

Волновая природа активизации разломов Центральной Азии на базе сейсмического мониторинга

С.И. Шерман, Е.А. Горбунова

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, 664033, Россия

Возникновение очагов землетрясений в сейсмоактивных зонах литосферы характеризуется квазихаотичностью. Вариации пространственно-временной миграции очагов в реальном (месяцы, годы) времени не могут быть объяснены изменениями напряженно-деформированного состояния среды эндогенной природы. В статье во главу угла поставлен один из определяющих структурных факторов контролирования очагов землетрясений — разломы различных рангов, современная активизация которых и сейсмичность парагенетически взаимосвязаны. Под этим углом зрения по разработанной методике изучены пространственно-временные закономерности современной активизации разломов, ее источники и механизмы реализации. Показано, что активизация разломов и ее относительно высокая частота в масштабах реального времени вызываются медленными деформационными волнами возбуждения, генераторами которых могут быть межплитные и межблоковые подвижки хрупкой литосферы. По скорости прохождения деформационных волн возбуждения активные разломы могут классифицироваться на группы, различающиеся по геолого-геофизическим параметрам. Они позволяют оценивать направление фронтов деформационных волн возбуждения и выделять области преимущественной активизации разломов в интервалах реального (с геологической точки зрения мгновенного) времени.

Wave origin of fault activation in the Central Asia on the basis of seismic monitoring

S.I. Sherman and E.A. Gorbunova

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, 664033, Russia

The generation of earthquake foci in seismically active lithosphere zones is quasi-chaotic. The variation of the spatio-temporal focus migration in real (months, years) time cannot be explained by endogenous variation of the stress-strain state of the medium. In the paper emphasis is put on one of the crucial structural elements governing earthquake foci, namely, on faults of various ranks whose recent activation and seismicity are paragenetically interrelated. From this point of view, using a developed technique we study the spatio-temporal mechanisms of recent fault activation, its sources and occurrence mechanisms. It is shown that the fault activation and its relatively high frequency on the real time scale are induced by slow excitation strain waves due to interplate and interblock shifting in the brittle lithosphere. By the velocity of the excitation strain waves the faults can be classified in groups differing in geological and geophysical parameters. They allow one to estimate the direction of the excitation strain wave fronts and to distinguish the zones of primary fault activation in real (instantaneous from the geological standpoint) time intervals.

1. Введение

Результаты исследований современной геодинамики литосферы позволили выделить группы активных разломов, интенсивность активизаций которых изменяется в интервалах короткого реального времени и практически не зависит от функционирующих геодинамических режимов регионов. Установлено, что разломы активизируются с изменяющейся интенсивностью и активизация происходит чаще, чем фиксируются изменения в текто-

ническом режиме и региональном поле напряжений. Вывод получен благодаря введению новых параметров численных оценок количественной и энергетической (магнитудной) характеристик разломов. Для оценки интенсивности активизации разломов в реальном времени (месяцы, годы) предложено использовать их количественный индекс сейсмической активности ξ_n (км^{-1}), под которым понимается число сейсмических событий n определенных энергетических классов K , приходящихся

на единицу длины разлома L (км) при принятой ширине области его динамического влияния M (км) за заданный промежуток времени t (годы) [1]:

$$\xi_n = \sum n(M, K, t)/L. \quad (1)$$

Ширина области динамического влияния разлома M определяется по уравнению

$$M = bL, \quad (2)$$

где L — длина разлома (км); b — коэффициент пропорциональности, зависящий от L и по эмпирическим данным изменяющийся от 0.03 до 0.09 соответственно для трансрегиональных и локальных разломов [2]. В реальном масштабе времени именно количественный индекс сейсмической активности характеризует нестабильность крыльев разломов и дает основание для анализа доли участия разнорангового разломного сообщества в сейсмическом процессе.

Для определения энергетического потенциала разломов предложено применять магнитудный (энергетический) индекс сейсмической активности разломов ξ_k , под которым понимается значение класса максимального сейсмического события K_{\max} ($K = \lg E$, Дж), приходящегося на длину разлома L (км) при принятой ширине области его динамического влияния M (км). Магнитудный индекс сейсмической активности оценивается по выражению:

$$\xi_k = K_{\max(t)}(M, K, t), \quad (3)$$

где $K_{\max(t)}$ — максимальный класс землетрясения (или его максимальная магнитуда) в области динамического влияния разлома M за заданный промежуток времени t [3].

