



<http://dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-1-0092>

ABOUT THE WAVE MECHANISM OF ACTIVATION OF FAULTS IN SEISMIC ZONES OF THE LITHOSPHERE IN MONGOLIA

M. G. Mel'nikov

Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The study is focused on earthquake migrations along active faults in seismic zones of Mongolia. The earthquake migrations are interpreted as a result of the influence of deformational waves. Vector velocities and other parameters of the deformational waves are studied. Based on data from large-scale maps, local faults are compared, and differences and similarities of parameters of waves related to faults of different ranks are described.

Key words: deformational waves, earthquake, seismic zone, active faults, Mongolia.

Recommended by V.A. San'kov

Citation: Mel'nikov M.G., 2013. About the wave mechanism of activation of faults in seismic zones of the lithosphere in Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (1), 69–81. doi:10.5800/GT-2013-4-1-0092.

О ВОЛНОВОМ МЕХАНИЗМЕ АКТИВИЗАЦИИ РАЗЛОМОВ В СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОНАХ ЛИТОСФЕРЫ МОНГОЛИИ

М. Г. Мельников

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Проведено исследование миграций землетрясений вдоль активных разломов в сейсмических зонах Монголии, которые интерпретируются как результат воздействия деформационных волн, изучены их векторные скорости и другие параметры. Проведено сравнительное изучение локальных разломов по крупномасштабным картографическим материалам, охарактеризованы различия и общность параметров волн в разломах различных рангов.

Ключевые слова: деформационные волны, землетрясение, сейсмическая зона, активные разломы, параметры, Монголия.

1. ВВЕДЕНИЕ

История изучения направленной миграции очагов землетрясений вдоль разломов земной коры насчитывает около пятидесяти лет, и сейчас этот вопрос входит в число теоретически и социально важных исследу-

ований [Vikulin, 2003; Vykov, 2005; Sherman, Gorbunova, 2008]. По его решению опубликовано множество материалов, но вопрос по-прежнему остается открытым из-за многочисленных геолого-геофизических факторов, вызывающих сейсмический процесс, и многовариантности причин, контролирующих простран-

венно-временную локализацию ощутимых землетрясений в конкретных сейсмических зонах.

Задачей статьи ставится детальная обработка данных по сейсмическому процессу на территории Монголии, выявление тенденций векторной направленности миграции очагов землетрясений, установление общей тенденции для данного региона, анализ полученных параметров деформационных волн и изучение их взаимосвязей.

2. ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Для объяснения миграции очагов землетрясений и пространственно-временной периодичности их распределения в литературу введено понятие деформационных волн. Фундаментом концепции деформационных волн являются результаты исследований пространственно-временного распределения землетрясений в различных регионах Земли, процессов медленного деформирования земной коры и перемещения аномалий геофизических полей вблизи зон разломов [Bykov, 2005; Sherman, 2009].

В работах [Nikolaevsky, Ramazanov, 1985; Nikolaevsky, 1991] объясняется происхождение деформационных волн.

Новый метод классификации сейсмоактивных разломов предложен в работе [Sherman et al., 2005b], в которой также введены параметры количественной и магнитудной характеристик разломов. Благодаря этим новым параметрам были выявлены дополнительные геодинамические свойства разломов, а также вероятные волновые источники их активизаций в пределах коротких промежутков времени [Sherman, Gorbunova, 2008].

Активизация разломов вызывается медленными деформационными волнами, нарушающими неустойчивое динамическое состояние разломной зоны. Для многих сейсмоактивных разломов такие нарушения динамического равновесия фиксируются несколько раз, то есть активизация разломов происходит периодически с относительно высокой, в масштабах реального времени, частотой [Sherman, 2009; Sherman et al., 2012b].

Хорошо известно, что преобладающее количество очагов землетрясений приурочено к зонам разломов и областям их динамического влияния [Sherman et al., 1983]. Разломы являются основными структурами, контролирующими сейсмический процесс и эпицентральное поле землетрясений в сейсмических зонах континентальной литосферы [Sherman, 2009]. Нами проведена оценка сейсмической активности и небольшое уточнение положения главных сейсмоактивных разломов территории Монголии. Использованы различные геологические, сеймотектонические карты и карты сеймотектоники МНР, составленные в разные годы различными исследователями (Карта сеймотек-

тоники МНР [Khil'ko et al., 1985], Карта современной геодинамики Азии [Levi et al., 2007] и карты, предоставленные Исследовательским центром астрономии и геофизики Монгольской академии наук [Gangaadorzh, 2010]).

Для выбранных разломов оценены области динамического влияния [Sherman et al., 1983] и по методике [Sherman, Gorbunova, 2008] проведено исследование направления миграций очагов землетрясений.

3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПО РАЗЛОМАМ ТЕРРИТОРИИ МОНГОЛИИ

Короткопериодная активизация разрывов в реальном времени и пространственно-временная локализация очагов землетрясений [Sherman et al., 2005a] возбуждаются и контролируются деформационными волнами, которые рассматриваются как триггерный механизм нарушения метастабильного состояния разломно-блоковой среды литосферы, находящейся под постоянным воздействием регионального поля напряжений. Принято, что активизация происходит при прохождении через разлом фронта волны.

Обработка данных по сейсмичности и разломной тектонике невозможна без специальных современных ГИС-технологий, так как каталоги землетрясений содержат огромное количество данных и обработка их без использования специальных программ была бы слишком трудоемкой. В связи с этим С.И. Шерманом и Е.А. Горбуновой был разработан специальный программный пакет Digital Faults [Gorbunova, Sherman, 2012], который позволяет импортировать необходимую информацию из баз данных (БД) по разломной тектонике, определять длины разломов и области их активного динамического влияния (ОАДВ), импортировать данные из БД по сейсмичности, оценивать местоположения землетрясений в ОАДВ конкретных разрывов, а также экспортировать и сохранять материалы в виде таблиц и графиков в координатах «время-место» для конкретных разломов, определять параметры волн и давать оценку достоверности линий регрессий.

На графиках «время-место» по оси абсцисс откладываются длины разломов, так чтобы отметка «0» соответствовала западной оконечности разлома, по оси ординат – время событий (рис. 1). Затем выявляются последовательности событий, проходящие по всей длине разлома, в пределах заданной области динамического влияния. Устанавливается теснота корреляционной связи для выборки «время-место локализации». Определяются параметры деформационных волн по методике, описанной в работе [Sherman, Gorbunova, 2008]. В случае нескольких возможных вариантов интерпретации положения линии регрессии выбирается тот, у которого наиболее высокие коэффициенты корреляции. Каждая такая регрессионная прямая соответ-

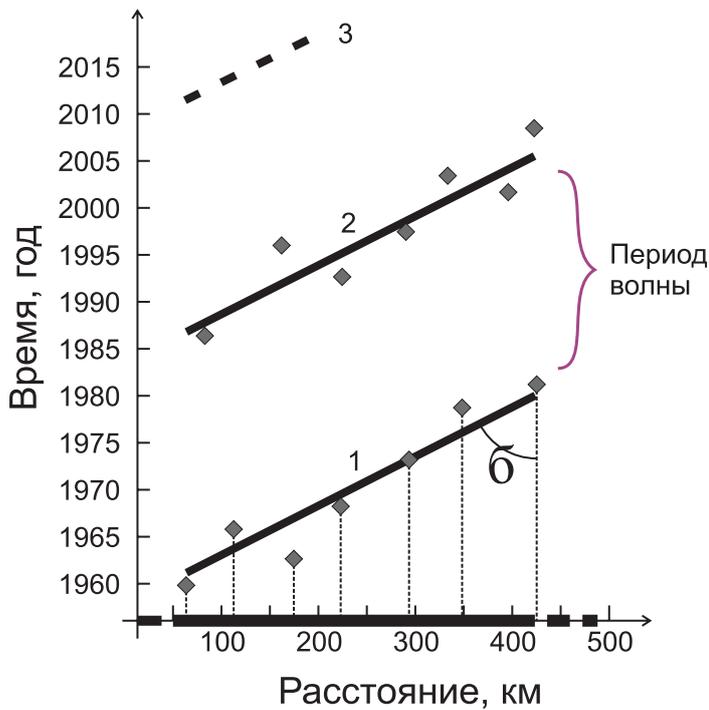


Рис. 1. Методика построения графика для определения вектора миграции очагов землетрясений по простиранию разлома и оценки средней векторной скорости деформационной волны их возбуждения. На оси абсцисс жирной линией показана длина активизированной части разлома, пунктирной – его полная длина. Квадратиками показаны сейсмические события в соответствии с их локализацией на разломе и временем свершения события. Цифры у трендов – временная последовательность прохождения фронтов деформационных волн [Gorbunova, Sherman, 2012].

