

## **ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ КАК ТРИГГЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ АКТИВИЗАЦИИ РАЗЛОМОВ В СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОНАХ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРЫ**

*С.И. Шерман*

На основе сейсмического мониторинга изучены закономерности возникновения новых очагов землетрясений в областях динамического влияния активных разломов. Последовательное во времени и ориентированное вдоль простирания разлома возникновение новых очагов соответствует физическому определению волнового процесса, а деструкция внутриразломной среды – её дополнительной деформации и активизации разлома. Оценены параметры деформационных волн, их векторы, сделаны выводы об их глубинных уровнях и вероятном генезисе.

### **Введение**

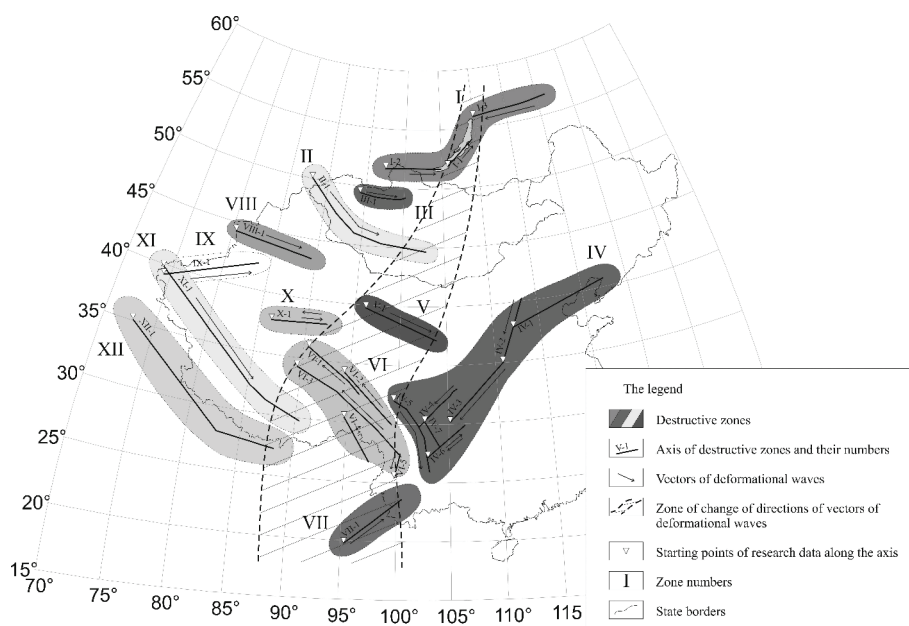
К настоящему времени наличие волновых процессов в литосфере Земли и их роль как триггерных механизмов сейсмического процесса в разной степени значимости обсуждены в целом ряде монографий [Николаевский, Рамазанов, 1986; Соболев, 2011; Хаин, Халилов, 2008; Викулин, 2003; Быков, 2005, и мн. др.] и значительном количестве статей, основополагающими из которых являются работы К. Аллена [Allen, 1969] и К. Касахары [Kasahara, 1979]. Волны, так или иначе связанные с сейсмическим процессом, получили различные названия при описании разными авторами, хотя суть интерпретируемых волновых процессов различается не всегда и не существенно. Чаще всего волновые процессы рассматриваются как триггерные механизмы возбуждения или/и направленной пространственно-временной миграции мест возникновения новых очагов землетрясений. Физика возбуждаемых сейсмических процессов позволяет именовать волны деформационными [Шерман, 2009, 2013]. Для различных регионов мира они характеризуются определенной векторной направленностью, сопоставимыми фазовыми скоростями и периодами, что дает основание рассматривать их в качестве триггерных механизмов, нарушающих метастабильное состояние разломно-блоковой среды литосферы, определяющей сейсмический процесс в ней [Садовский, Болховитинов, Писаренко, 1987; Садовский, Писаренко, 1991]. Ниже дана характеристика деформационных волн на примере ряда сейсмических зон Центральной Азии.