Рассмотрение вариаций количественного и магнитудного индексов сейсмической активности на примерах разломной тектоники Центральной Азии свидетельствует об отсутствии ясно выраженной пространственной закономерности в активизации территориально сближенных ансамблей разломов в чрезвычайно короткие интервалы реального времени. Создается кажущееся впечатление, что активизация разломов в границах сейсмоактивных зон происходит хаотично (рис. 1, 2). Эндеогенные источники развития разломов и генетически связанной с ними сейсмичности в задаваемые, с геологической точки зрения мгновенные, интервалы времени остаются пространственно и энергетически стабильными. Следовательно, пространственно-временные закономерности в возбуждении активизации разломов следует искать в энергетически слабых, но достаточных для нарушения метастабильного состояния разломно-блоковой среды литосферы, триггерных механизмах.

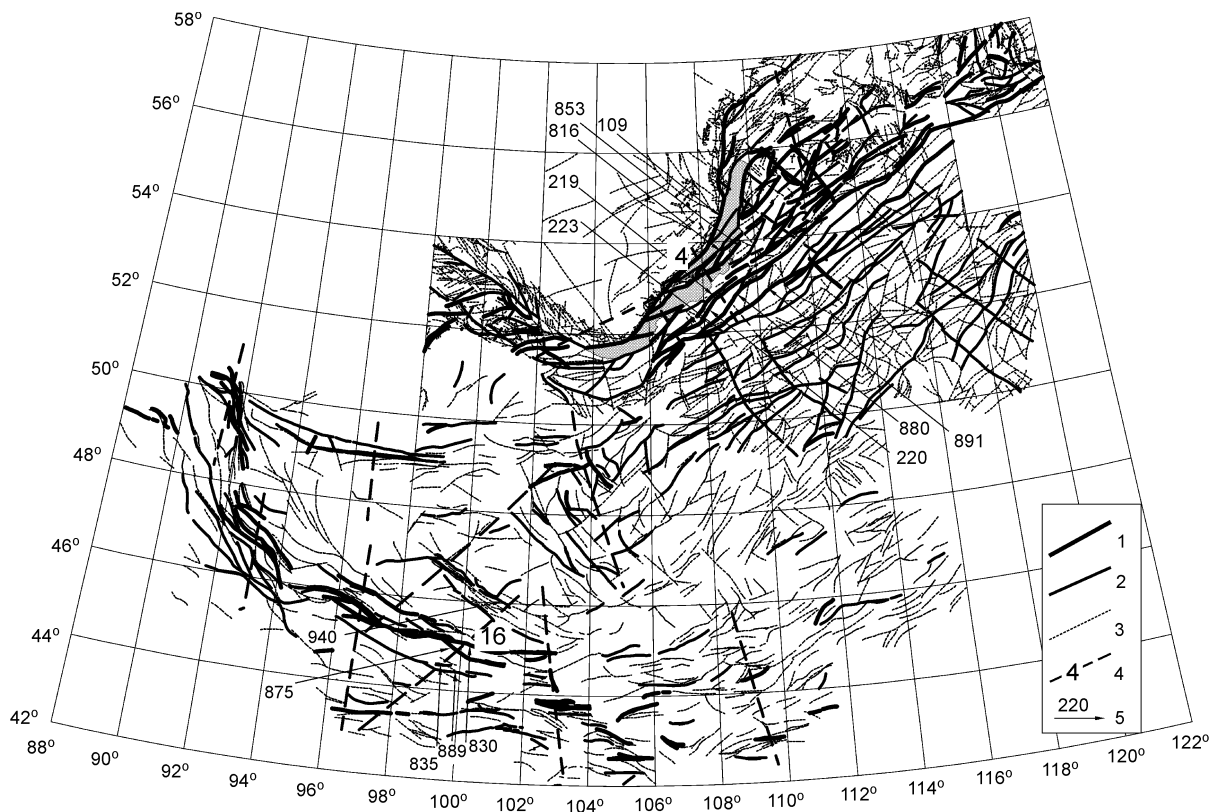


Рис. 1. Карта активных разломов Центральной Азии по магнитудному индексу сейсмической активности (3): 1 — разломы с $\xi_k \geq 12$ (весьма активные); 2 — разломы с $\xi_k = 10-11$ (активные); 3 — разломы с $\xi_k \leq 9$ (слабоактивные); 4 — положение сечений на карте и их номера; 5 — номера разломов по каталогу

