычайно важно для оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений.

Основная причина миграции эпицентров сильных землетрясений, по мнению некоторых исследователей, заключается в последовательном перераспределении напряжений в различных сегментах разлома, вызывающем цепочку землетрясений. Каждая сейсмическая подвижка по разлому приводит к повышению напряжений в других сегментах разломной зоны и создает тем самым условия для возникновения очередного сильного землетрясения. Существует и другая точка зрения, согласно которой главным механизмом направленной миграции считается возможность распространения фронта деформирования, вызывающего некоторую дополнительную тектоническую нагрузку и, как следствие, последовательное возникновение сильных землетрясений на участках разломов с высокой концентрацией упругих напряжений.

Более тридцати лет в научной литературе обсуждается вопрос о медленных волнах деформации, которые имеют определенное теоретическое обоснование и косвенно выявляются в геофизических полях, но прямые экспериментальные доказательства существования этих волн пока очень немногочисленны или даже уникальны. Интерес исследователей к этому разделу физики землетрясений особенно резко возрос, когда появились первые обнадеживающие сообщения о наблюдениях, которые были интерпретированы как признаки волн деформаций. Очевидно, что регистрация деформационных волн Земли должна сводиться либо к превращению их энергии в другие виды энергии, либо к изменению движения отдельных структурных элементов (блоков) под их воздействием. Прямые измерения деформационных волн крайне затруднены в связи с теоретически предсказанной очень низкой скоростью и сверхнизкой частотой. Наиболее доступным в настоящее время способом детектирования деформационных волн является регистрация изменений в геофизических полях, которые, по современным представлениям, должны сопровождать прохождение этих волн.

Точного определения деформационных (тектонических) волн и энергии, переносимой ими, современная теория не дает. Наиболее общее понимание заключается в том, что в недрах Земли порождается возмущение, которое имеет волновую природу и, двигаясь от точки к точке, воздействует на геологическую среду, геофизические поля и процессы. Чтобы убедиться в том, что обсуждаемые волны представляют собой действительный физический процесс, целесообразно рассмотреть накопленные факты и существующие теоретические модели, но прежде обратимся к концепции деформационных волн Земли.

КОНЦЕПЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН ЗЕМЛИ

Формирование концепции деформационных (тектонических) волн Земли, начало которого относится к 1969 г., в значительной степени развивалось на основе двух сделанных к этому времени открытий: миграции очагов сильных землетрясений вдоль глубинных разломов [1, 2] и глобальной тектоники плит [3—5]. Позднее выяснилось, что деформационные волны возникают не только на границах литосферных плит, но их признаки обнаруживаются и в разломах земной коры.

Фундаментом концепции являются результаты исследований пространственно-временного распределения землетрясений в различных регионах Земли, процессов медленного деформирования земной коры и перемещений аномалий геофизических полей вблизи зон разломов.

Физическая основа концепции состоит в фундаментальном свойстве геосреды — слоистости и блочности ее структуры. Именно на границе раздела (контакта) твердых тел при их взаимном смещении происходит генерирование деформационных волн различного типа и масштаба: волны расслоения—срыва (waves of detachment) [6], волны разделения (interface waves involving separation) [7], волны сдвигового напряжения [8]. Согласно [9], именно свойства межблоковых контактов, а не материала блоков определяют нелинейный характер перемещений на больших пространственных и временных масштабах при слабых и медленных деформациях горных масс.

Основное положение концепции заключается в том, что последовательность сильных землетрясений вдоль разломной зоны может быть инициирована прохождением деформационных волн глобального и корового масштабов, генерируемых на границах литосферных плит, на контакте литосфера—астеносфера, при вращении блоков в разломных зонах земной коры, в ходе синергетических процессов.

Качественное обсуждение ряда важных геологических процессов с позиций концепции деформационных волн Земли показывает ее продуктивность. Отметим лишь некоторые следствия концепции.

Концепция позволяет объяснить наблюдаемую специфику проявления сейсмичности на юге Средней Азии, которая, по-видимому, обусловлена импульсными тектоническими пригрузками, генерируемыми при колебательном режиме коллизии литосферных плит в зоне сочленения Памира и Тянь-Шаня, и затем перемещающимися в виде предполагаемых волн деформации [10].

Концепция деформационных (тектонических) волн согласуется с наличием циклично-блуждающих асейсмичных полос в мантии на границе литосфера—астеносфера [11, 12] и с изменением направления миграции землетрясений на противоположное в зоне субдукции [13].

Представление о распространении деформационных волн дает возможность понять геодинамическую природу колебательной миграции „фантомных границ“ — сейсмических границ, не имеющих вещественного выражения в геологической среде и реагирующих на изменение во времени напряженно-деформированного состояния среды [14—16].

Сильные землетрясения нередко сопровождаются быстрой миграцией сейсмической активности на обширных территориях [17]. Необходим материальный носитель возмущений и это может быть только волна, так как перемещения геомасс не происходит. При этом взаимодействие разломов, наряду с перераспределением порового давления, может обеспечиваться и деформационными волнами. Волновой механизм кажется более реалистичным, так как диффузионная миграция флюидов (судя по оценкам [18 и др.]) значительно отстает от более быстрых в данном случае деформационных волн. Разломы при этом играют роль природных детекторов деформационных волновых процессов.

Осмысление этих и других многочисленных фактов неизбежно приводит к концепции деформационных волн Земли. Для количественной оценки этой концепции, очевидно, необходимо иметь данные наблюдений и соответствующие математические модели.

ОСНОВНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

При анализе пространственно-временного распределения землетрясений можно оценить скорость некоторого предполагаемого деформационного процесса, пересекающего с эпицентрами произошедших сильных землетрясений [19—24]. Специальными прямыми или косвенными наблюдениями выделяются уже не только скорости распространения деформаций, но и другие характеристики медленного движения. Так, сейсмическими и деформационными измерениями на плотных сетях регистрирующей

аппаратуры было установлено, что изменение напряженно-деформированного состояния среды вследствие современных геодинамических процессов имеет волновой характер и является основной причиной временных вариаций скоростей сейсмических волн или деформаций в литосфере [25—27]. Наиболее полно результаты наблюдений направленной миграции землетрясений, прямых и косвенных натуральных измерений деформационных волн или их признаков представлены и проанализированы в работах [2, 9, 10, 19, 28—31].

Количественно деформационные волновые процессы выражаются в скорости миграции очагов землетрясений и аномалий геофизических полей вблизи разломов. Наиболее характерные скорости этих процессов и, как предполагается, соответствующие им волны можно условно разделить на две группы (два масштаба проявления): глобальные тектонические волны и деформационные волны в разломах.