Fig. 1. The method of graphics to determine vectors of earthquake foci migration along faults and to estimate average velocities of deformation waves of excitation. On the X-axis, the thick line shows the length of the activated fault, and the dashed line shows the full length of the fault. Squares show seismic events according to their locations at the fault and the time of their occurrence. Numbers on the trends show the temporal sequence of occurrence of deformation waves' fronts [Gorbunova, Sherman, 2012].

ствует прохождению через разлом фронта волны, вызвавшего его активизацию. Чаще всего по одному разлому фиксируется несколько линий активизаций, субпараллельных друг другу, что говорит о периодичности процесса прохождения волн через конкретные разломы и, следовательно, о нескольких периодах их активизации.

Как показано в работах [Sherman, Gorbunova, 2008; Gorbunova, Sherman, 2012], наклон линий тренда графика отражает направление распространения очагов землетрясений вдоль простирания разлома: с левого фланга к правому или наоборот; тангенс угла наклона линий трендов (α) показывает среднюю скорость миграции очагов или скорость деформационной волны в рассматриваемом разломе.

В результате обработки базы данных по 21 разлому, с которыми связано около 2300 землетрясений с маг-

нитудой от 3 до 8, получены новые данные по активизации разломов и векторной направленности деформационных волн и их параметрам.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Миграция очагов землетрясений в сейсмических зонах, деформационные процессы в разломных зонах обсуждаются многими исследователями [Kasahara, 1979; Vykov, 2005; Ulomov, 1993; Malamud, Nikolaevsky, 1989].

В соответствии с работой [Sherman, Zlogodukhova, 2011], сейсмическая зона – это территория в тектонически-активной области, ограниченная контуром, внутри которого за заданный интервал времени количество сейсмических событий с $M > 3$ ($K > 9$) выше первого десятка (или не ниже определенной статистически значимой величины). Внешний контур сейсмической зоны должен проводиться по изолинии, соответствующей плотности ощутимых землетрясений с $M \geq 3$ не менее трех событий на заданную площадь. Сейсмическая зона может рассматриваться как «самостоятельная структурная область литосферы. Ее образуют линейно вытянутая зона современной деструкции литосферы (концентратор наиболее сильных землетрясений) и окружающие зону разноранговые разломы, многие из которых одно- или многократно в реальном времени (месяцы, годы, десятилетия) селективно вовлекались в кратковременный процесс активизации» [Sherman, Zlogodukhova, 2011].

На территории Монголии выделяется ряд сейсмических зон, которые были исследованы в работах предшественников [Khil'ko et al., 1985; Gangaadorzh, 2010; Levi et al., 1996] и часть из которых была использована нами при анализе: Монголо-Алтайская (зона I), Болнайская (зона II), Хубсугульская (зона III), Гоби-Алтайская (зона IV) (рис. 2).

По основным сегментам этих зон и их активным разломам нами была изучена специфика пространственно-временных локализаций очагов землетрясений, соответствующая, как принято в концепции [Sherman, 2009], скорости продвижения деформационных волн в соответствующих сегментах и разломах.

С использованием карты (рис. 3) были изучены три крупных разлома из разных сейсмических зон Монголии (обозначены синим цветом на рис. 3). Для определения принадлежности сейсмических событий к конкретным разломам принимались области их динамического влияния шириной 20 км в обе стороны от обозначенных на карте осевых линий разломов. Выборка для составления графиков и оценки параметров деформационных волн и периодичности активизаций разломов содержит события с $K \geq 10$ ($M \geq 3.1$). Графики «время-место» для данных разломов приведены на рис. 4. При выявлении пространственных закономерностей локализации событий на графиках рассмат-

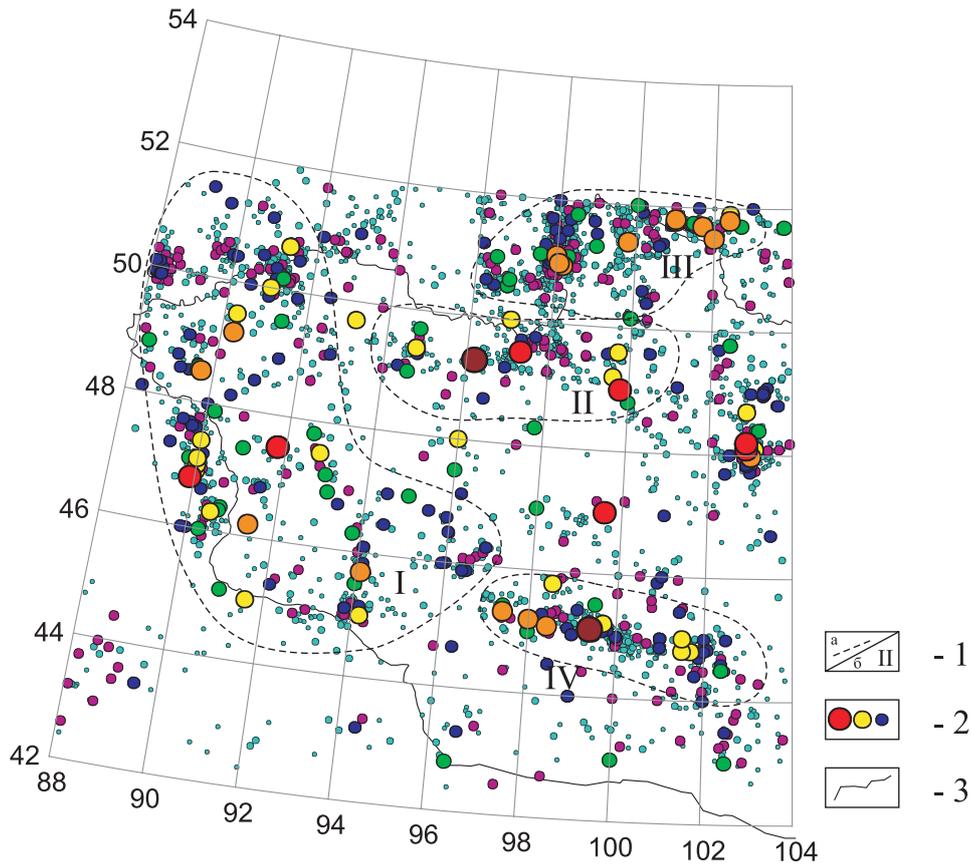


Рис. 2. Карта сейсмических зон Монголии в соответствии с [Khil'ko et al., 1985; Gangaadorzh, 2010]. 1 – границы деструктивных зон Монголии (а) и нумерация их сейсмических зон (б); 2 – сейсмические события, цветом и размером показан их энергетический класс (от больших красных до маленьких бирюзовых – соответственно от 18-го до 10-го класса); 3 – государственная граница Монголии.

Fig. 2. The map of seismic zones of Mongolia (according to [Khil'ko et al., 1985; Gangaadorzh, 2010]). 1 – borders of destructive zones of Mongolia (a) and numbers of seismic zones (б); 2 – seismic events; energy classes are shown by size and colours (from large red to small turquoise, respectively, from the 18th to 10th classes); 3 – the state border of Mongolia.