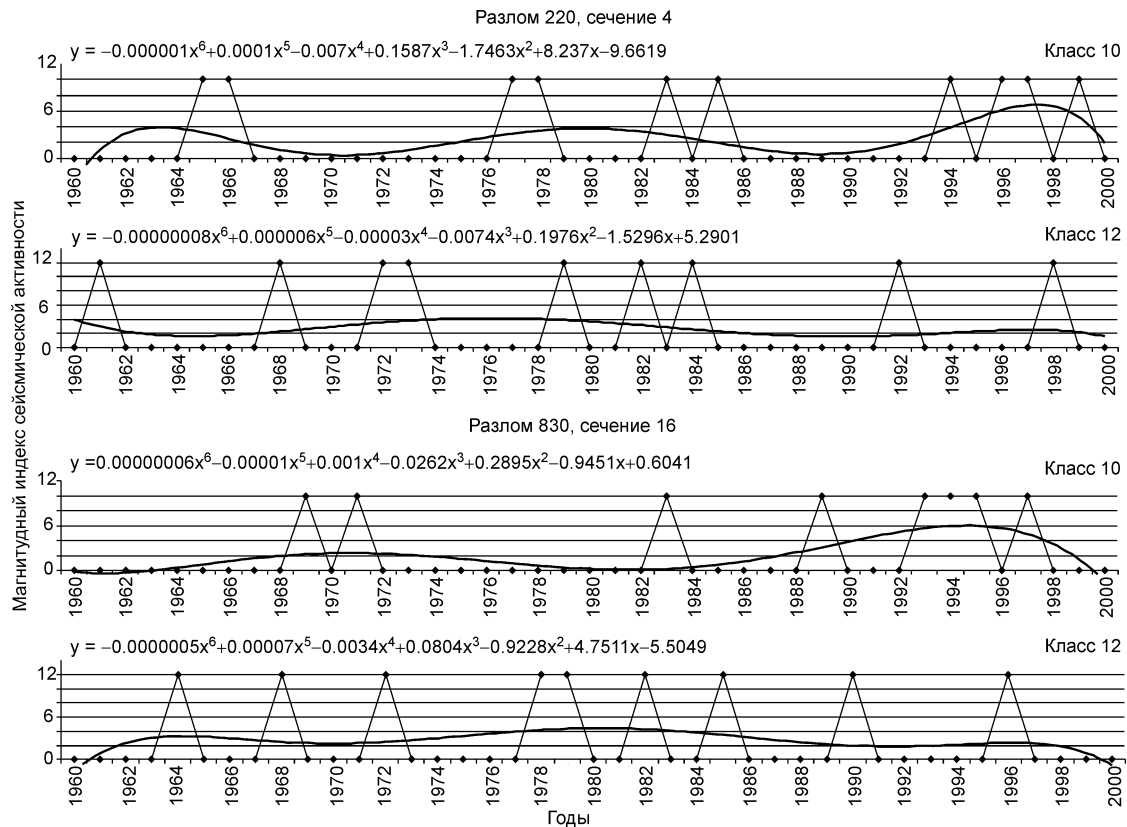


Рис. 2. Периодичность изменений магнитудного индекса сейсмической активности по событиям энергетических классов 10 и 12 на примере двух удаленных друг от друга разломов Центральной Азии

2. Исследуемые вопросы и методы их решения

Для исследования интегрированной пространственной выраженности активизации разноранговых разломов и поисков ее триггерных механизмов изучена тенденция временной направленности возникновения эпицентров землетрясений в зонах динамического влияния сейсмоактивных разломов.

В последние годы на примерах тектонически активных зон Центральной Азии проведено тщательное изучение сейсмоактивных разломов по данным сейсмологического мониторинга. Критерием безусловной активизации разломов является приуроченность к ним эпицентров землетрясений. Разломы растут при каждом новом сейсмическом акте. М.В. Гзовский [4] показал, что максимальный их рост за один сейсмический акт не превышает 15 метров. Опубликованные в последние годы работы по изучению последовательности вспарывания разрывов и смещений по ним при землетрясениях выявили их определенную тенденцию в одном из направлений. Рассмотрим некоторые детали локализации смещений в разрывах во времени при постоянном и импульсивном нагружениях.