### **Сейсмический мониторинг сейсмоактивных разломов Центральной Азии и деформационные волны**

Активизация разломов – комплексное геолого-структурное понятие. Для анализа сейсмичности активным будем считать разлом, в области динамического влияния которого, за интересующий нас интервал времени, произошло одно или более событий. Принимаемое «возрастное» ограничение означает, что в сейсмической зоне не все разломы одинаково активны, а некоторые могут оказаться

пассивными в заданные нами интервалы времени. Для выделения активных разломов в короткопериодные интервалы времени предложено уравнение и составлена программа, которая позволяет классифицировать сейсмоактивные разломы в течение последних, например 50 лет, по количественному индексу их активизации, в том числе и за на более короткопериодные интервалы времени [Шерман, 2009]. При этом для каждого активного разлома в границах площади его динамического влияния за 50-летний или другой статистически обеспеченный событиями временной промежуток выявляется тенденция пространственно-временной локализации событий. Они выстраиваются в последовательные ряды возникновения новых очагов землетрясений. Их статистические последовательности характеризуются, чаще всего, высокими коэффициентами корреляций, что позволяет интерпретировать формирование очагов как результат воздействия фронтов деформационных волн. В целом однонаправленная тенденция возникновения новых очагов землетрясений вдоль осевой линии разлома интерпретируется как результат движения фронта деформационной волны, которая в качестве триггерного механизма нарушает метастабильное состояние зоны разлома и стимулирует возникновение очагов землетрясений.

По разработанной программе изучены сейсмоактивные разломы сейсмических зон Центральной Азии (рис. 1). Отчетливо выделяются два генеральных направления векторов движения деформационных волн: с востока на запад и, наоборот – с запада на восток. Их граница, представленная расширяющейся к югу субмеридиональной зоной, проходит примерно в пределах полосы  $105\text{--}108^\circ$  в.д. Она разграничивает Центральную Азию на две громадные области с разной интенсивностью современной сейсмической активизации разрывов: восточную с относительно слабой интенсивностью и западную – высокой интенсивности. Эта полоса раздела совпадает с намеченной Г.Н. Каттерфельдом [1962] по структурным элементам земного шара и названной им естественной границей западного и восточного полушарий Земли. Позже, на базе анализа комплексов геологических и геофизических признаков и контрастным различием в генеральном простирании геологических структур [Комаров и др., 1978] в этих же меридиональных границах на всем протяжении от Северного Ледовитого океана до Индийского выделили Верхояно-Бирманскую зону сочленения Центрально- и Восточноазиатских структур [зона ВЕБИРС]. По мнению авторов она представляет собой достаточно широкую (400–500 км) зону, в которой происходит перестройка одного направления структур на другое, затухают одни и зарождаются другие структуры, в связи с чем имеют место их взаимное наложение и воздействие. Зона Верхояно-Бирманского сочленения рассматривалась Ю.В. Комаровым и соавторами [1978] как естественная граница Центральноазиатского сегмента Азии и Тихоокеанского подвижного пояса, или «является зоной сочленения Атлантического и Тихоокеанского сегментов Земли на Азиатском континенте» [ibidem, стр.23]. Зона заложена, скорее всего, в протерозое и все последующее время вплоть до настоящего остается активной, оказывая влияние на геодинамические процессы, в том числе и на различия сейсмической активности разграничиваемых регионов. Не удивительно, что и на демонстрируемой карте деформационных волн характеризующая меридиональная граница азиатского континента выступает зоной раздела их векторной направленности.



**Рис. 1.** Схема сейсмоактивных деструктивных зон Центральной Азии

Идентичность направленности векторов деформационных волн на большой по площади территории Центральной Азии свидетельствует об их региональных, но, в то же время, разных генетических источниках, для западных и восточных от границы групп сближенных сейсмических зон континентальной литосферы. В то же время для сейсмических зон Центральной Азии характерны общие, сближенные по количественным параметрам фазовые скорости и периоды, а также глубины очагов землетрясений (за исключением редких катастрофических), не превышающих 30–40 км (табл. 1). Приведенные количественные характеристики позволяют рассматривать анализируемый класс деформационных волн как соответствующий третьему глубинному уровню [Sherman, 2013], генерируемому, главным образом, смещениями крупных блоков литосферы. Они, в свою очередь, генерируются подлитосферными движениями масс в астеносферном слое. Эти смещения по схеме В.Н. Николаевского и Т.К. Рамазанова [1986] могут генерировать волновые процессы в литосфере благодаря высокому энергетическому потенциалу смещающихся масс.

### **О других факторах, генерируемых волновыми процессами в литосфере**

В работе А.В. Гулельми и О.Д. Зотова [2013] показано, что колебания Земли с периодом около 54 минут приводят к слабой модуляции сейсмической активности. Ставится задача дальнейшего исследования выделения землетрясений, индуцированных собственными колебаниями Земли.