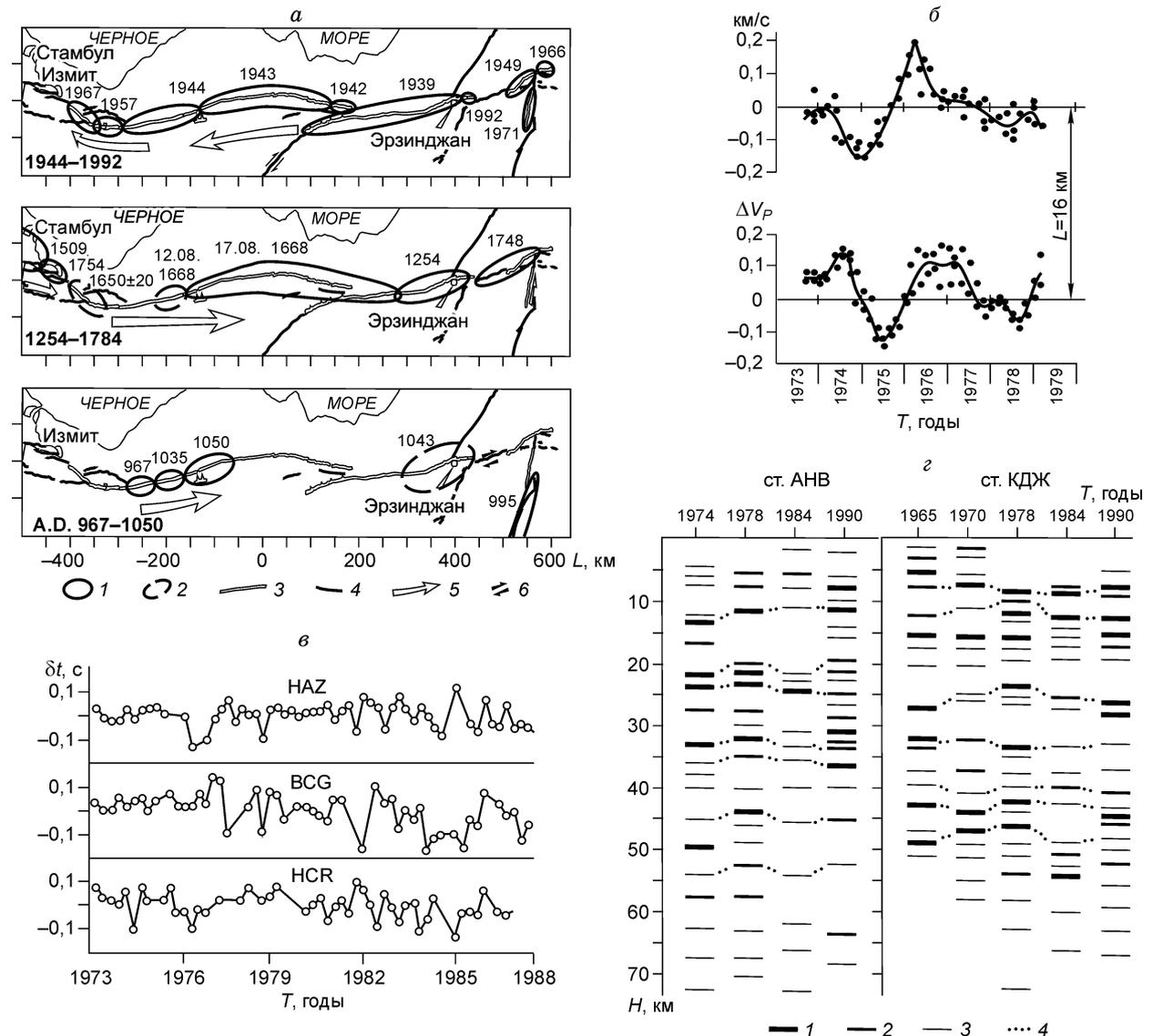


Рис. 1. Проявления глобальных тектонических волн.

a — миграция сильных исторических землетрясений вдоль Северного и Восточного Анатолийских разломов [23]: 1 — очаги землетрясений, 2 — предполагаемые очаги землетрясений, 3 — активный тектонический разлом, 4 — ответвление разлома, 5 — направления миграции землетрясений, 6 — направление смещения; *б* — вариации скоростей продольных сейсмических волн в различных частях Гармского полигона (Таджикистан) [10]; *в* — временные ряды невязок для трех сейсмических станций HAZ, BCG, HCR (Сан-Андреас, Центральная Калифорния, США) [42]; *з* — временные глубинные разрезы МОВЗ под станциями АНВ (Ананьево) и КЖД (Каджисай) (Тянь-Шань) [15]. Обменнообразующие площади различной интенсивности: 1 — более 20 обменных волн, 2 — более 15, 3 — около 5, 4 — соединения синхронно перестраивающихся обменных площадок.

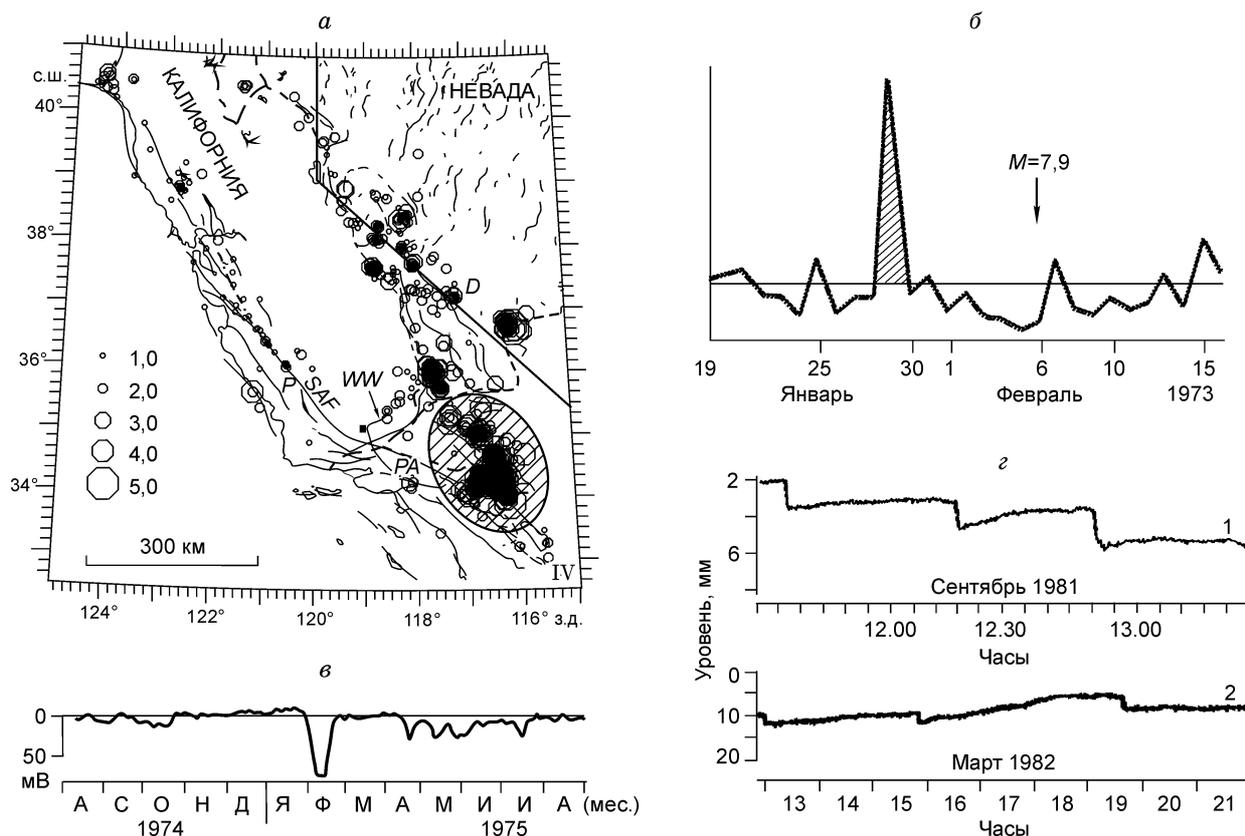


Рис. 2. Косвенные признаки деформационных волн вдоль разломов земной коры.

a — карта сейсмической активности Калифорнии и Невады в первые 10 дней после землетрясения Ландерс (Landers, 1992, $M = 7,3$) [17]. Сплошные линии — разломы четвертичного периода; эллипс — афтершоковая зона. Сейсмические зоны: *D* — Дейт Вэлли, *IV* — Империял Вэлли, *P* — Паркфилд, *PA* — Пасадена, *SAF* — разлом Сан-Андреас, *WW* — разлом Уайт Вулф;

b — концентрация радона, измеренная в Гузানে перед землетрясением в Люхао (стрелка) [31];

в — электрокинетические импульсы, измеряемые парой электродов при землетрясении [31];

г — ступенчатые колебания уровня воды в скважинах вблизи Ашхабада: 1 — скв. Ким, 2 — скв. Ашт [31].