В экспериментальной работе В.А. Санькова и К.Ж. Семинского [5, 6] было убедительно показано неравномерное смещение по простиранию в разрывах, формирую-

щихся в сдвиговом поле напряжений. Эти, трудно воспринимаемые среди геологов в те годы знания в последующем были подтверждены наблюдениями в эпицентральных зонах землетрясений. По этому вопросу весьма аргументированные данные получены при крупномасштабных исследованиях вариаций смещений земной поверхности вдоль сейсмоактивного разлома Emerson в его различных частях (рис. 3). Они сопоставлены с еще более детальными наблюдениями по разлому Garlock (Южная Калифорния) [7]. Закономерности соотношений между амплитудами горизонтальных и вертикальных смещений и длинами разрывов по простиранию намечаются только по огибающей кривой [7]. Таким образом, в каждом конкретном случае связь между длинами разломов, амплитудами смещений вдоль них и магнитудами землетрясений во многом зависит от расположения точек фактических наблюдений в природной обстановке и замеров соответствующих параметров вдоль простирания активных разломов.

По разным группам наблюдений развитие и активизация сейсмоактивных разломов происходят преимущественно в одном из двух от эпицентра (очага) землетрясения направлений [8, 9 и др.]. Богатый фактический материал дали проведенные в последние годы обобщения по расположению максимальных амплитуд смеще-

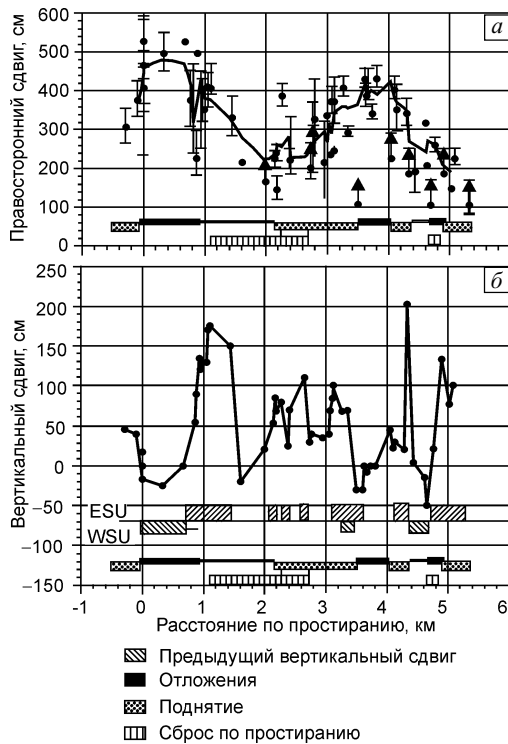


Рис. 3. Вариации горизонтальных (а) и вертикальных (б) амплитуд смещений по простиранию сейсмоактивного разлома [7]. Условные обозначения: линия — средние значения; точки — единичные замеры сдвига; под кривыми графиков — изменение состава горных пород по простиранию разлома

ний по простиранию разрывов и эпицентров землетрясений. Авторы [10] показали, что положение максимальных смещений в сейсмоактивных разломах по отношению к эпицентрам основных толчков не совпадает с локализацией последних, а смещения максимальны на некотором удалении по простиранию активного разрыва (рис. 4). Известно, что эпицентры последующих от-



Рис. 4. Расположение главных очагов землетрясений и максимальных амплитуд горизонтальных смещений по простиранию активных разломов [10]: 1 — Куньлунь (2001 г., $M_w = 7.8$); 2 — Маньй (1997 г., $M_w = 7.6$); 3 — Дюздже (1999 г., $M_w = 7.2$)

носительно сильных землетрясений в исследуемых разрывах находятся в местах максимальных смещений, связанных с предшествующими событиями. При этом сила нового события в определенной мере пропорциональна и длине разрыва, и амплитуде смещения [11]. Отсюда, что наиболее вероятно, следующий сейсмический акт локализуется в точке разлома с максимальным смещением, за ним во времени локализуется следующий и т.д. (рис. 5). Будет намечаться тенденция в направлении расположения последующих очагов землетрясений, и, следовательно, будут определяться и преимущественные направления прорастания разрывов при их активизации.