ривались различные возможные варианты их построения, но для оценки параметров волн были выбраны последовательности с наибольшими коэффициентами детерминации. Серыми точками на графиках обозначены события, которые были исключены из анализа. Так, к примеру, в левой части графика 2b (рис. 4) имеется группа событий, которую не удалось интерпретировать с точки зрения миграции, так как миграции в этом случае нет. События здесь происходят в одном и том же участке разлома, но равномерно распределены во времени. Эти события инициируются узлом пересечения разломов на местности и «выпадают» из стандартного анализа соотношения «время-место». Также из анализа исключена группа событий в правой части того же графика, которая могла бы интерпретироваться как волна (как показано пунктиром), но в этом случае на промежутке 450–600 км должна быть еще одна последовательность (также показана пунктиром), тогда бы сохранилось значение длины волны и периода для всего графика. Однако на этом промежутке событий слишком мало, и можно только предполагать на-

личие волны, которая просто не отразилась на разломе в виде миграционной последовательности, скорее всего, из-за неполноты данных по фиксации слабых по энергии очагов землетрясений.

Пунктирными линиями на графиках показаны интерполяции и экстраполяции линий активизаций, для которых недостаточно данных, чтобы построить линию тренда.

Для разломов с высокой корреляцией экспериментальных данных «время-место» были составлены таблицы параметров деформационных волн (табл. 1, 2).

Средняя скорость деформационных волн для разломов из табл. 1 – 6.5 км/год, средняя длина волны – 150 км; в целом направление волн для данных разломов – с запада на восток, что согласуется с соседними регионами, для которых были проведены подобные исследования [Sherman et al., 2012a].

Существуют мнения, что миграция очагов землетрясений связана с продвижением фронта деформации вдоль активных разломов [Novopashina, San'kov, 2010]. Скорости миграций здесь варьируются от первых ки-

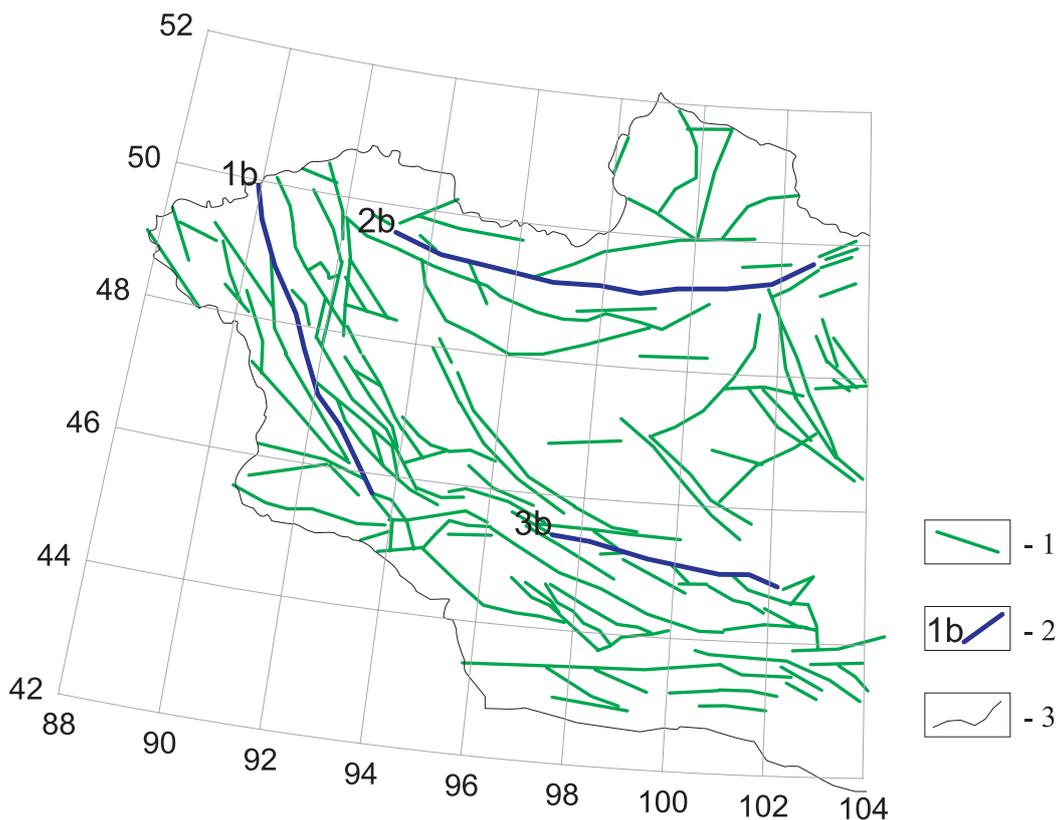


Рис. 3. Активные разломы Монголии. (Выкопировка из Карты современной геодинамики Азии [Levi et al., 2007] с использованием материалов [Khil'ko et al., 1985] и авторскими добавлениями). 1 – активные разломы Монголии; 2 – активные разломы, выбранные для анализа и их номера; 3 – государственная граница Монголии.

Fig. 3. Active faults of Mongolia (this section is copied from the map of modern geodynamics of Asia published in [Levi et al., 2007]; data from [Khil'ko et al., 1985] and the author's data are included). 1 – active faults in Mongolia; 2 – active faults selected for analysis and their numbers; 3 – the state border of Mongolia.

лометров до первых десятков километров в год, что в целом согласуется с результатами, полученными в настоящей работе и в работах других авторов.

Для более детального анализа параметров деформационных волн в зонах сопутствующих разломам нами проведено изучение их параметров по более детальной и обновленной более поздними исследованиями карте (рис. 5). На ней видно, что изученные выше разломы принадлежат к различным сейсмическим зонам (I, II, IV). Проведено изучение параметров деформационных волн для сопутствующих и оперяющих разломов (рис. 5). Полученные параметры интегрированы в таблицах 3 и 4 [Melnikov, Gangaadorzh, 2012].

На рис. 5 стрелками показаны направления деформационных волн для каждого разлома. Преобладающее направление во всех сейсмических зонах, как видно из рисунка, с запада на восток.

Для рассматриваемых разломов были построены графики взаимосвязей их параметров и параметров волн (рис. 6).

Из графиков видно, что существует линейная зависимость между длинами разломов и длинами волн.

Зависимость между скоростями волн и направлениями разломов не прослеживается, так же как и между периодами волн и длинами разломов.

Линейную зависимость «длина волны/длина разлома» (рис. 6) можно объяснить тем, что при детальном анализе были использованы разломы с длинами разного порядка. На графиках более протяженных разломов (более 200 км) (рис. 7, а) фиксируются «регрессионные цепочки» с достаточно высокими скоростями и длинами волн (серые линии). В выделенной части этого графика (рис. 7, а) в более крупном масштабе видна измененная картина: тренды с достаточно высокими коэффициентами детерминации, но более низкими скоростями (рис. 7, б, черные линии). В данном случае скорость равна 1.4 км/год, в отличие от мелкомасштабной ситуации первоначального оригинального графика для данного разлома (см. рис. 4, разлом 2b), где скорость была 6 км/год (см. табл. 1). В случае, если рассматривается изначально короткий разлом (менее 200 км), зафиксировать более быстрые волны и увидеть полную картину невозможно, так как нельзя проанализировать ситуацию, сложившуюся за пределами его окончаний. В связи с этим, переходя к более