А.А. Гусев [2013], проводя фрактальный анализ очага землетрясения, показал, что при скольжении по сместителю трещины в очаге возникают временные ускорения с плоскими спектрами с достаточно высокой частотой типа  $\omega^{-2}$ . Автором

Таблица 1

Основные параметры деформационных волн на основе различных методов исследования миграций мест возникновения очагов землетрясений в различных деструктивных зонах континентальной литосферы Азии

Регионы и сейсмические зоны	Параметры деформационных волн				
	Типы волн или сегменты зон	Длина, км	Фазовая скорость, км/год	Период, годы	Магнитуда контролируемых землетрясений
Гималайская подвижная дуга, сейсмические зоны Центральной Азии [Wang, Zhang, 2005]	Major wave Главные волны	1035 ~ 2130	0,442 ~ 0,827 (м/год)	1,25 ~ 4,31 (млн лет)	Не контролируют сильные землетрясения
	Subsidiary wave group Группа движущихся волн	761 ~ 1385	0,237 ~ 3,009 (м/год)	0,404 ~ 3,205 (млн лет)	Возможен в ограниченных случаях контроль сильных землетрясений
	Single subsidiary wave Единичные из группы движущихся волн	347 ~ 480	0,407 ~ 5,172 (м/год)	0,067 ~ 1,179 (млн лет)	Возможен контроль сильных землетрясений
Северо-Анатолийская система разломов	Северо-Анатолийский разлом	645	43	15	Контролируют землетрясения с $M \geq 4.4$
	Восточно-Анатолийский разлом	255	17	15	
	Западная ветвь Северо-Анатолийского разлома	120	8	15	
Байкальская сейсмическая зона	Центральный сегмент	340	17	20	$M = 4.4 \div 6.6$ ( $K = 12 \div 16$ )
	Юго-западный сегмент	640	29	22	$M = 4.4 \div 6.6$ ( $K = 12 \div 16$ )
	Северо-восточный сегмент	360	13	28	$M = 4.4 \div 7.2$ ( $K = 12 \div 17$ )
Сейсмические зоны Центральной Азии	Зона II, Монголия	265	13	21	$M = 3 \div 7.8$ ( $K = 10 \div 18$ )
	Зона V, Китай	182	10	18	$M = 3.5 \div 6.2$ ( $K = 10 \div 14$ )
	Зона VIII, Китай	232	12	19	$M = 3.4 \div 5.8$ ( $K = 10 \div 15$ )
	Зона IX, Китай	139	9	15	$M = 3 \div 7.5$ ( $K = 10 \div 18$ )

разработана кинематическая методика моделирования сейсмических волн, излучаемых очагом землетрясения в широкой полосе частот. Еще раз подтверждается мысль о генерации волн благодаря межблоковым подвижкам на различных иерархических уровнях.

В.В. Адушкин и А.А. Спивак [2012] продемонстрировали широкое распространение на земном шаре микросейсм с частотами меньше  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  Гц. Данные опираются на ежегодное фиксирование около одного миллиона землетрясений с  $M \geq 2$  и более десяти тысяч событий с  $M \geq 4$ . Микросейсмические колебания [Адушкин, Спивак, 2012] способствуют не только накоплению упругой энергии на блоковых неоднородностях земной коры, но и являются триггером её высвобождения. Совершенно естественно, что значительное количество слабых землетрясений в верхних горизонтах земной коры является в большей степени вероятности результатом нарушения динамического равновесия метастабильной разломно-блоковой, кусковатой, среды земной коры благодаря триггерным воздействиям, чем вариациям напряженного состояния.

Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями детально обсуждаются в статьях Г.Г. Кочаряна, В.Н. Костюченко и Д.В. Павлова [2004], Г.Г. Кочаряна и А.Е. Фёдорова [1990] и др. В них рассматривается возможность деформации блочной среды за счет накопления результатов воздействий «ничтожных» по величине силовых полей. Они реализуются благодаря нелинейности деформационных характеристик межблоковых разломных зон в областях малых деформаций [Костюченко, Кочарян, Павлов, 2002]. Показано, что однозначность соотношений «напряжение – перемещение», известное для континуальных сред, в блочной среде не всегда выполняется [Кочарян, Спивак, 2003]. И интегрированные слабые воздействия, и кратковременные динамические воздействия на метастабильную блочную среду способны инициировать медленный деформационный процесс, вклад которого в суммарную величину накопленных деформаций может быть весьма значительным. Изложенное объясняет возможность колебательных и волновых процессов приводить к смещениям блоков и, следовательно, к активизациям межблоковых разрывов.