В основе рассматриваемых далее авторских построений лежит представление о том, что землетрясение

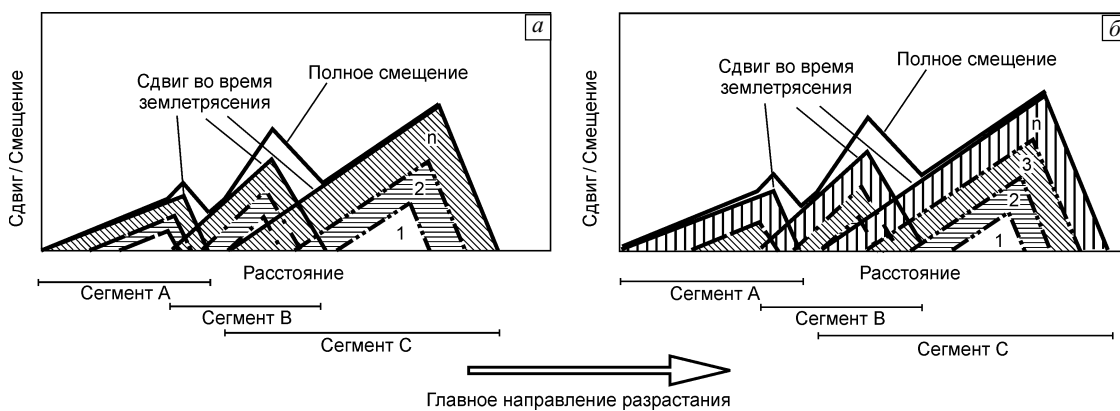


Рис. 5. Две модели разрастания активных разломов и накопления амплитуд смещений во времени [10]: одновозрастные (а) и разновозрастные (б) сегменты разлома и их синхронная активизация. Стрелкой показано направление разрастания разлома. 1, 2, 3, ..., n — последовательность сейсмических актов

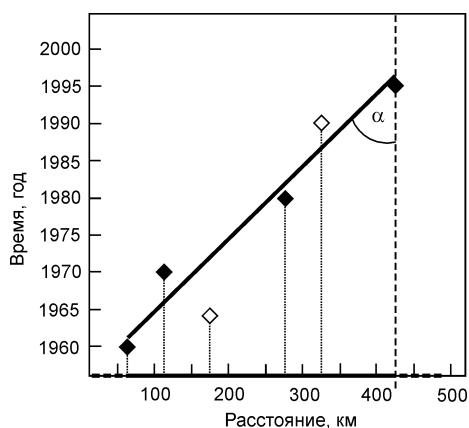


Рис. 6. Определение вектора разрастания разлома по простиранию при активизации и оценка средней скорости движения волны возбуждения

любого класса фиксирует нарушение равновесия в зоне разлома, сопровождающееся увеличением интенсивности трещиноватости и при сильных событиях смещением крыльев. Частота сейсмических событий в зоне разлома отражает интенсивность его активизаций, а тенденция в пространственной направленности очагов вдоль оси разлома во времени воспроизводит скорость и вектор движений триггерного источника активизаций. При этом в зоне разлома происходит реализация второго

[12] механизма развития крупной трещины: ее продолжающееся формирование идет по предварительно уже существующей перколяционной сети более мелких трещин и скорость дискретного развития (активизации) трещины по простиранию может быть исключительно низкой, исчисляемой годами, столетиями или более продолжительным временем.

Для выяснения тенденций векторной направленности возбуждений по наиболее активным разломам были построены индивидуальные графики, на оси абсцисс которых откладывались длины разломов с соответствующими положениями эпицентров землетрясений, на оси ординат — время этих событий (рис. 6). По физическому смыслу каждый из графиков отражает два новых дополнительных параметра разломов: наклон его линии воспроизводит вектор пространственно-временного движения очагов землетрясений вдоль разрыва (с левого фланга разлома на правый или наоборот), а тангенс угла ее наклона к оси ординат — средние скорости пространственного распространения волны возмущения, стимулирующей возникновение очагов землетрясений.