Глобальные тектонические волны со скоростями 10—100 км/год фиксируются по направленной миграции сильных землетрясений [23] (рис. 1,*a*); сейсмическим аномалиям (временные вариации скоростей сейсмических волн, временные вариации времен пробега и временных невязок, различных параметров сеймотектонического процесса) [25, 26] (см. рис. 1,*б, в*); волновым колебаниям уровня подземных вод вдоль зоны разлома [28]; миграции наклонов и деформаций поверхности [28]; деформографическим измерениям [27]; циклическому блужданию асейсмических полос в мантии Земли [11, 12]; колебательным движениям обменно-образующих сейсмических площадок [14—16] (см. рис. 1,*г*).

О деформационных волнах в разломах со скоростями 1—10 км/сут косвенно свидетельствуют: быстрая миграция сейсмической активности на обширных территориях перед или после сильных землетрясений [17, 19] (рис. 2,*a*); фиксируемые радоновые, электрокинетические и гидродинамические сигналы [31] (см. рис. 2,*б—г*); возбуждение волн деформаций и напряжений при взрывном и вибрационном инициировании подвижки в зоне разлома [32].

Таким образом, к настоящему времени накоплено множество фактов, которые прямо или косвенно указывают на принципиальную возможность распространения в земной коре волновых деформационных процессов с различными скоростями.

Моделирование направленной миграции землетрясений и деформационных волн должно включать такие эффекты, которые можно было бы обнаружить в наблюдаемых геофизических полях, или которые уже зафиксированы. К последним можно отнести различные изменения напряженно-деформированного состояния в разных по глубине горизонтах земной коры [14—16, 28]; перемещение медленных тектонических деформаций вдоль глубинных разломов по узкому „коридору“ (~100 км) [9]; распространение вдоль разломов земной коры геофизических сигналов в форме уединенных волн [31].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Разработка первых теоретических моделей деформационных волн Земли [33—39] была стимулирована обнаружением миграции сейсмической активности вдоль границ плит и появлением новой глобальной тектоники. Представления о литосферных плитах, разделенных мощными разломами и подстилаемых вязкой астеносферой, привели к моделям двух типов: а) модели слоистые (литосфера—астеносфера; литосфера—астеносфера—мезосфера) [30, 33] (рис. 3,а, б); б) модели разломов с вязкой прослойкой между бортами (вязкоупругие) [35, 37, 38] (см. рис. 3,в). Впоследствии возник третий тип моделей, включающий элементы двух предыдущих с добавлением эффекта изгиба жесткой литосферной плиты [40, 41] (см. рис. 3,г). Эти модели были предназначены для описания медленных волн напряжений, соответствующих миграции сильных землетрясений вдоль трансформных разломов и желобов (впадин), и движений земной коры.

Основные сведения о развитии представлений и моделях деформационных волн Земли указаны в Приложении в хронологическом порядке их опубликования [43—61].

Глобальные тектонические волны. Одна из первых волновых концепций деформационного процесса была предложена Ю.В. Ризниченко [43]. Волна разупрочнения введена для описания процесса активизации и расхождения сейсмичности после крупных землетрясений и вызывает некоторую дополнительную нагрузку, которая оказывает влияние на сейсмический процесс. В отдельных случаях волна разупрочнения может сыграть роль спускового механизма для сильного землетрясения.

В. Эльзассер [33] в 1969 г. впервые предложил теорию литосферных волноводов напряжений и записал уравнение для переноса локальных напряжений в жесткой упругой литосфере, подстилаемой вязкой астеносферой. Но прямых упоминаний о волнах деформации или тектонических волнах в работе не встречается. Единственным термином, указывающим на волновой механизм перемещений напряжений в системе литосфера—астеносфера, является „волновод напряжений“ (stress guide). Напряжения распространяются вдоль контакта литосфера—астеносфера горизонтально поверхности Земли по диффузионным законам [33, 34]. Ключевым моментом модели является вязкое сцепление между литосферой и астеносферой.

В дальнейшем в работах М. Ботта, Д. Дина [36] и Д. Андерсона [39] обсуждалась возможность использовать представления В. Эльзассера для механизма передачи сейсмической активности вдоль

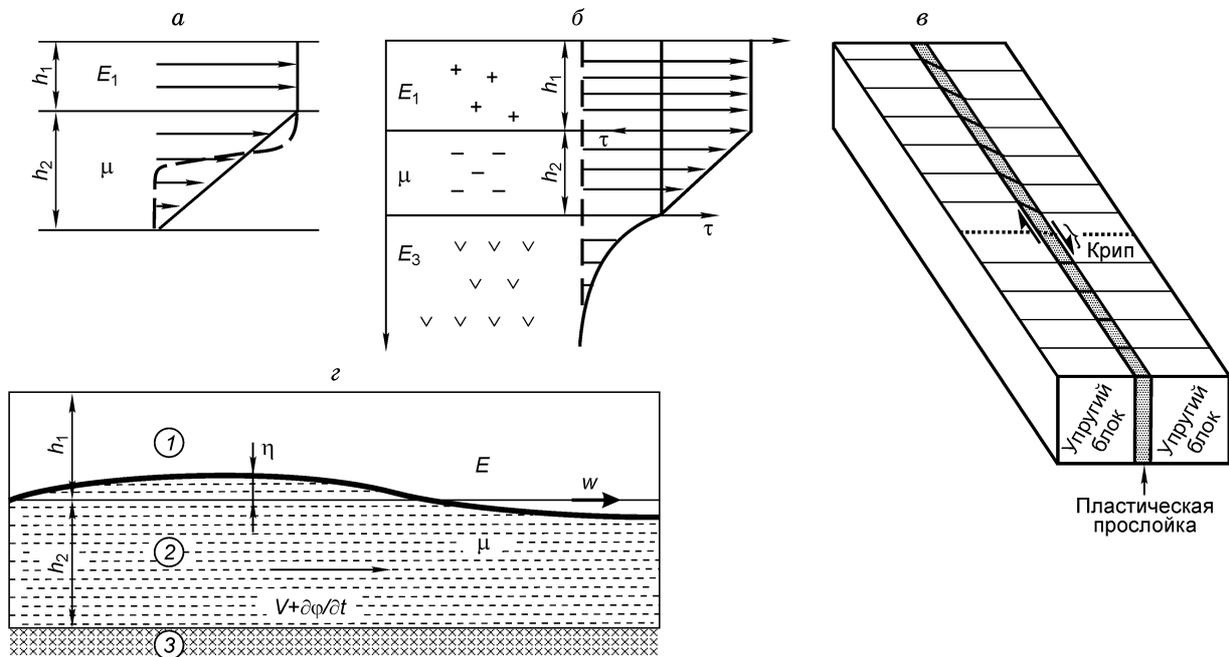


Рис. 3. Схематическое представление моделей генерации деформационных волн Земли.

а — модель контактного взаимодействия системы литосфера—астеносфера [33]; б — схема взаимодействия системы литосфера—астеносфера—мезосфера [30]; в — модель крипового скольжения по глубинному разлому [38]; г — схема возбуждения тектонических волн в системе литосфера—астеносфера—мезосфера при изгибе литосферной плиты [41].

h — мощность; E, μ — модуль Юнга и вязкость; τ — касательные напряжения; V — стационарная составляющая скорости сдвига литосферы относительно мезосферы; η — вертикальное смещение; $\partial\varphi/\partial t$ — скорость напорного потока. 1, 2, 3 — литосфера, астеносфера, мезосфера соответственно.