В ряде публикаций Г.А. Соболева [Соболев, 2004; Соболев, Любушин, 2007; и др.] приводятся примеры появления низкочастотных и сверхнизкочастотных микросейсмических колебаний перед несколькими большими землетрясениями мира. Зафиксированные наблюдения могут рассматриваться как индикаторы присутствия в сейсмическом процессе скрытых периодичностей, которые могут рассматриваться как своеобразные триггерные эффекты сейсмического процесса [Соболев, 2011].

Небезынтересна волновая природа сейсмического процесса, рассматриваемая А.В. Викулиным [2003] на материалах окраины Тихого океана. Она затрагивает активизацию межблоковых разломов в связи с вращательными движениями блоков. Их поворотные движения связаны с вращением Земли. В деталях ротационной модели лежат представления о поворачивающихся в условиях вращающейся планеты «элементарных» сейсмофокальных блоках. В рамках модели показывается, что волны миграции сейсмичности [интенсивности землетрясений], волны деформации и колебания Чандлера тектонически взаимосвязаны. На основе мирового сейсмологического материала устанавливаются корреляционные зависимости между скоростями миграции землетрясений и значениями их магнитуд. Разработана модель очага, соответствующая волновым ротационным свойствам сейсмического процесса. В рамках модели землетрясение является результатом взаимодействия тектонической волны с «элементарным» сейсмофокальным блоком, нарушающим его метастабильное состояние. Таким образом, активизация

межблоковых разломов – есть следствие вращения блоков, во многом, повторяем, взаимосвязанного с вращением планеты. Данные инструментальных наблюдений указывают на наиболее вероятный широкий диапазон угловых скоростей вращения блоков и плит, оцениваемый значениями  $10^{-8}$ – $10^{-6}$  рад/год [Викулин, Иванчин, 2013]. Вводимые параметры и понятия о ротационных волнах как одном из многих других источников, воздействующих на сейсмический процесс волновых процессов в литосфере, безусловно, важны и достойны внимания. При подобной постановке геодинамические режимы Земли как отражение глубинной геодинамики и субдукции на восточной окраине Тихого океана отступают на второй план. В рамках обсуждения вопросов об активизации разломов и деформационных волнах как триггерных механизмах их короткопериодной активности следует учитывать и те вращательные моменты отдельных блоков литосферы, возникающие на фоне скоростных импульсов постоянного вращения Земли.

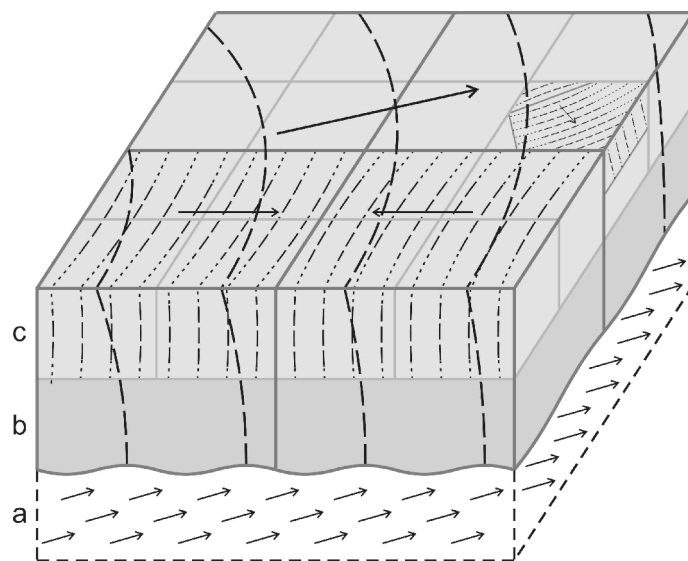
В работе [Кузьмин, 2012] прямыми геодезическими измерениями установлены «межразломные» и «внутриразломные» волны. Большинство эмпирически выявленных характеристик пространственно-временной миграции современных деформаций в разломных зонах наиболее естественно трактовать в рамках современных представлений об автоволновых процессах. Волновой процесс в зонах разломов результат параметрического возбуждения внутриразломной среды малыми воздействиями. Предложена феноменологическая модель формирования автоволновых деформационных процессов.

Изложенные отдельные, существенно отличающиеся по фиксации и методике обработки факты, демонстрирующие роль деформационных волн как оригинальных триггеров селективной активизации разноранговых (от трансрегиональных до локальных) разломов, и возбуждения, их существенно отличающихся по магнитудам сейсмических событий, свидетельствуют о необходимости дальнейшего изучения многогранных волновых процессов в литосфере Земли и их воздействия на метастабильную разломно-блоковую структуру верхней, хрупкой части литосферы.