3. Обсуждение результатов

По предложенной методике, используя каталог землетрясений Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН за 1960–2000 гг., рассмотрена специфика

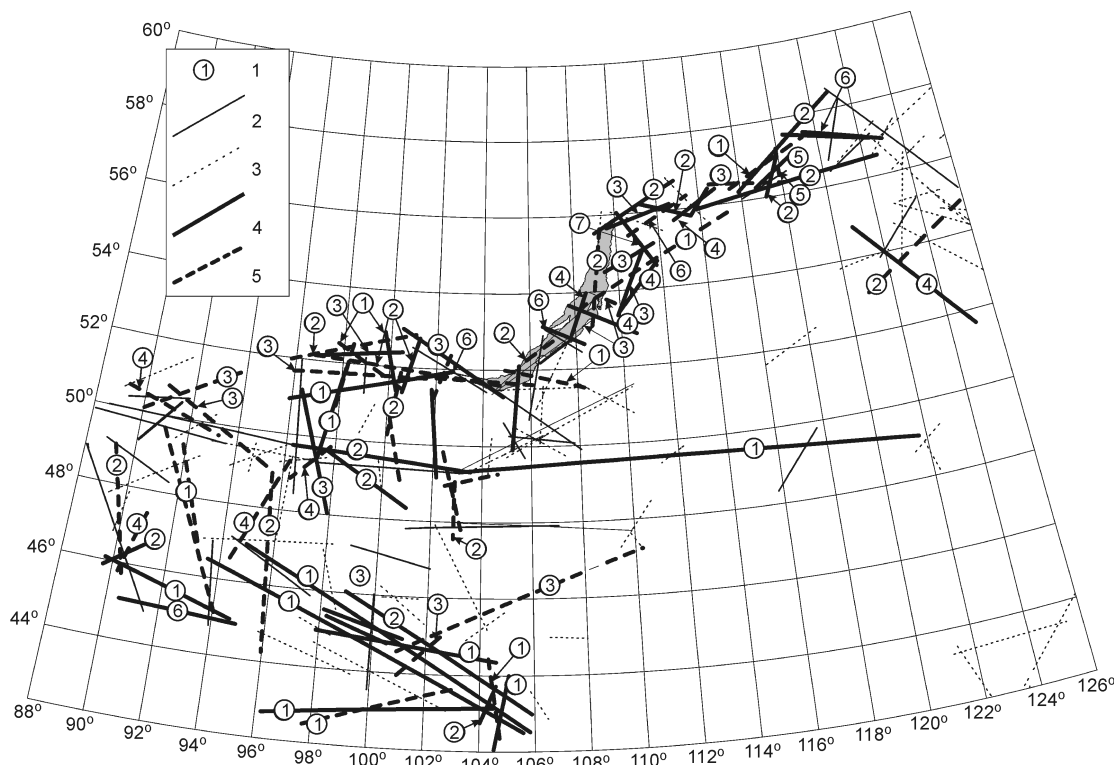


Рис. 7. Активные разломы Центральной Азии и их группировка по параметрам современной активизации: 1 — номера групп разломов в соответствии с таблицей в тексте; 2 — разломы с неопределенными параметрами активизации; 3 — неактивные разломы; 4 и 5 — разломы с преобладающими векторами движения волн возмущения с востока на запад и с запада на восток соответственно