границ плит. М. Ботт и Д. Дин ввели термин „волна напряжений“ (stress or strain waves) и получили выражение для скорости волны вдоль литосферной плиты. Скорость волн напряжений зависит от их периода, физико-механических свойств литосферы и астеносферы и составляет 0,1—100 км/год. Д. Андерсон обобщил модель Эльзассера с целью выяснения механизма миграции землетрясений в зоне субдукции и оценки скорости волны напряжения вдоль островной дуги.

Несколько позднее для описания крупномасштабных и длительных тектонических процессов К. Шольц предложил использовать представления о „фронте деформаций“ [62, 63]. Распространение деформационных фронтов (или триггерных возмущений) обсуждалось во взаимосвязи с миграцией землетрясений вдоль границ плит. Обобщенная модель Эльзассера была применена Дж. Райсом с коллегами [64] для анализа распространения деформационных фронтов через кору и литосферу. Было, в частности, показано, что сцепление между литосферой и астеносферой является необходимым элементом модели, контролирующим пространственно-временное распределение цепочки последовательных сильных землетрясений вдоль границ плит.

Дополнение концептуальной модели Эльзассера принципиально новым элементом — изгибом-сжатием литосферной плиты на астеносферном потоке — позволило В.Н. Николаевскому [40] построить строгую математическую теорию распространения тектонических напряжений в виде уединенных волн, энергия которых пополняется из стационарного астеносферного потока и компенсирует вязкие потери. Тем самым был обоснован автоволновой механизм генерации тектонических волн в системе литосфера—астеносфера. Двумерная модель взаимодействия литосферы и астеносферы за счет вертикальных смещений и вязких касательных напряжений на контакте литосфера—астеносфера дает в качестве решений либо периодические волны малой интенсивности (стоячие и диффузионные), либо уединенные волны [41].

Именно такие волны напряжений или деформаций и были в 1983 г. впервые названы В.Н. Николаевским тектоническими волнами с учетом их принципиального отличия по своим динамическим параметрам и механизму возбуждения от волн иной природы [11, 40]. Позднее термин „тектонические волны“ был применен и другими исследователями (см. Приложение), но имел уже иной физический смысл, что вносит некоторую неоднозначность и не способствует выявлению реальных механизмов деформационных процессов.

Единственная успешная попытка обнаружить прямые признаки крупномасштабных волновых движений в мантии и подтвердить тем самым гипотезу о существовании тектонических волн на контакте литосфера—астеносфера была предпринята А.С. Маламудом и В.Н. Николаевским [11, 12]. Распределение гипоцентров мантийных землетрясений Памиро-Гиндукуша и Новой Зеландии фиксирует четко выделяемые горизонты сейсмической активности и асейсмичную полосу, циклично блуждающую с амплитудой около 30 км относительно глубины в 150 км. Скорость волн сейсмоактивности составляет 30 км/год, что совпадает с расчетной скоростью уединенных тектонических волн [40]. Математическая модель крупномасштабного механизма медленной одновременной передачи тектонических напряжений вдоль литосферы и кровли мезосферы, взаимодействующих через вязкий астеносферный слой, представлена в [13].

Тектонические волны, введенные В.А. Дубровским [48], — это малые волновые возмущения в системе литосфера—астеносфера с инверсией плотности. Математическая модель включает условие потери устойчивости упругой плиты на несжимаемой жидкости. Предполагается, что при выполнении этого условия плита в поле силы тяжести теряет плоскую форму и изгибается. Принципиальное отличие подхода В.А. Дубровского от классической модели Эльзассера и его последователей заключается в том, что в системе литосфера—астеносфера допускаются существенные изменения толщины литосферы, а именно: в прогибах толщина увеличивается, а в областях поднятий — уменьшается. Это приводит к возникновению тектонических сил, которые и вызывают, в частности, тектонические волны [48]. Характерные черты тектонических волн (медленных волновых тектонических движений) проявляются в платформенных, внутриплитовых областях с большими скоростями вертикальных и горизонтальных смещений [49]. Природа этих волн обусловлена квазипериодическим процессом поддержания и сохранения астеносферы как целостной оболочки Земли при поступлении тепловой энергии из нижней мантии.

„Автоволновая концепция“ глобальных деформационных процессов в коре и мантии Земли, основанная по сути на синергетическом подходе, развивалась в работах [14, 15, 44, 45, 65, 66].

Ш.А. Губерман [44, 45] в своей модели развития сейсмической активности Земли ввел представление о *D*-волнах — возмущениях, которые без затухания распространяются вдоль меридианов с постоянной скоростью. Основные положения выдвинутой концепции заключены в следующем. В момент времени, когда происходит сильное землетрясение, блоки на поверхности Земли смещаются. Это приводит к перераспределению масс и вызывает изменение скорости вращения Земли. Когда скорость вращения достигает локального минимума, на Северном и Южном полюсах одновременно возбуждаются две *D*-волны и идут к экватору навстречу друг другу. При столкновении этих волн в *D*-узле, накопившем

достаточные тектонические напряжения, возможно крупное землетрясение. В рамках развиваемой концепции землетрясения являются причиной, а изменение скорости вращения Земли — следствием. Таким образом, однажды произошедшее сильнейшее землетрясение запускает механизм стартующих на полюсах волн, т. е. включает „вечный двигатель“ — генератор D -волн. Физический механизм генерации и распространения D -волн не разработан, а сам автор считает, что „основания гипотезы D -волн имеют несколько фантастический характер“ [46, с. 321].

Одна из концепций [65] состоит в том, что волновой характер переноса энергии вдоль поверхности Земли соответствует радиальной миграции сейсмической активности. Сейсмический процесс подразделяется на ряд миграционных циклов, в каждом из которых возникновение землетрясений связано с взаимодействием фронтов глобальных волновых процессов или с пересечением этих фронтов и крупномасштабных геологических структур. Фронты распространяются с постоянной скоростью около 210 км/год от некоторых точек на земной поверхности — центров расхождения миграционного цикла [66]. Допускается, что возникновение медленных волн обусловлено мантийной конвекцией и фазовыми превращениями глубинного вещества. Терминология и предлагаемый авторами гипотезы энергетический механизм указывают на автоволновой характер сейсмического процесса.

Основанием для концепции деформационных структурных волн [14, 15] послужили фиксируемые временные изменения местоположения отражающих сейсмических площадок. По мнению авторов, прохождение деформационных волн разупрочняет одни области геологической среды и упрочняет другие и тем самым „выявляет те или иные сейсмические границы“. Пульсирующий характер временного хода обменных границ соответствует самоорганизации среды и отражает автоволновую природу деформационного процесса.

Деформационные волны в разломах. Кроме тектонических волн, глобально охватывающих литосферу, возможно распространение волн напряжений вдоль разломов земной коры и литосферы.