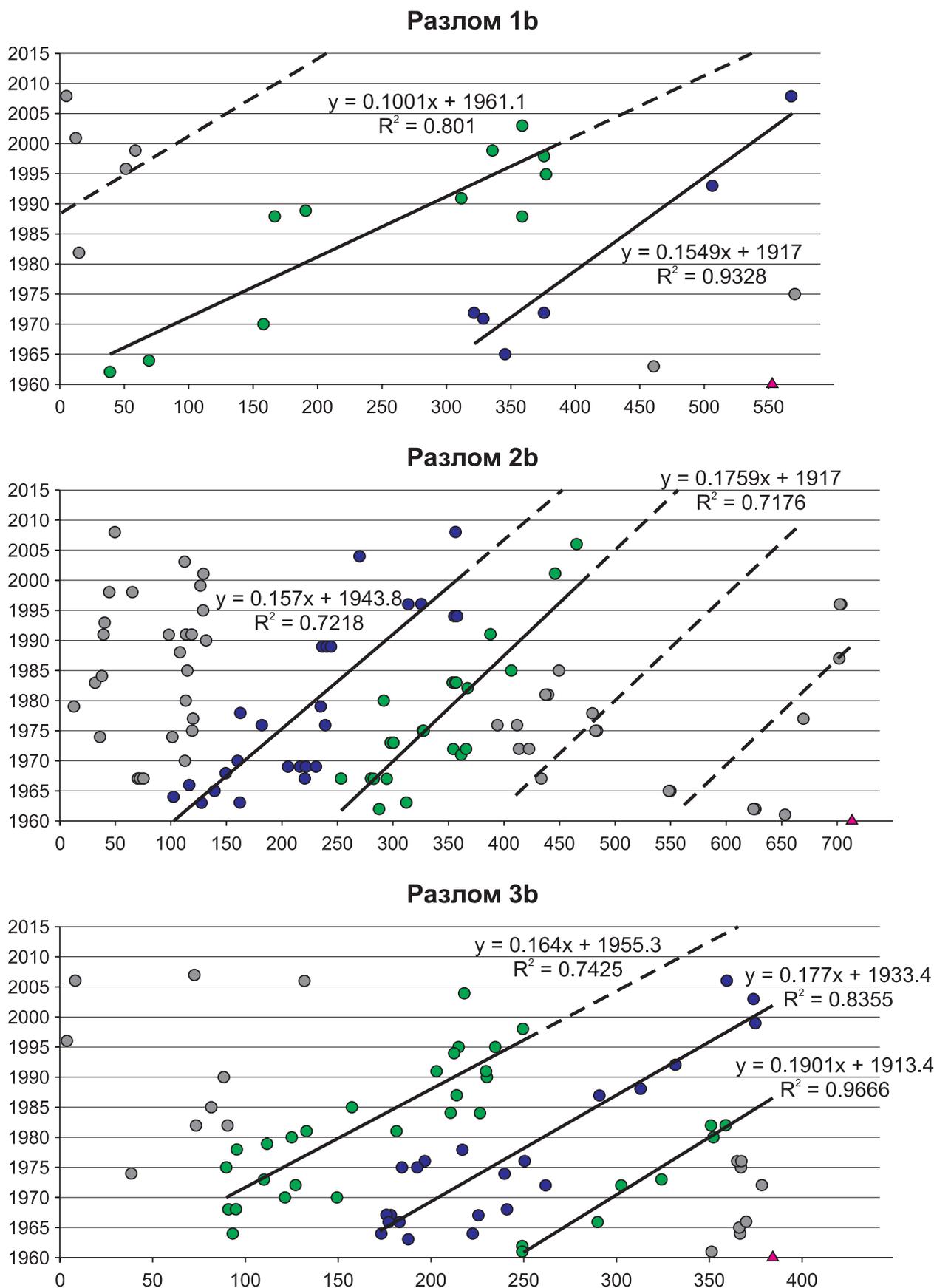


Рис. 4. Графики в координатах «время-место» для выбранных активных разломов Монголии (см. рис. 3). Зеленым и синим цветом обозначена принадлежность событий к определенной линии тренда. Серые точки – события, исключенные из анализа.

Fig. 4. Time-location curves for selected active faults of Mongolia (see Fig. 3). Events marked in green and blue belong to corresponding trends. Grey dots show events excluded from the analysis.

Т а б л и ц а 1. Параметры деформационных волн – триггерного механизма возбуждения сейсмических событий Монголии

Table 1. Parameters of deformation waves acting as the trigger mechanism of seismic events in Mongolia

Номер разлома (протяженность, км)	Простираение	Кол-во сейсмических событий, используемых в анализе, и диапазон магнитуд (классов)	Длина волны (км)	Скорость волны (км/год)	Период волны (год)
1 (552)	340°	24, M=3.0–4.4 (K=10–12)	200	8 ССЗ – ЮЮВ	25
2 (713)	90°	100, M=3.0–6.1 (K=10–15)	126	6 3 – В	21
3 (384)	280°	74, M=3.5–5.7 (K=11–14)	108	6 3 – В	18

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты детерминации и уравнения регрессии графиков «время-место» разломов Монголии

Table 2. Coefficients of determination and time-location regression equation for faults of Mongolia

Номер разлома (протяженность, км)	Кол-во сейсмических событий, используемых в анализе, и диапазон магнитуд (классов)	Количество временных совокупностей (периодов)	Коэффициент детерминации	Уравнение регрессии
1 (552)	24, M=3.0–4.4 (K=10–12)	2	$R_1^2=0.93$ $R_2^2=0.8$	$t = (0.1549 \cdot \ell + 1917)$ $t = (0.1001 \cdot \ell + 1961.1)$
2 (713)	100, M=3.0–6.1 (K=10–15)	2	$R_1^2=0.72$ $R_2^2=0.72$	$t = (0.1759 \cdot \ell + 1917)$ $t = (0.157 \cdot \ell + 1943.8)$
3 (384)	74, M=3.5–5.7 (K=11–14)	3	$R_1^2=0.97$ $R_2^2=0.84$ $R_3^2=0.74$	$t = (0.1901 \cdot \ell + 1913.4)$ $t = (0.177 \cdot \ell + 1933.9)$ $t = (0.164 \cdot \ell + 1955.3)$

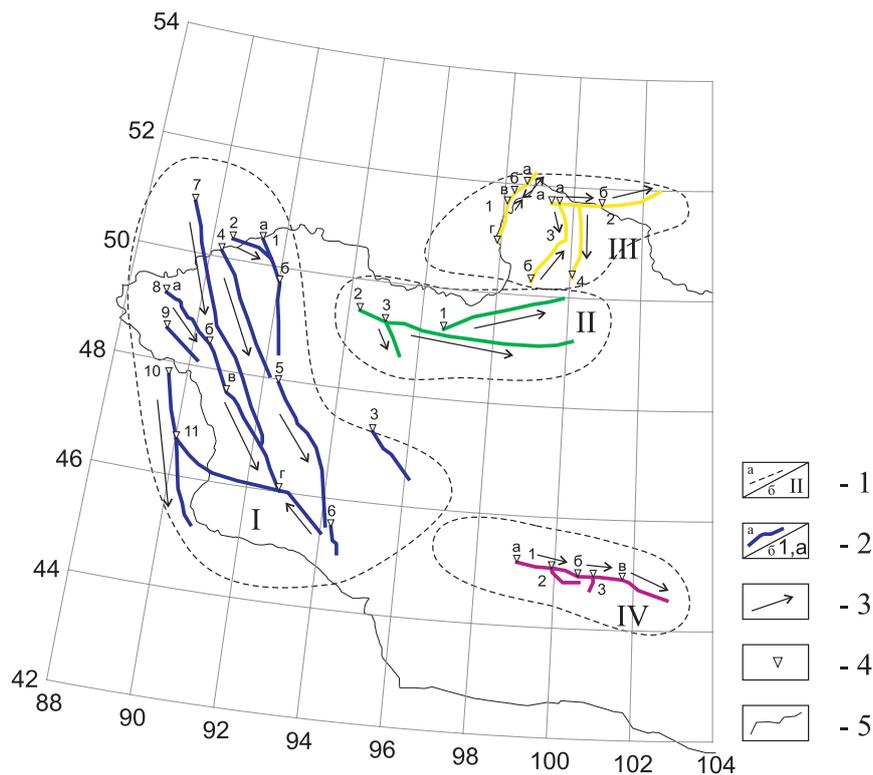


Рис. 5. Карта деструктивных зон Монголии. 1 – границы деструктивных зон Монголии (а) и нумерация их сейсмических зон (б); 2 – активные разломы в сейсмических зонах (а), номера разломов и обозначение их сегментов (б), цветом показана принадлежность к определенной сейсмической зоне; 3 – вектор направленности деформационных волн; 4 – начальная точка расчетных данных по разлому; 5 – государственная граница Монголии.

Fig. 5. The map of destructive zones of Mongolia. 1 – borders of destructive zones of Mongolia (a) and the numbers of seismic zones (б); 2 – active faults in seismic zones (a), number of faults and their segments (б); colours correspond to seismic zones; 3 – vector showing direction of deformation waves; 4 – starting point of estimations for the fault; 5 – the state border of Mongolia.