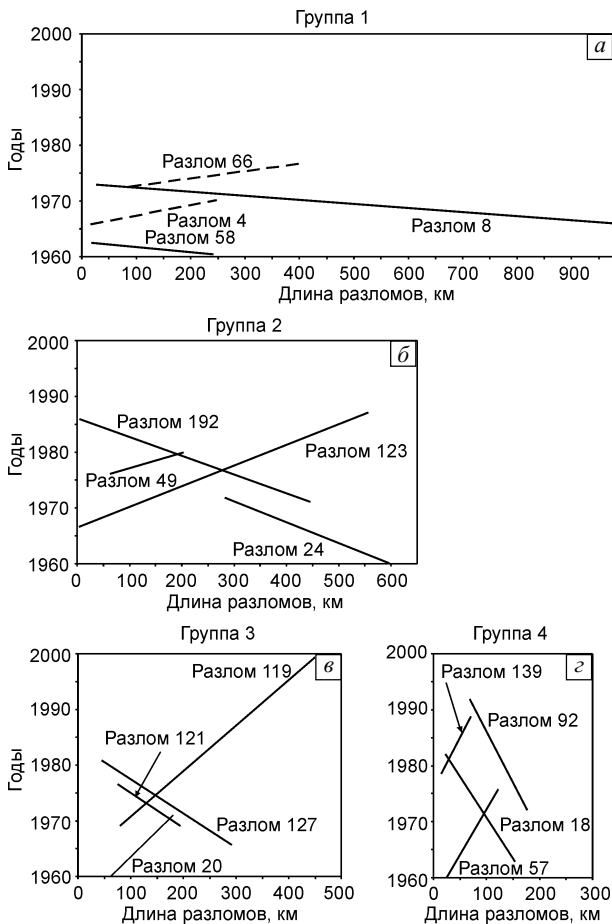


Рис. 8. Примеры графиков временных трендов сейсмических событий в четырех группах разломов с разными скоростными характеристиками активизации

пространственно-временного распространения очагов землетрясений по простиранию активных разломов Центральной Азии (рис. 7).

Выделено более ста разноранговых разломов с зафиксированными в областях своего динамического влияния очагами землетрясений классов 12–16. Построены индивидуальные графики «время события –

пространство» и проанализированы временные тренды сейсмических событий по отдельным активным разломам. Эпицентры землетрясений конкретных разломов на графиках образуют системы параллельных прямых, как если бы вдоль соответствующих разломов распространялись с постоянной средней скоростью серии деформационных волновых возмущений, инициирующих сейсмические события — активизации разломов. Всего таких систем параллельных прямых с равными, но в разных направлениях углами наклона выделено 7 групп, каждая из которых соответствует одинаковым средним скоростям деформационных возмущений. Внутри группы разрывы подразделяются на две подгруппы, соответствующие разным (противоположным) векторам возмущений (рис. 8). Группировка разломов по критерию одинаковых скоростей деформационных волн возмущений свидетельствует об идентичных параметрах их активизации (табл. 1).

Дополнительно, используя известное соотношение $\lambda = Vt$, (4)

по характерному времени возникновения событий t и их средней скорости V в каждой из групп оценена вероятная длина деформационных волн возмущения λ .

Принимая во внимание недостаточную обеспеченность некоторых разломов минимальным количеством исходных данных по сейсмичности, из дальнейшего анализа исключены последние три группы (табл. 1).

По вычисленным скоростным характеристикам и векторам движений деформационных волн возмущения первых четырех групп проведена новая классификация разрывов, проанализировано их пространственное положение в обсуждаемом регионе и взаимоотношения некоторых параметров (рис. 9).

В первой из групп превалирует вектор активизации с запада на восток в восточной части площади и с востока на запад — в западной, в четвертой — все наоборот. Особо выделяются южные части территории, находящиеся в других геодинамических обстановках. По описываемым признакам превалирования векторов вторую и третью группы можно рассматривать как переходные между первой и четвертой. Совершенно бесспорно, для

Таблица 1

Параметры современной активизации разломов Центральной Азии

Группа/общее количество разломов/разломы, участвующие в анализе	Средняя длина разломов, км	Угол наклона временного тренда активизации	Средняя скорость активизации разломов, км/год	Частота, год ⁻¹	Характерное время активизации, год	Длина деформационных волн, км
1/26/19	438 ± 152	89.4° ± 0.24°	94 ± 57	0.05	20.4 ± 1.7	2 000
2/23/22	321 ± 87	87.44° ± 0.3°	22 ± 3	0.05	22.2 ± 2.3	450
3/23/17	299 ± 94	85.39° ± 0.4°	12 ± 1.25	0.05	22.4 ± 2.6	250
4/15/14	206 ± 62	81.28° ± 0.9°	7 ± 0.7	0.05	21.1 ± 2.1	130
5/5/2	199 ± 269	78.76° ± 1.8°	5 ± 1.8	–	–	–
6/8/5	204 ± 44	74.43° ± 2°	4 ± 2	–	–	–
7/5/3	131 ± 84	66.32° ± 5°	2 ± 4.9	–	–	–