В моделях Дж. Сэвиджа [35] и Ё. Ида [37] диффузионный механизм играет основную роль в динамике потока дислокаций, кинематическое поведение которого контролируется физическими свойствами прослойки дробленого геоматериала в теле разлома. Принципиальный результат Дж. Сэвиджа [35] заключается в том, что механизм потока дислокаций приводит к „криповым волнам“ (creep waves) вдоль трансформного разлома — волнам напряжений. Скорость распространения таких волн зависит от амплитуды деформации и увеличивается с ростом последней. Согласно гипотезе Дж. Сэвиджа, криповые волны вызывают резкое изменение движения в разломе и связаны с миграцией сильных землетрясений вдоль северо-восточной окраины Тихого океана. Ё. Ида [37] получено решение в виде импульса (slow-moving deformation pulses), распространяющегося без изменения формы с постоянной скоростью вдоль разлома. Величина скорости определяется в основном вязкостью прослойки, ее толщиной, жесткостью горных пород. Варьирование вязкости и толщины прослойки в разломе дает значения скорости импульса от 1—10 км/день до 10—100 км/год. Первый интервал характеризует асейсмический крип в разломах Центральной Калифорнии при длине волны около 1 км; второй — соответствует миграции землетрясений при длине волны порядка десятков километров.

Вдоль главных разломов западного побережья Чили, Центральной Америки и разлома Сан-Андреас в направлении с севера на юг были выявлены возмущения, вызывающие сильные тектонические землетрясения [20]. Эти возмущения названы Е.В. Вильковичем, Ш.А. Губерманом, В.И. Кейлис-Бороком „волнами тектонической деформации“. Двумерная модель генерации и распространения возмущений подобного рода с учетом вязкоупругости астеносферы и при наличии глубинного разлома в литосфере разработана В.Н. Николаевским и Т.К. Рамазановым [55]. Тектоническая волна генерируется внезапной подвижкой по разлому, заполненному вязкоупругой средой, и распространяется вдоль разлома. Природа этих волн связана с вязкоупругими свойствами астеносферы и ее реакцией на продольное сжатие и изгиб литосферы. Из расчетов следует интенсивное затухание волн, бегущих поперек разлома, что согласуется с экспериментальными данными [42].

В решеточной модели В.И. Уломова [56, 57] учтено блоковое строение земной коры, литосферы и, что особенно важно, приуроченность очагов к тектонически мобильным межблочным швам—разломам. Неотъемлемой частью модели, отражающей сейсмогеодинамику геофизической среды, являются структурно-устойчивые уединенные деформационные волны, которые в течение длительного времени мигрируют вдоль межблочных швов литосферы и вызывают землетрясения. Эти волны возникают в результате перераспределения упругой энергии в блоках земной коры и литосферы в ходе криповых и сейсмических перемещений различного масштаба, имеют солитонную природу и названы В.И. Уловым „геонами“ [56]. Подпитываясь упругой энергией деформируемой геофизической среды, геоны вызывают перемещение упругих напряжений и геомасс на огромные расстояния.

Обнаружение признаков уединенных деформационных волн в геофизических полях послужило мотивацией для построения математической модели [58] поворотных колебаний блоков горной породы,

составляющих тела реальных разломов земной коры. Исследование таких волн имеет принципиальное значение для выявления механизмов миграции как предвестников землетрясений в земной коре [31], так и уединенных волн тектонического типа [59]. Соответствующее данному механизму уравнение \sin -Гордона дает решение в виде уединенной волны, интерпретируемой в модели блочной среды как медленно распространяющаяся тектоническая волна солитонного типа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема генерации и детектирования деформационных волн является одной из принципиально важных проблем геофизики. Надежное прямое экспериментальное доказательство самого факта существования в природе деформационных волн Земли имело бы для геофизики решающее значение. Это послужило бы мощным фундаментом для физического осмысления различных теоретических моделей, многие проблемы сейсмологии могли бы опереться на новый физический базис.

Основная трудность выяснения доминирующего механизма генерации и распространения деформационных волн состоит в недостатке именно дифференцированной информации, так как наблюдению доступен лишь интегральный эффект многих сопутствующих факторов. Однако все эти факторы можно попытаться определить в рамках математических моделей и специальных экспериментов, подобных представленным в [26, 32, 67, 68].

Поиск причин возникновения и распространения волн деформаций привел к построению моделей, которые позволили, по крайней мере, объяснить сверхнизкие скорости и сверхдлинные периоды волн деформаций и указать возможные источники их возбуждения, наметить механизмы, порождающие волны миграции землетрясений. Проверка уже существующих моделей деформационных волн и направленной миграции землетрясений, по-видимому, должна сводиться к поиску таких эффектов, которые можно было бы обнаружить в наблюдаемых геофизических полях.

Дальнейшее математическое моделирование деформационных волн Земли необходимо для определения оптимальных условий их наблюдения, выявления основных физических механизмов, вызывающих сейсмическую миграцию и генерацию сигналов различного происхождения, сопровождающих волны деформации на различных масштабных уровнях, а также параметров, оказывающих наибольшее влияние на динамические характеристики этих волн.

Миграция сейсмической активности уже давно не вызывает сомнений. Относительно физических механизмов миграции землетрясений до сих пор существует несколько гипотез и одной из них служит гипотеза о медленных волнах деформации. Сейчас уже понятно, что дальнейшее развитие концепции деформационных волн Земли не может состояться без проведения теоретически подготовленных и целенаправленных экспериментов.

Тогда возникают два вопроса: где искать? и как искать? Первый непосредственно связан с выяснением условий генерации медленных волн деформации, их источников или причин миграции землетрясений. Возможны различные по своей физической природе механизмы возбуждения деформационных волн (см. Приложение), обусловленные неравномерностью относительного смещения плит и блоков в разломных зонах земной коры, зонах коллизии и субдукции литосферных плит, неравномерностью вращения Земли, сильными землетрясениями. Не исключена также возможность генерации глобальных деформационных волн при вращении блоков и микроплит. Наиболее подходящими для этого, по-видимому, являются зоны интенсивного растяжения земной коры (литосферы). Например, в [69] приводятся данные, что при деформации растяжением крупнозернистого алюминия на 5—10 % в поворотах участвуют 70—80 % общего количества выделенных ячеек. Согласно [58, 59], именно повороты блоков (фрагментов среды) могут генерировать тектонические волны.

Ответ на второй вопрос зависит от предположения о типе волн деформации (гармонические, уединенные или автоволны) и выбора прямых или косвенных методов измерений. Необходимо уделить особое внимание тщательному поиску и разработке такого типа детекторов деформационных волн Земли, которые могли бы эффективно регистрировать эти волны.

Современное состояние проблемы генерации и детектирования деформационных (тектонических) волн как в теории, так и в области эксперимента остается пока сложным. Существуют огромные трудности даже в корректной постановке задачи определения и переноса энергии деформационных волн [70], хотя уже ясно, что распространение и перераспределение основной энергии деформационного процесса связано с медленными движениями [68].

Проведенный теоретический анализ концепции деформационных волн Земли показывает, что в настоящее время процессы, вследствие которых эти волны возбуждаются, нельзя считать окончательно известными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 04-05-97001).