Т а б л и ц а 3. Параметры деформационных волн – триггерного механизма возбуждения сейсмических событий Монголии

Table 3. Parameters of deformation waves acting as the trigger mechanism of seismic events in Mongolia

Номер разлома (протяженность, км)	Простираение	Кол-во сейсмических событий, используемых в анализе, и диапазон магнитуд (классов)	Длина волны (км)	Скорость волны (км/год)	Период волны (год)
I-2(1) (86)	300°	133, M=3.0–5.5 (K=10–14)	31	2 3СЗ–БЮВ	17
I-2(2) (86)	300°	133, M=3.0–5.5 (K=10–14)	22	1 БЮВ–3СЗ	25
I-4(1) (271)	340°	18, M=3–5 (K=10–13)	79	2 СЗ–ЮВ	33
I-4(2) (271)	340°	18, M=3–5 (K=10–13)	184	5 ЮВ–СЗ	40
I-5 (312)	335°	46, M=3.0–5.5 (K=10–14)	114	4 СЗ–ЮВ	31
I-7 (517)	320°	52, M=3.0–4.6 (K=10–12)	142	5 ССЗ–ЮЮВ	33
I-8б (143)	320°	14, M=3.1–4.9 (K=10–13)	135	5 СЗ–ЮВ	27
I-8в (235)	325°	13, M=3.0–4.4 (K=10–12)	-	3 СЗ–ЮВ	-
I-8г (115)	300°	17, M=3.0–4.4 (K=10–12)	-	2 ЮВ–СЗ	-
I-10(1) (309)	350°	60, M=3–6 (K=10–15)	73	3 ССЗ–ЮЮВ	23
I-10(2) (309)	350°	60, M=3–6 (K=10–15)	86	4 ЮЮВ–ССЗ	24
II-1 (247)	75°	134, M=3.0–4.9 (K=10–13)	54	4 ЗЮЗ–ВСВ	16
II-2 (434)	270°	74, M=3–6 (K=10–15)	157	6 З–В	26
II-3(1) (74)	340°	13, M=3.0–4.4 (K=10–12)	-	1 СЗ–ЮВ	-
II-3(2) (74)	340°	13, M=3.0–4.4 (K=10–12)	-	1 ЮВ–СЗ	-
III-1а (27)	40°	14, M=3.2–4.2 (K=10–12)	-	1 ЮЗ–СВ	-
III-1б (33)	55°	54, M=3.0–5.5 (K=10–14)	10	0.5 СВ–ЮЗ	25
III-1в (24)	30°	62, M=3.0–5.5 (K=10–14)	19	1 ЮЗ–СВ	26
III-2а (102)	280°	19, M=3.6–4.4 (K=11–12)	24	0.5 З–В	52
III-2б (121)	75°	41, M=3.6–5.3 (K=11–14)	40	1 З–В	35
III-3а (76)	340°	50, M=3.0–4.4 (K=10–12)	33	2 ССЗ–ЮЮВ	21
III-3б (111)	45°	31, M=3.0–4.5 (K=10–12)	-	2 ЮВ–СВ	-
III-4 (150)	0°	22, M=3.0–4.9 (K=10–13)	33	1 С–Ю	23
IV-1а (127)	290°	147, M=3.0–7.9 (K=10–18)	34	1 3СЗ–БЮВ	26
IV-1б(1) (88)	280°	67, M=3–6 (K=10–15)	23	1 3СЗ–БЮВ	22
IV-1б(2) (88)	280°	67, M=3–6 (K=10–15)	38	1 БЮВ–3СЗ	30
IV-1в (100)	300°	57, M=3–6 (K=10–15)	29	1 3СЗ–БЮВ	24

Т а б л и ц а 4. Коэффициенты детерминации и уравнения регрессии графиков «время-место» разломов Монголии

Table 4. Coefficients of determination and time-location regression equations for faults of Mongolia

Номер разлома (протяженность, км)	Кол-во сейсмических событий, используемых в анализе, и диапазон магнитуд (классов)	Количество временных совокупностей (периодов)	Коэффициент детерминации	Уравнение регрессии
I-2(1) (86)	133, M=3.0–5.5 (K=10–14)	5	$R_1^2=0.74$ $R_2^2=0.77$ $R_3^2=0.65$ $R_4^2=0.7$ $R_5^2=0.73$	$t = (0.4777 \cdot \ell + 1934.6)$ $t = (0.7177 \cdot \ell + 1927)$ $t = (0.5007 \cdot \ell + 1952.5)$ $t = (0.8064 \cdot \ell + 1959.4)$ $t = (0.3739 \cdot \ell + 1994.7)$
I-2(2) (86)	133, M=3.0–5.5 (K=10–14)	4	$R_1^2=0.4$ $R_2^2=0.33$ $R_3^2=0.61$ $R_4^2=0.54$	$t = (-1.8049 \cdot \ell + 2039)$ $t = (-1.3109 \cdot \ell + 2039.2)$ $t = (-2.0988 \cdot \ell + 2099.4)$ $t = (-0.6069 \cdot \ell + 2043.5)$
I-4(1) (271)	18, M=3–5 (K=10–13)	3	$R_1^2=0.65$ $R_2^2=0.9$ $R_3^2=0.99$	$t = (0.4577 \cdot \ell + 1898.2)$ $t = (0.4603 \cdot \ell + 1930.1)$ $t = (0.3544 \cdot \ell + 1969)$
I-4(2) (271)	18, M=3–5 (K=10–13)	2	$R_1^2=0.77$ $R_2^2=0.93$	$t = (-0.1944 \cdot \ell + 2000.8)$ $t = (-0.247 \cdot \ell + 2049.9)$
I-5 (312)	46, M=3.0–5.5 (K=10–14)	4	$R_1^2=0.53$ $R_2^2=0.34$ $R_3^2=0.89$ $R_4^2=0.83$	$t = (0.1676 \cdot \ell + 1921.7)$ $t = (0.2526 \cdot \ell + 1921.3)$ $t = (0.4122 \cdot \ell + 1927.7)$ $t = (0.4004 \cdot \ell + 1959.5)$
I-7 (517)	52, M=3.0–4.6 (K=10–12)	3	$R_1^2=0.81$ $R_2^2=0.74$ $R_3^2=0.33$	$t = (0.18 \cdot \ell + 1931.5)$ $t = (0.3096 \cdot \ell + 1946.2)$ $t = (0.2418 \cdot \ell + 1980.9)$
I-86 (143)	14, M=3.1–4.9 (K=10–13)	2	$R_1^2=0.62$ $R_2^2=0.33$	$t = (0.5575 \cdot \ell + 1945.3)$ $t = (0.1218 \cdot \ell + 1994.5)$
I-8в (235)	13, M=3.0–4.4 (K=10–12)	1	$R_1^2=0.75$	$t = (0.3641 \cdot \ell + 1958.8)$
I-8г (115)	17, M=3.0–4.4 (K=10–12)	1	$R_1^2=0.6$	$t = (-0.4811 \cdot \ell + 2037.3)$
I-10(1) (309)	60, M=3–6 (K=10–15)	3	$R_1^2=0.63$ $R_2^2=0.82$ $R_3^2=0.84$	$t = (0.2712 \cdot \ell + 1931.2)$ $t = (0.2998 \cdot \ell + 1942)$ $t = (0.3929 \cdot \ell + 1962.2)$
I-10(2) (309)	60, M=3–6 (K=10–15)	3	$R_1^2=0.44$ $R_2^2=0.75$ $R_3^2=0.74$	$t = (-0.2999 \cdot \ell + 1997.2)$ $t = (-0.2178 \cdot \ell + 2018.4)$ $t = (-0.3335 \cdot \ell + 2057.2)$
II-1 (247)	134, M=3.0–4.9 (K=10–13)	3	$R_1^2=0.65$ $R_2^2=0.84$ $R_3^2=0.55$	$t = (0.297 \cdot \ell + 1940.7)$ $t = (0.3368 \cdot \ell + 1951.3)$ $t = (0.2668 \cdot \ell + 1973.5)$
II-2 (434)	74, M=3–6 (K=10–15)	2	$R_1^2=0.62$ $R_2^2=0.73$	$t = (0.5484 \cdot \ell + 1935.9)$ $t = (0.1868 \cdot \ell + 1953.8)$
II-3(1) (74)	13, M=3.0–4.4 (K=10–12)	1	$R_1^2=0.65$	$t = (1.261 \cdot \ell + 1970.3)$
II-3(2) (74)	13, M=3.0–4.4 (K=10–12)	1	$R_1^2=0.8$	$t = (-0.6786 \cdot \ell + 2007.9)$
III-1a (27)	14, M=3.2–4.2 (K=10–12)	1	$R_1^2=0.55$	$t = (1.7238 \cdot \ell + 1971.7)$
III-16 (33)	54, M=3.0–5.5 (K=10–14)	4	$R_1^2=0.64$ $R_2^2=0.64$ $R_3^2=0.25$ $R_4^2=0.45$	$t = (-2.74 \cdot \ell + 1993.3)$ $t = (-2.7482 \cdot \ell + 2011)$ $t = (-2.1771 \cdot \ell + 2033.4)$ $t = (-2.7458 \cdot \ell + 2073.3)$
III-1в (24)	62, M=3.0–5.5 (K=10–14)	2	$R_1^2=0.65$ $R_2^2=0.3$	$t = (1.5423 \cdot \ell + 1956.5)$ $t = (1.2676 \cdot \ell + 1985.7)$
III-2a (102)	19, M=3.6–4.4 (K=11–12)	3	$R_1^2=0.46$ $R_2^2=0.93$ $R_3^2=0.77$	$t = (1.9294 \cdot \ell + 1852.7)$ $t = (2.0781 \cdot \ell + 1901.2)$ $t = (2.3525 \cdot \ell + 1946.8)$
III-26 (121)	41, M=3.6–5.3 (K=11–14)	2	$R_1^2=0.91$ $R_2^2=0.4$	$t = (1.1403 \cdot \ell + 1898.8)$ $t = (0.7079 \cdot \ell + 1958.6)$
III-3a (76)	50, M=3.0–4.4 (K=10–12)	3	$R_1^2=0.87$ $R_2^2=0.43$ $R_3^2=0.73$	$t = (0.6869 \cdot \ell + 1937.5)$ $t = (0.7243 \cdot \ell + 1957)$ $t = (0.5082 \cdot \ell + 1981.3)$
III-36 (111)	31, M=3.0–4.5 (K=10–12)	1	$R_1^2=0.75$	$t = (0.463 \cdot \ell + 1962)$
III-4 (150)	22, M=3.0–4.9 (K=10–13)	3	$R_1^2=0.6$ $R_2^2=0.95$ $R_3^2=0.87$	$t = (-0.9035 \cdot \ell + 1995.5)$ $t = (-0.6503 \cdot \ell + 2012.7)$ $t = (-0.5739 \cdot \ell + 2030.4)$