## Заключение

1. Волновой процесс широко распространен в континентальной литосфере Земли и представлен преимущественно деформационными волнами, генерируемыми различными источниками и охватывающими различные глубинные уровни литосферы (рис. 2). Их схематическое изображение на рисунке показывает различные глубины проникновения волн и их относительный энергетический потенциал. По скорости распространения деформационные волны классифицируются на «медленные волны», распространяющиеся по всему разрезу литосферы со скоростью около 1 км/млн лет, и одиночные или движущиеся деформационные волны, распространяющиеся в верхней, хрупкой части континентальной литосферы со скоростью от километров до десятков километров в год [Sherman, 2013].

2. Деформационные волны нарушают метастабильное состояние разломно-блоковой среды литосферы, стимулируют межблоковые смещения, генерируя в качестве триггерного механизма активизацию разноранговых разломов.



**Рис. 2.** Схема разноранговой разломно-блоковой структуры литосферы

Разноранговые блоки разделены сплошными линиями различной толщины, выделяющими межблоковые разломы различных рангов. Пунктирными линиями выделены фронты волн различных глубинных уровней. Буквами a, b и c соответственно показаны астеносфера, нижняя и верхняя части литосферы. Стрелки – векторы волн различных глубинных уровней

3. Параметры деформационных волн определяют селективную короткопериодную активизацию разломов и закономерности пространственно-временной локализации синхронно проходящих и контролируемых ими процессов.

*Исследования поддержаны грантом РФФИ (12-05-91161-ГФЕН\_a); Программами ОНЗ РАН № 7.7 и Президиума РАН № 4.1.*

### Литература

*Адушкин В.В., Спивак А.А.* Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде // *Физика Земли*. 2012. № 3. С. 3-21.

*Быков В.Г.* Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // *Геология и геофизика*. 2005. Т. 46, № 11. С. 1176–1190.

*Викулин А.В.* Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2003. 151 с.

*Викулин А.В., Иванчин А.Г.* О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013. № 3. С. 67-84.

*Гулельми А.В., Зотов О.Д.* О скрытой околочасовой периодичности землетрясений // *Физика Земли*. 2013. № 1. С. 3-10.

*Гусев А.А.* Фрактальный очаг землетрясения с зоной скольжения порождает временные функции ускорения с плоскими спектрами // *Докл. РАН*. 2013. Т. 448, № 4. С. 465-467.

*Каттерфельд Г.Н.* Лик Земли и его происхождение. Государственное издательство географической литературы. Москва, 1962. 152 с.

*Комаров Ю.В., Беличенко В.Г., Мишарина Л.А., Петров П.А.* Верхояно-Бирманская зона сочленения Центрально- и Восточноазиатских структур [зона ВЕБИРС] // Трансазиатская континентальная зона ВЕБИРС [Оперативная информация]. Иркутск: Восточно-Сибирский филиал СО АН СССР, 1978. С. 5-24.

*Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В.* Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № 1. С. 5-22.

*Кочарян Г.Г., Спивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород // М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 423 с.

*Кочарян Г.Г., Федоров А.Е.* Об особенностях механики сейсмического процесса в блочной геофизической среде // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315, № 6. С. 1345-1349.

*Кузьмин Ю.О.* Деформационные автоволны в разломных зонах // Физика Земли. 2012. № 1. С. 3-19.

*Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К.* Генерация и распространение волн вдоль глубинных разломов // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1986. № 10. С. 3-13.

*Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.

*Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.

*Соболев Г.А.* Вариации микросейм перед сильным землетрясением // Физика Земли. 2004. № 6. С. 3-13.

*Соболев Г.А.* Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН, 2011. 56 с.

*Соболев Г.А., Любушин А.А.* Микросейсмические аномалии перед землетрясением 26 декабря 2004 г. на Суматре // Физика Земли. 2007. № 5. С. 3-16.

*Хаин В.Е., Халилов Э.Н.* Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической активности. Бургас, 2008. 304 с.

*Шерман С.И.* Тектонофизическая модель сейсмической зоны: опыт разработки на примере Байкальской рифтовой системы // Физика Земли. 2009. № 11. С. 8-21.

*Allen C.R.* Active faulting in northern Turkey // Div. Geol. Sci., Californ. Inst. Tech. 1969. P. 32-34.

*Kasahara K.* Migration of crustal deformation // Tectonophysics. 1979. V. 52. № 1-4. P. 329-341.

*Sherman S.I.* Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. V. 4 [2]. P. 83-117.