Таблица 1. Глобальные тектонические волны

№ п/п	Название волны	Краткое определение; авторская трактовка термина	Форма проявления волн; способ регистрации	Динамическая характеристика волн; источник; предлагаемый физический механизм генерации и эволюции волн	Лит. источник
1	Волны разупрочнения	Расширение зоны пониженной прочности, первоначально возникшей в очаге; спусковой механизм нового землетрясения. Волны, вызывающие усиление сейсмичности вследствие частичного разрушения среды (нарастание сейсмической активности в периоды между сильными землетрясениями)	Фоновая сейсмичность	Источник волн — сильные землетрясения. Макроскопическая неоднородность среды и наличие градиента прочности является необходимым условием возникновения волны. Существование волны возможно при плотности запасенной в среде энергии ниже некоторого порога, соответствующего лавинообразному разрушению среды	[43]
2	Деформационные волны разгрузки напряжений (stress guide)	Локальные напряжения, возникающие при сжатии и распространяющиеся вдоль поверхности Земли (в литосфере). Горизонтальная диффузия напряжений в тектосфере	—	Двухслойная система литосфера—астеносфера представляет собой действующий волновод напряжений (stress guide). Возмущение посредством диффузионного механизма перемещается на расстояние до 1500 км	[33, 34]
3	D-волны	Гипотетические возмущения, возникающие на разных полюсах Земли под влиянием сильнейших землетрясений и распространяющиеся от полюсов вдоль меридианов	Сильные землетрясения ($M \geq 6$)	$V_D = 16,6$ км/год ($0,15^\circ$ /год). Возникновение сильных землетрясений соответствует локальному минимуму скорости вращения Земли и моменту старта D-волн, идущих от разных полюсов Земли. Физическое обоснование природы D-волн отсутствует	[44—46]
4	Пластические волны	Волны сжатия—разрешения и сдвига, переносящие деформации с величинной, превосходящей предел упругости, и способные содействовать возникновению последующих землетрясений	Возникают на удалении 132 и 172 км от эпицентра сильных землетрясений	Скорость продольной волны равна 60 км/год, поперечной — 33 км/год. Источник — сильные землетрясения ($M \geq 5,75$)	[47]
5	Тектонические волны	Волны дилатационных деформаций, играющие роль триггера или блокиатора землетрясений	Вариации сейсмической активности на разных уровнях глубин. Временной ход сейсмосторостных аномалий	Характерный период $T = 3$ года; длина волны $\lambda = 90$ км; скорость $V = 30$ км/год. Источник — зона субдукции	[11, 12]
6	Уединенные быстрые тектонические волны	Уединенные волны напряжений, глобально охватывающие литосферу и соответствующие миграции сейсмической активности. Медленно перемещающиеся по твердой оболочке Земли фронты деформаций горных массивов	—	$V = 10 - 100$ км/год; $\lambda \sim 100$ км. Эффективная ширина уединенной волны ~ 200 км. Источник — изгиб-сжатие литосферной плиты на астеносферном поверхностном потоке. Энергия подкачки поступает из астеносферного потока (авто-волновой процесс)	[40, 41]

7	Тектонические волны	Малые волновые возмущения в системе литосфера—астеносфера. Распространение динамических возмущений носит солитонный характер	Медленные волнообразные горизонтальные тектонические движения земной коры или литосферы	[48, 49]
8	Тектонические волны	Волны, латерально распространяющиеся в земной коре в субмеридиональном направлении, приводящие в образованию структурных этажей и их складчатости	Закономерности в строении структурных этажей складчатого фундамента вулканогенного пояса. Стратиграфическое скольжение структурных этажей Сихотэ-Алиньской складчатой области	[50]
9	Тектоническая глобальная волна	Волна тектонического сжатия, движущаяся в северо-западном направлении	Данные мониторинга ядерных подземных взрывов в США и СССР (1964—1984 гг.). Время пробега первой продольной волны	[51]
10	Деформационные волны в земной коре	Солитоподобные образования — уединенные локальные возмущения поля обменных волн	Колебательный характер миграции сейсмических обменных границ (МОВЗ)	[14, 15]
11	Тектоническая волна сжатия (волны тектонических напряжений)	Распространение деформации горизонтального сжатия в области с характерным размером более 2000 км (глобальная волна)	Подвиг океанической плиты. Уровень воды в скважинах, геодезические данные	[52]
12	Уединенные тектонические волны поворотной деформации	Тектоническая волна миграции является волной кручения	Прямые фактические данные отсутствуют; косвенными подтверждениями может являться глобальная миграция очагов землетрясений	[53]

Таблица 2. Деформационные волны в разломах

№ п/п	Название волны	Краткое определение; авторская трактовка термина	Форма проявления волн; способ регистрации	Динамическая характеристика волн; источник; предлагаемый механизм генерации и эволюции волн	Лит. источник
1	Криповые волны (creep waves)	Волны напряжений, играющие роль спускового механизма для главных разрывов вдоль северо-восточной окраины Тихого океана	Измерения флуктуаций деформаций вдоль отдельных сегментов разлома ($\Delta \epsilon \sim 10^{-6}$)	Фронт волны перемещается со скоростью $V \sim 10$ км/год и более	[35]
2	Криповая волна напряжения (creep slippage)	Асейсмическое быстрое распространение крипа вдоль тектонических разломов	Данные по криповому скольжению в разломах Центральной Калифорнии	$V \sim 1 - 10$ км/сут	[38]
3	Волны тектонической деформации	Возмущения, распространяющиеся вдоль крупных разломов с севера на юг и связанные с возникновением сильных землетрясений	Пространственно-временная взаимосвязь сильных землетрясений ($M \geq 6,5$) вдоль крупных разломов	$V = 34 - 86$ км/год	[20]
4	Волны сейсмической активности	Волны миграции очагов сильных землетрясений	Миграция эпицентров сильных землетрясений ($M \geq 6,5$) по главному разлому юга Средней Азии	$V = 2 - 5$ км/год. Источник — современная тектоническая активность зон разломов в условиях действия единой региональной системы напряжений при субмеридиональной направленности наибольших сжимающих усилий	[22]
5	Волна деформирования	Последовательное изменение текущего деформированного состояния материала земной коры вследствие локальных перераспределений в поле тектонических напряжений, реализуемых в виде квазиволнового процесса. Миграция в пространстве аномалий упругих свойств материала земной коры	Синусоидальные вариации скоростей продольных и поперечных сейсмических волн, их отклонения и параметров сейсмической деформации	Период $T = 2,75$ года. Фронт аномалий упругих свойств материала земной коры мигрирует в пределах Гарьского района в направлении с востока — северо-востока на запад — юго-запад со скоростью 33 ± 7 км/год	[25]
6	Волны миграции эпицентров	Цепочки землетрясений, объединенных в волны, вызываемые перераспределением напряжений и прочности на соседних частях разлома	Миграция эпицентров крупных землетрясений ($M \geq 5$) вдоль сейсмических швов	$V \sim 40 - 60$ км/год. Расстояние между эпицентрами на одной волне нередко составляет сотни километров. Источник — некоторый фактор, приводящий в действие спусковые механизмы, инициирующие сильные землетрясения. Миграция этого фактора обуславливает миграцию эпицентров	[54]
7	Тектонические волны вдоль глубинных разломов	Уединенные волны напряжений, мигрирующие вдоль разломов литосферы	—	$V \sim 10$ км/год. Природа этих волн, возбуждаемых подвижкой по разлому на контакте литосферных плит, связана с вязкоупругими свойствами астеносферы и ее реакцией на продольное сжатие и изгиб литосферы	[55]