Окончание таблицы 4.

Table 4 (continued).

IV-1a (127)	147, M=3.0–7.9 (K=10–18)	4	$R_1^2=0.66$ $R_2^2=0.77$ $R_3^2=0.79$ $R_4^2=0.78$	$t = (0.5419 \cdot \ell + 1912)$ $t = (1.0154 \cdot \ell + 1881.9)$ $t = (0.7657 \cdot \ell + 1929)$ $t = (0.8609 \cdot \ell + 1954.9)$
IV-16(1) (88)	67, M=3–6 (K=10–15)	5	$R_1^2=0.65$ $R_2^2=0.88$ $R_3^2=0.67$ $R_4^2=0.66$ $R_5^2=0.32$	$t = (0.8913 \cdot \ell + 1893.9)$ $t = (1.3682 \cdot \ell + 1885)$ $t = (0.6845 \cdot \ell + 1946)$ $t = (0.8794 \cdot \ell + 1956.9)$ $t = (1.3244 \cdot \ell + 1970.6)$
IV-16(2) (88)	67, M=3–6 (K=10–15)	3	$R_1^2=0.61$ $R_2^2=0.35$ $R_3^2=0.33$	$t = (-0.9556 \cdot \ell + 1997.5)$ $t = (-0.942 \cdot \ell + 2030.8)$ $t = (-0.607 \cdot \ell + 2031.5)$
IV-1в (100)	57, M=3–6 (K=10–15)	3	$R_1^2=0.83$ $R_2^2=0.88$ $R_3^2=0.88$	$t = (0.7144 \cdot \ell + 1936)$ $t = (0.7788 \cdot \ell + 1957.2)$ $t = (1.0059 \cdot \ell + 1975.6)$

детальному анализу, следует рассматривать разломы с длинами одного порядка.

Отношения скоростей волн и длин разломов описываются экспоненциальной зависимостью (рис. 8).

Такие же связи обнаружены для районов Китая и Прибайкалья [Sherman et al., 2012b; Sherman, Gorbunova, 2008]. Особенно хорошо эта зависимость просматривается на графиках, построенных для отдельных тер-

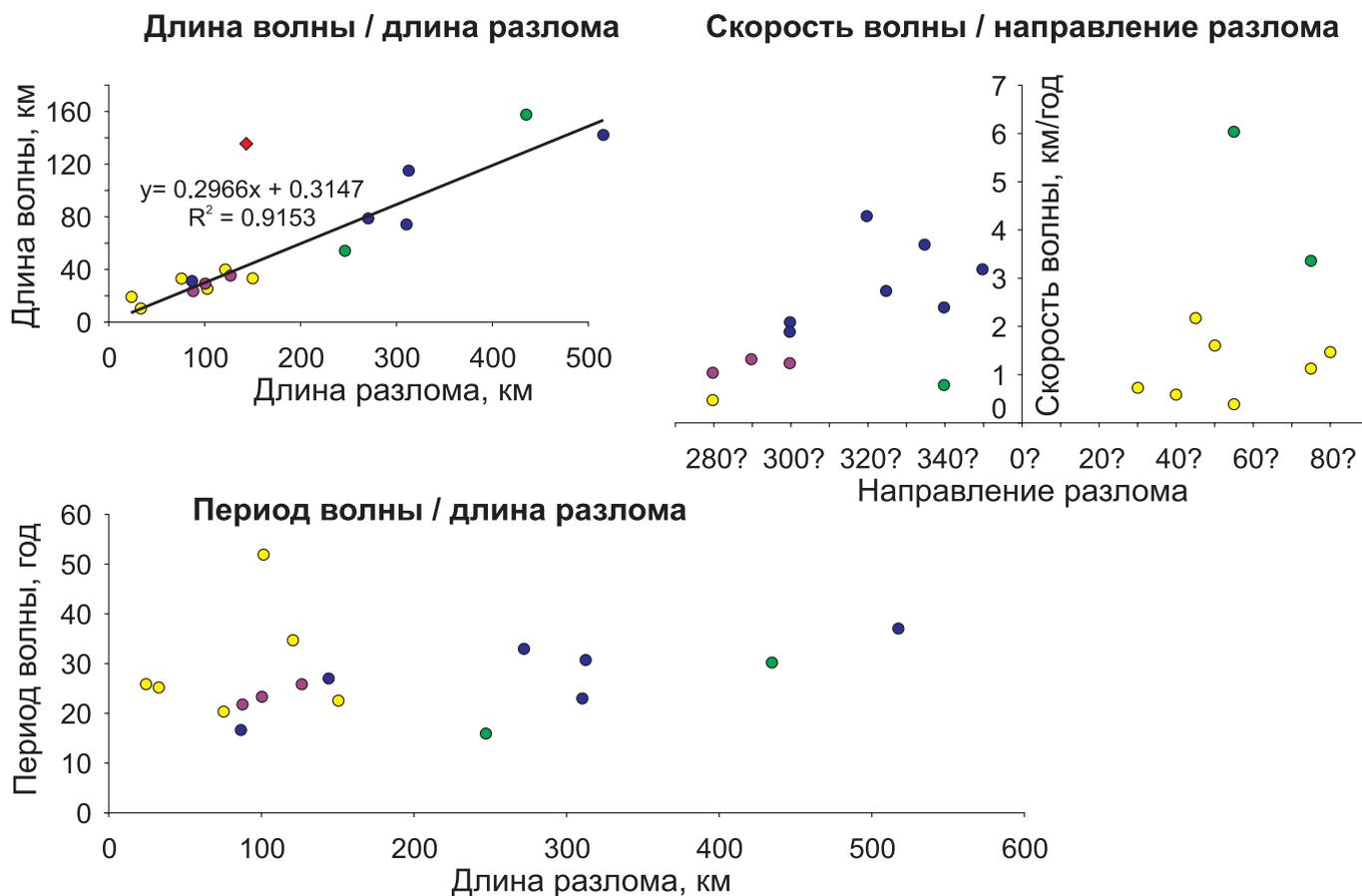


Рис. 6. Графики взаимосвязей параметров волн и разломов.