8	Волны сейсмогеодинамической активизации, S -волны, геоны	Уединенные волны напряжений и деформаций, которые распространяются вдоль межблочных швов, деформируя их, образуя в дислокационных узлах разнообразные зацепы и провоцируя возникновение в них очагов землетрясений. Геоны — это структурно-устойчивая самоорганизующаяся дислокационная полужесткость вдоль разломов литосферы	Упорядоченная миграция сейсмической активизации в виде сильных землетрясений	Протяженность геона $\lambda_g \sim 10 - 100$ км; скорость $V_g \sim 10 - 100$ км/год; продолжительность действия $\tau_g \sim 1 - 10$ лет; распространяется на расстояния в $10^2 - 10^3$ км; величина вызываемых относительных деформаций $\epsilon_g \leq 10^{-6}$. Источник — процесс перераспределения упругой энергии в блоках земной коры и литосферы в результате межблочных и быстрых тектонических движений разного масштаба	[56, 57]
9	Длиннопериодные деформационные волны	Распространение некоторого возмущения поля невязок вдоль направления $S3-JOB$ — эффект перемещения волн объемной деформации	Временные вариации скоростей сейсмических волн; относительные вариации невязок	$V \sim 40$ км/год; $\lambda \sim 60 - 70$ км. Вероятный источник — переупаковка блоковой структуры среды	[26]
10	Сверхдлиннопериодные волновые деформации	Сверхдлиннопериодные медленно распространяющиеся колебания упругой литосферы, подстилаемой астеносферой	Временные вариации времени пробега, их невязок и скоростей сейсмических волн; светодоальномерные измерения	$V \sim 30 - 50$ км/год; $\lambda \sim 70 - 80$ км; $T \sim 3 - 5$ лет. Волна распространяется по коридору шириной ~ 100 км. В общем случае скорость распространения $V \sim n \cdot 10$ км/год; частота $f \sim n \cdot 10^{-7}$ Гц; длина волны $\lambda \sim n \cdot 10$ км ($n = 1, 2, 3, \dots$). Источник — неравномерность в движении литосферных плит	[9, 42]
11	Волны быстрых предвестников	Миграция аномалий геофизических полей, предвещающая землетрясения. Волны изменения полей	Радоновые, электрокинетические, гидрогеодинамические сигналы, имеющие форму скачков или уединенных волн	$V = 10 - 40$ км/сут. Источник — взаимодействие порового давления и тектонических вон (тектонических деформаций)	[58]
12	Тектонические волны ротационного типа	Медленно распространяющаяся поворотная волна солитонного типа	Направленное перемещение аномалий временного хода в различных геофизических полях	$V \sim 1 - 10$ км/год. Источник — повороты блоков внутри тела разлома геологической среды. Медленная тектоническая волна сопровождается поперечной волной смещения и генерацией двух быстрых импульсов-предвестников со скоростью звука в среде	[59]
13	Волны активизации разломов	Локализованная деформация, распространяющаяся в виде уединенной волны вдоль разлома со скоростью, величина которой «управляет» динамикой процесса скольжения	Косвенные подтверждения: фиксируемые радоновые, электрокинетические и гидрогеодинамические сигналы; быстрая миграция сейсмической активности на обширных территориях после сильных землетрясений	Генерируемая волна распространяется вдоль разлома со скоростью $V_a \sim 1 - 10$ км/сут. Прохождение уединенной волны ослабляет контакт и приводит к динамической подвижке в разломе. Источник — локальные деформационные эффекты, связанные с понижением трения в контактах бортов разломов	[60, 61]

ЛИТЕРАТУРА

1. **Richter E.F.** Elementary seismology. San Francisco, W.H. Freeman and Co., 1958, 768 p.
2. **Mogi K.** Migration of seismic activity // Bull. Earth Res. Inst. Tokyo Univ., 1968, v. 46, p. 53—74.
3. **Morgan W.J.** Rises, trenches, great faults and crustal blocks // J. Geophys. Res., 1968, v. 73, № 6, p. 1959—1982.
4. **Le Pichon X.** Sea-floor spreading and continental drift // J. Geophys. Res., 1968, v. 73, № 12, p. 3661—3697.
5. **Isacks B., Oliver J., Sykes L.R.** Seismology and new global tectonics // J. Geophys. Res., 1968, v. 73, № 18, p. 5855—5899.
6. **Schallamach A.** How does rubber slide? // Wear, 1971, v. 17, p. 301—312.
7. **Comninou M., Dundurs J.** Elastic interface waves involving separation // J. Appl. Mech., 1977, v. 44, № 6, p. 222—226.
8. **Соболев Г.А.** Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 392 с.
9. **Невский М.В., Фьюз Г.С., Морозова Л.А.** Распространение деформационных возмущений: наблюдения и модель // Физические основы сейсмического метода. Нетрадиционная геофизика. М., Наука, 1991, с. 39—56.
10. **Нерсесов И.Л., Лукк А.А., Журавлев В.И., Галаганов О.Н.** О распространении деформационных волн в земной коре юга Средней Азии // Физика Земли, 1990, № 5, с. 102—112.
11. **Маламуд А.С., Николаевский В.Н.** Периодичность Памиро-Гиндукушских землетрясений и тектонические волны в субдуктируемых литосферных плитах // Докл. АН СССР, 1983, т. 269, № 5, с. 1075—1078.
12. **Маламуд А.С., Николаевский В.Н.** Цикличность сеймотектонических событий на краях Индийской литосферной плиты // Докл. АН СССР, 1985, т. 282, № 6, с. 1333—1337.
13. **Маламуд А.С., Николаевский В.Н.** Активизация мантийного разлома под Гиндукушем в 1983—1985 гг. // Докл. АН СССР, 1989, т. 308, № 2, с. 324—328.
14. **Базавлук Т.А., Юдахин Ф.Н.** Деформационные волны в земной коре Тянь-Шаня по сейсмологическим данным // Докл. РАН, 1993, т. 329, № 5, с. 565—570.
15. **Базавлук Т.А., Юдахин Ф.Н.** Временные изменения обменнообразующих неоднородностей в земной коре Тянь-Шаня // Докл. РАН, 1998, т. 362, № 1, с. 111—113.
16. **Бормотов В.А., Быков В.Г.** Сейсмологический мониторинг деформационного процесса // Тихоокеан. геология, 1999, т. 18, № 6, с. 17—25.
17. **Hill D.P., Johnston M.J.S., Langbein J.O., Bilham R.** Response of Long Valley caldera to the $M_w = 7,3$ Landers, California, Earthquake // J. Geophys. Res., 1995, v. 100, № B7, p. 12985—13005.
18. **Tadokoro K., Ando M., Nishigami K.** Induced earthquakes accompanying the water injection experiment at the Nojima fault zone, Japan: Seismicity and its migration // J. Geophys. Res., 2000, v. 105, № B3, p. 6089—6104.
19. **Барабанов В.Л., Гриневский Л.О., Беликов В.М., Ишанкулиев Г.Л.** О миграции коровых землетрясений // Динамические процессы в геофизической среде. М., Наука, 1994, с. 149—167.
20. **Вилькович Е.В., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И.** Волны тектонических деформаций на крупных разломах // Докл. АН СССР, 1974, т. 219, № 1, с. 77—80.
21. **Кузнецов И.В., Кейлис-Борок В.И.** Взаимосвязь землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса // Докл. РАН, 1997, т. 355, № 3, с. 389—393.
22. **Никонов А.А.** Миграция сильных землетрясений вдоль крупнейших зон разломов Средней Азии // Докл. АН СССР, 1975, т. 225, № 2, с. 306—309.
23. **Stein R.S., Barka A.A., Dieterich J.H.** Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering // Geophys. J. Int., 1997, v. 128, № 3, p. 594—604.
24. **Wood M.D., Allen S.S.** Recurrence of seismic migration along the Central California Segment of the San Andreas fault system // Nature, 1973, v. 244, № 5413, p. 213—215.
25. **Лукк А.А., Нерсесов И.Л.** Вариации во времени различных параметров сеймотектонического процесса // Физика Земли, 1982, № 3, с. 10—27.
26. **Невский М.В., Морозова Л.А., Журба М.Н.** Эффект распространения длиннопериодных деформационных возмущений // Докл. АН СССР, 1987, т. 296, № 5, с. 1090—1093.
27. **Ishii H., Takagi A., Suzuki S.** Characteristic movement of crustal deformation in Northeast Honshu, Japan // Gerlands Beitr. Geophys., 1979, v. 88, № 2, p. 163—169.
28. **Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Киссин И.Г., Милькис М.Р.** Проявления деформационных волн в гидрогеологическом и сейсмическом режимах зоны Передового Копетдагского разлома // Физика Земли, 1988, № 5, с. 21—31.
29. **Kasahara K.** Migration of crustal deformation // Tectonophysics, 1979, v. 52, № 1—4, p. 329—341.