Fig. 6. Relationships between parameters of waves and faults.

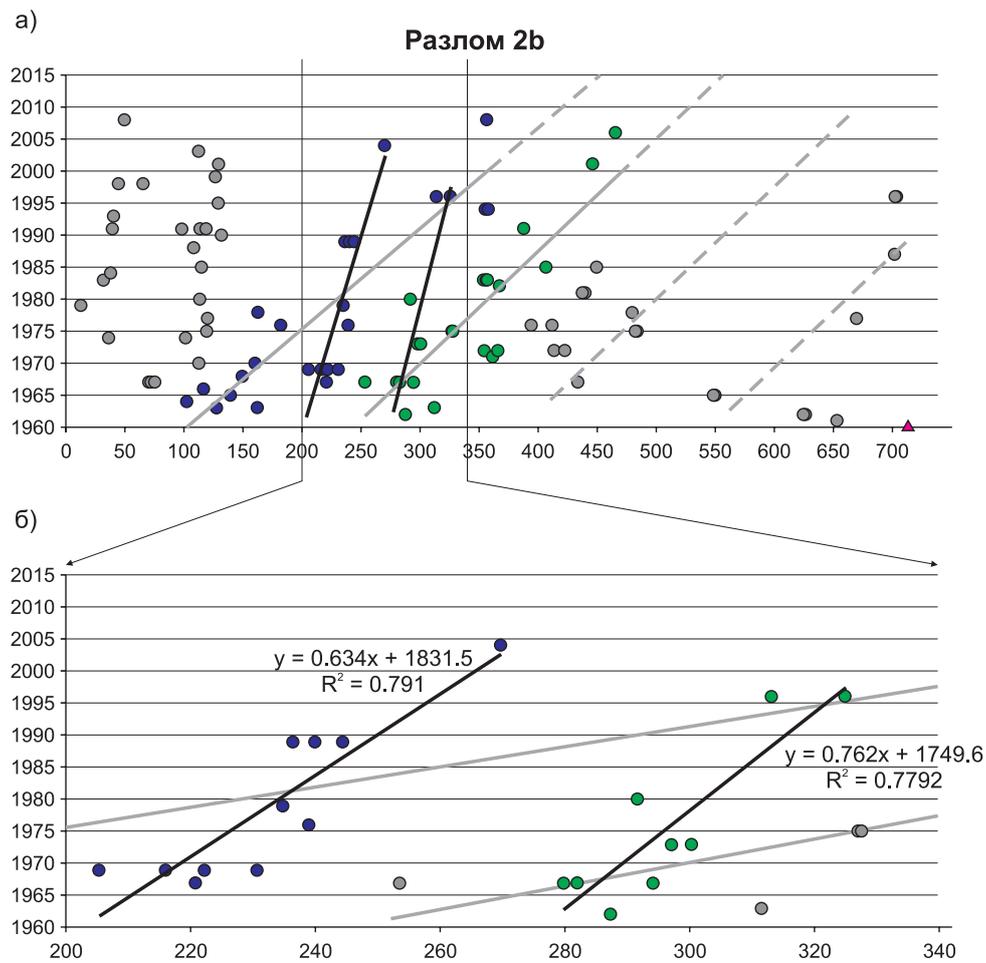


Рис. 7. Различия фиксируемых параметров деформационных волн в зависимости от длины разломов. *a* – график разлома 2b; *b* – график участка разлома 2b длиной 140 км в укрупненном масштабе, выделенный на рис. 7, *a*, вертикальными линиями. Серые линии – интерпретация данных в длинном разломе; черные линии – новый вариант интерпретации с низкими скоростями в коротком разломе.

Fig. 7. Variations of recorded parameters of deformation waves with regard to fault length. *a* – curve for Fault 2b; *b* – curve for the section of Fault 2b (140 km long) in the larger scale, which is marked in Fig. 7, *a* by vertical lines. Gray lines show data interpretation for the long fault; black lines show a new version of interpretation with regard to low velocities for the short fault.

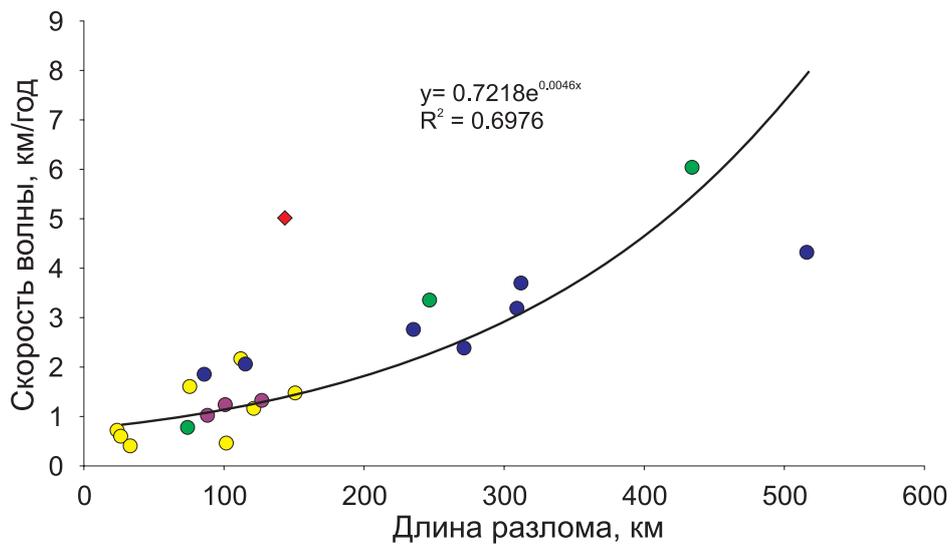


Рис. 8. График зависимости скорости волны от длины разлома.

Fig. 8. Wave velocity versus fault length.

риторий с относительно однородной геолого-геофизической обстановкой, таких как Байкальская рифтовая зона и некоторые районы Китая [Sherman et al., 2012a]. Физический смысл зависимости между скоростями волн и длинами разломов объясняется тем, что более длинные разломы относительно более чувствительны к нагрузке [Kocharyan, Spivak, 2003], так как менее устойчивы. Их реакция на деформационные волны выражается более интенсивными активизациями, что существенно отражается на скоростях миграций очагов землетрясений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачей работы ставился анализ основных параметров деформационных волн, изучение их взаимосвязей посредством детальной обработки данных по сейсмическим событиям Монголии, а также выявление общих

тенденций векторной направленности миграции очагов землетрясений.

В работе систематизированы параметры, определена общая векторная направленность деформационных волн у разломов разных рангов. Установлено, что фиксируемые длины и скорости волн во многом зависят от длин рассматриваемых разломов, и для наиболее точного анализа параметров собственно деформационных волн следует использовать наиболее протяженные разломы с соизмеримыми длинами.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность профессору С.И. Шерману за постановку исследований и обсуждение результатов.

Работа поддержана грантом РФФИ (12-05-91161-ГФЕН_а), проектами СО РАН VII.64.1.4. и ОНЗ 7.7.

7. ЛИТЕРАТУРА

- Bykov V.G., 2005. Strain waves in the Earth: theory, field data, and models. *Russian Geology and Geophysics* 46 (11), 1176–1190.
- Gangaadorzh B., 2010. Seismicity of Mongolia and Adjacent Territories. Abstract ... Thesis for the degree of Candidate of Geology and Mineralogy. Irkutsk, 16 p. (in Russian) [Гангаадорж Б. Сейсмичность Монголии и сопредельных территорий: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2010. 16 с.].
- Gorbunova E.A., Sherman S.I., 2012. Slow Deformation Waves in the Lithosphere: Registration, Parameters, and Geodynamic Analysis (Central Asia). *Russian Journal of Pacific Geology* 6 (1), 1–13. <http://dx.doi.org/10.1134/S181971401201006X>.
- Kasahara K., 1979. Migration of crustal deformation. *Tectonophysics* 52 (1–4), 329–341. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(79\)90240-3](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(79)90240-3).
- Khil'ko S.D., Kurushin R.A., Kochetkov V.M., Misharina L.A., Mel'nikova V.I., Gileva N.A., Lastochkin S.V., Balzhinnyam I., Monhoo D., 1985. Earthquakes and fundamentals of seismic zoning of Mongolia. Nauka, Moscow, 224 p. (in Russian) [Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М., Мишарина Л.А., Мельникова В.И., Гилева Н.А., Ласточкин С.В., Балжинням И., Монхоо Д. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. М.: Наука, 1985. 224 с.].
- Kocharyan G.G., Spivak A.A., 2003. The Dynamics of Deformation of Rock Blocks. Akademkniga, Moscow, 423 p. (in Russian) [Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 423 с.].
- Levi K.G., Khromovskikh V.S., Kochetkov V.M., Nikolaev V.V., Semenov R.M., Serebrennikov S.P., Chipizubov A.V., Dem'yanovich M.G., Arzhannikov S.G., Del'yansky E.A., Smekalin O.P., Ruzhich V.V., Buddo V.Yu., Masal'sky O.K., Potapov V.A., Berzhinsky Yu.A., Radziminovich Ya.B., 1996. Modern geodynamics: seismotectonics, earthquake prediction, earthquake risk (fundamental and applied aspects) (Article II). In: Logachev N.A. (Ed.), The Lithosphere of Central Asia. Main Findings of the Institute of the Earth's Crust in 1992–1996. Nauka, Novosibirsk, p. 150–182 (in Russian) [Леви К.Г., Хромовских В.С., Кочетков В.М., Николаев В.В., Семенов Р.М., Серебренников С.П., Чипизубов А.В., Демьянович М.Г., Аржанников С.Г., Дельянский Е.А., Смекалин О.П., Ружич В.В., Буддо В.Ю., Масальский О.К., Потопов В.А., Бержинский Ю.А., Радзиминович Я.Б. Современная геодинамика: сеймотектоника, прогноз землетрясений, сейсмический риск (фундаментальные и прикладные аспекты) (Статья II) // Литосфера Центральной Азии. Основные результаты исследований Института земной коры СО РАН в 1992–1996 гг. / Под ред. Н.А. Логачева. Новосибирск: Наука, 1996. С. 150–182].
- Levi K.G., Sherman S.I., San'kov V.A., Lunina O.V., Likhnev A.V., 2007. The Map of Modern Geodynamics of Asia. GP 475 VKF, Irkutsk (in Russian) [Леви К.Г., Шерман С.И., Саньков В.А., Лунина О.В., Лихнев А.В. Карта современной геодинамики Азии. Иркутск: ГП 475 ВКФ, 2007].
- Malamud A.S., Nikolaevsky V.N., 1989. Earthquake Cycles and Tectonic Waves. Donish, Dushanbe, 132 p. (in Russian) [Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Циклы землетрясений и тектонические волны. Душанбе: Дониш, 1989. 132 с.].
- Melnikov M.G., Gangaadorzh B., 2012. Seismically active areas of destruction in Mongolia and wave-triggering mechanisms of their activation. In: Modern geodynamics of Central Asia and hazardous natural processes: quantitative research results. Proceedings of the All-Russia conference and youth school on modern geodynamics (Irkutsk, September 23–29,

- 2012). IEC SB RAS, Irkutsk, V. 1. P. 161–164 (in Russian) [Мельников М.Г., Гангаадорж Б. Сейсмоактивные деструктивные зоны Монголии и триггерные волновые механизмы их активизации // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 23–29 сентября 2012 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. Т. 1. С. 161–164].
- Nikolaevsky V.N., 1991. Tectonic waves of the Earth. *Priroda* 8, 17–23 (in Russian) [Николаевский В.Н. Тектонические волны Земли // Природа. 1991. № 8. С. 17–23].
- Nikolaevsky V.N., Ramazanov T.K., 1985. The theory of fast tectonic waves. *Prikladnaya Matematika i Mekhanika* 49 (3), 426–469 (in Russian) [Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К. Теория быстрых тектонических волн // Прикладная математика и механика. 1985. Т. 49. № 3. С. 426–469].
- Novopashina A.V., San'kov V.A., 2010. Velocities of slow migration of seismic activity in Cis-Baikal region. *Geodynamics & Tectonophysics* 1 (2), 197–203. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2010-1-2-0015>.
- Sherman S.I., 2009. A Tectonophysical Model of a Seismic Zone: Experience of Development Based on the Example of the Baikal Rift System. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 45 (11), 938–951.
- Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., 1983. Areas of Dynamic Influence of Faults (Modeling Results). Nauka, Novosibirsk, 112 p. (in Russian) [Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.].
- Sherman S.I., Gorbunova E.A., 2008. Wave origin of fault activation in the Central Asia on the basis of seismic monitoring. *Physical Mesomechanics* 11 (1), 115–122.
- Sherman S.I., Gorbunova E.A., Mel'nikov M.G., 2012a. Deformation waves as trigger mechanisms of excitation of earthquakes in areas of dynamic influence of faults. In: Book of abstracts 33rd General Assembly of the European Seismological Commission (GA ESC 2012), 19–24 August 2012, Moscow and Young Seismologist Training Course (YSTC 2012), August 25–30, 2012, Obninsk – Moscow, PH “Poligrafik”, 2012, p. 243–244.
- Sherman S.I., Lunina O.V., Savitskii V.A., 2005a. The state of stresses and recent lithospheric destruction zones of Asia. In: Problems and Prospects of Mining Sciences. Geomechanics. Mining Institute, SB RAS, Novosibirsk. V. 1. P. 34–39 (in Russian) [Шерман С.И., Лунина О.В., Савитский В.А. Напряженное состояние и зоны современной деструкции литосферы Азии // Проблемы и перспективы развития горных наук. Геомеханика. Новосибирск: Институт горного дела СО РАН, 2005. Т. 1. С. 34–39].
- Sherman S.I., Lysak S.V., Gorbunova E.A., 2012b. A tectonophysical model of the Baikal seismic zone: testing and implications for medium-term earthquake prediction. *Russian Geology and Geophysics* 53 (4), 392–405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2012.03.003>.
- Sherman S.I., Sorokin A.P., Savitskii V.A., 2005b. New methods for the classification of seismoactive lithospheric faults based on the index of seismicity. *Doklady Earth Sciences* 401 (3), 413–416.
- Sherman S.I., Zlogodukhova O.G., 2011. Seismic belts and zones of the Earth: formalization of notions, positions in the lithosphere, and structural control. *Geodynamics & Tectonophysics* 2 (1), 1–34. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2011-2-1-0031>.
- Ulovov V.I., 1993. Waves of seismogeodynamic activation and long-term earthquake prediction. *Fizika Zemli* 4, 43–53 (in Russian) [Уловов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений // Физика Земли. 1993. № 4. С. 43–53].
- Vikulin A.V., 2003. The Physics of Wave Seismic Process. KGPI, Petropavlovsk-Kamchatsky, 150 p. (in Russian) [Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КГПИ, 2003. 150 с.].



Мельников Михаил Геннадьевич, аспирант, лаборатория тектонофизики
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
✉ e-mail: mg_melnikov@crust.irk.ru

Mel'nikov, Mikhail G., Postgraduate Student, Laboratory of Tectonophysics
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
✉ e-mail: mg_melnikov@crust.irk.ru