30. **Маламуд А.С., Николаевский В.Н.** Циклы землетрясений и тектонические волны. Душанбе, До-ниш, 1989, 140 с.
31. **Nikolaevskiy V.N.** Tectonic stress migration as nonlinear wave process along earth crust faults // Proce-
ed. of 4th Inter. Workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, Gifu,
Japan, 28 Sept.—2 Oct. 1997 / Eds. T. Adachi, F. Oka and A. Yashima. Rotterdam, A.A.Balkema, 1998,
p. 137—142.
32. **Ружич В.В., Трусков В.А., Черных Е.Н., Смекалин О.П.** Современные движения в зонах раз-
ломов Прибайкалья и механизмы их инициирования // Геология и геофизика, 1999, т. 40, № 3,
с. 360—372.
33. **Elsasser W.M.** Convection and stress propagation in the upper mantle // The Application of Modern
Physics to the Earth and Planetary Interiors / Ed. S.K. Runcorn. N.Y., Wiley, 1969, p. 223—246.
34. **Elsasser W.M.** Two-layer model of upper-mantle circulation // J. Geophys. Res., 1971, v. 76, № 20,
p. 4744—4753.
35. **Savage J.C.** A theory of creep waves propagating along a transform fault // J. Geophys. Res., 1971, v. 76,
№ 8, p. 1954—1966.
36. **Bott M.H.P., Dean D.S.** Stress diffusion from plate boundaries // Nature, 1973, v. 243, № 5406, p. 339—341.
37. **Ida Y.** Slow-moving deformation pulses along tectonic faults // Phys. Earth Planet. Inter., 1974, v. 9,
p. 328—337.
38. **Nason R., Weertman J.** A dislocation theory analysis of fault creep events // J. Geophys. Res., 1973, v. 78,
№ 32, p. 7745—7751.
39. **Anderson D.L.** Accelerated plate tectonics // Science, 1975, v. 187, p. 1077—1079.
40. **Николаевский В.Н.** Механика геоматериалов и землетрясения // Итоги науки и техники. Мех.
деформируем. тверд. тела. М., ВИНТИ, 1983, т. 15, с. 149—230.
41. **Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К.** Теория быстрых тектонических волн // Прикладная матема-
тика и механика, 1985, т. 49, вып. 3, с. 462—469.
42. **Невский М.В.** Сверхдлиннопериодные волны деформаций на границах литосферных плит // Дина-
мические процессы в геофизической среде. М., Наука, 1994, с. 40—55.
43. **Ризниченко Ю.В.** Энергетическая модель сейсмического режима // Физика Земли, 1968, № 5,
с. 3—19.
44. **Губерман Ш.А.** О некоторых закономерностях возникновения землетрясений // Докл. АН СССР,
1975, т. 224, № 3, с. 573—576.
45. **Губерман Ш.А.** D-волны и землетрясения // Вычислительная сейсмология, 1979, вып. 12, с. 158—188.
46. **Губерман Ш.А.** Оправдался ли прогноз землетрясений по D-волнам? // Докл. АН СССР, 1990,
т. 311, № 2, с. 321—325.
47. **Лурманашвили О.В.** Временно-пространственное распределение сильных землетрясений Кавка-
за и возможность взаимосвязи землетрясений через пластические волны // Сообщ. АН Груз. ССР,
1977, т. 87, № 3, с. 601—604.
48. **Дубровский В.А.** Тектонические волны // Физика Земли, 1985, № 1, с. 29—34.
49. **Дубровский В.А., Сергеев В.Н.** Природа тектонических волн // Вопросы нелинейной геологии и
геодинамики. М., Геос, 1998, с. 58—64.
50. **Синюков В.И.** Формации и структура Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса. М.,
Наука, 1986, 160 с.
51. **Люкэ Е.И., Ан В.А., Пасечник И.П.** Обнаружение фронта тектонической глобальной волны при
сейсмическом просвечивании Земли // Докл. АН СССР, 1988, т. 301, № 3, с. 569—573.
52. **Сапрыгин С.М., Василенко Н.Ф., Соловьев В.Н.** Распространение волны тектонических напря-
жений по Евразийской плите в 1978—1983 гг. // Геология и геофизика, 1997, т. 38, № 3, с. 701—709.
53. **Викулин А.В.** Уединенные тектонические волны поворотной деформации как результат вращения
планеты // Геофизический журнал, 2002, т. 24, № 4, с. 90—101.
54. **Вилькович Е.В., Шнирман М.Г.** Волны миграции эпицентров (примеры и модели) // Вычисли-
тельная сейсмология, 1982, вып. 14, с. 27—37.
55. **Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К.** Генерация и распространение тектонических волн вдоль
глубинных разломов // Физика Земли, 1986, № 10, с. 3—13.
56. **Уломов В.И.** Решеточная модель очаговой сейсмичности и прогноз сейсмической опасности //
Узбекский геологический журнал, 1987, № 6, с. 20—25.
57. **Уломов В.И.** Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясе-
ний // Физика Земли, 1993, № 4, с. 43—53.

58. **Николаевский В.Н.** Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Докл. РАН, 1995, т. 341, № 3, с. 403—405.
59. **Михайлов Д.Н., Николаевский В.Н.** Тектонические волны ротационного типа с излучением сейсмических сигналов // Физика Земли, 2000, № 11, с. 3—10.
60. **Быков В.Г.** Волны активизации разломов земной коры // Тихоокеан. геология, 2000, т. 19, № 1, с. 104—108.
61. **Быков В.Г.** Нелинейные волновые процессы в геологических средах. Владивосток, Дальнаука, 2000, 190 с.
62. **Scholz C.H.** A physical interpretation of the Haicheng earthquake prediction // Nature, 1977, v. 267, p. 121—124.
63. **Scholz C.H.** The Mechanics of Earthquake and Faulting (2nd edition). Cambridge, Cambridge University Press, 2002, 471 p.
64. **Lehner F.K., Li V.C., Rice J.R.** Stress diffusion along rupturing plate boundaries // J. Geophys. Res., 1981, v. 86, № B7, p. 6155—6169.
65. **Жадин В.В.** Пространственно-временные связи сильных землетрясений // Физика Земли, 1984, № 1, с. 34—38.
66. **Андросов И.В., Жадин В.В., Поташников И.А.** Пространственно-временная структура миграции землетрясений и сейсмические пояса // Докл. АН СССР, 1989, т. 306, № 6, с. 1339—1342.
67. **Псахье С.Г., Ружич В.В., Смекалин О.П., Шилько Е.В.** Режимы отклика геологических сред при динамических воздействиях // Физическая мезомеханика, 2001, т. 4, № 1, с. 67—71.
68. **Гольдин С.В., Юшин В.И., Ружич В.В., Смекалин О.П.** Медленные движения — миф или реальность? // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород. Красноярск, СибГАУ, 2002, с. 213—220.
69. **Рыбалко Ф.П., Угарова Н.А.** Статистика распределения макроповоротов и сдвиговой деформации при растяжении крупнозернистого алюминия // Физика металлов и металловедение, 1964, т. 18, вып. 6, с. 921—924.
70. **Невский М.В., Артамонов А.М., Ризниченко О.Ю.** Волны деформации и энергетика сейсмичности // Докл. АН СССР, 1991, т. 318, № 2, с. 316—320.

*Рекомендована к печати 18 марта 2005 г.
С.В. Гольдиным*

*Поступила в редакцию
28 июля 2004 г.*