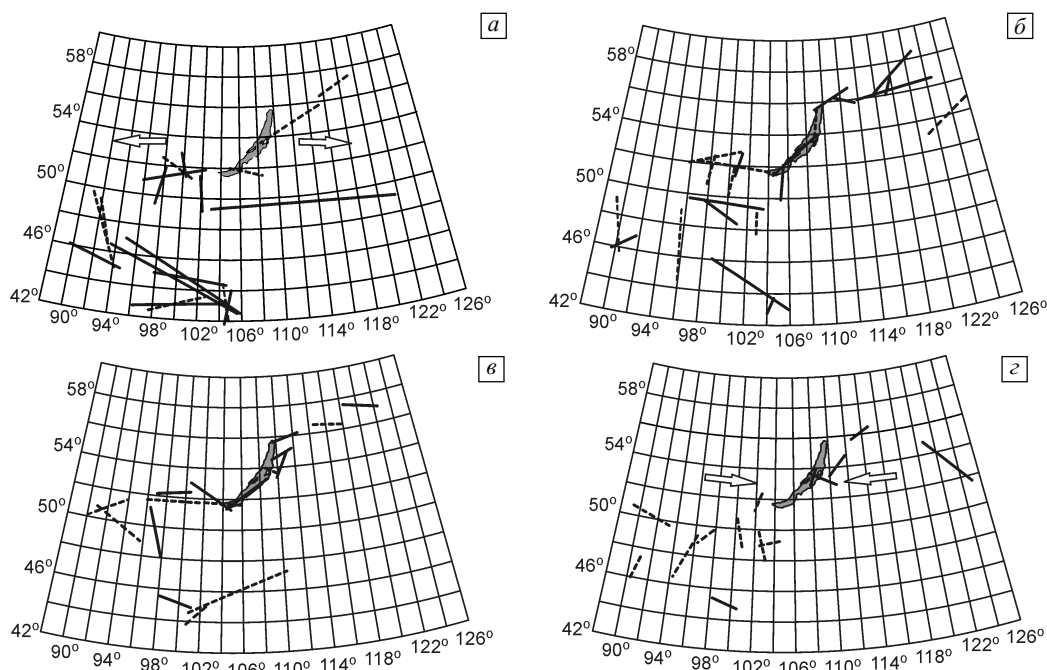


Рис. 9. Расположение активных разломов Центральной Азии с различными скоростями и векторами деформационных волн возбуждения: разломы 1-ой (а); 2-ой (б); 3-ей (в); 4-ой группы (г). Вектор активизации разломов направлен с запада на восток (пунктирная линия) и с востока на запад (сплошная линия). Стрелки указывают примерное направление фронта деформационных волн возбуждения (активизации) разломов

всех четырех групп намечается граница изменений векторов активизаций: она субмеридиональна и проходит примерно по 105° в.д., отделяя центральную часть Байкальской рифтовой системы и ее северо-восточный фланг от юго-западного.

Между скоростью процессов активизации разломов V и их средней длиной L фиксируется высокая нелинейная корреляционная связь $r = 0.9$, а уравнение регрессии описывает ее следующими взаимоотношениями параметров:

$$V = 0.000007L^3 - 0.0053L^2 + 1.2098L - 81.725 \text{ (км/год)} \quad (5)$$

при $R^2 = 0.9971$, где R^2 — коэффициент детерминации (рис. 10).

Закономерные согласованности в пространственной направленности активизации разломов в различных иерархических группах свидетельствуют о том, что генераторами описываемого процесса могут быть медленные деформационные волны разных длин, чувствительность к которым различна у выделенных, характеризующихся разной длиной, групп разломов.

Источниками подобных волн, возможно, являются продолжающиеся процессы активного рифтогенеза, приводящие к эпизодическим подвижкам всей межблоковой границы между Сибирской и Амурской (Забайкальской) плитами, а также более локальные смещения между блоками других рангов на флангах и в центральной части Байкальской рифтовой системы — наиболее геодинамически активной территории рассматриваемого региона. Высокая вероятность возбуждения волн в связи с подвижками блоков, лежащих на вязком основании, согласуется с расчетами [13, 14 и др.]. Ранее к близким выводам о волновом процессе, пространственно определяющем возникновение очагов землетрясений, но с иным критерием структурного контроля, пришел В.И. Уломов [15]. К настоящему времени факт существования деформационных волн в зонах разломов не вызывает сомнений [16]. Их можно рассматривать

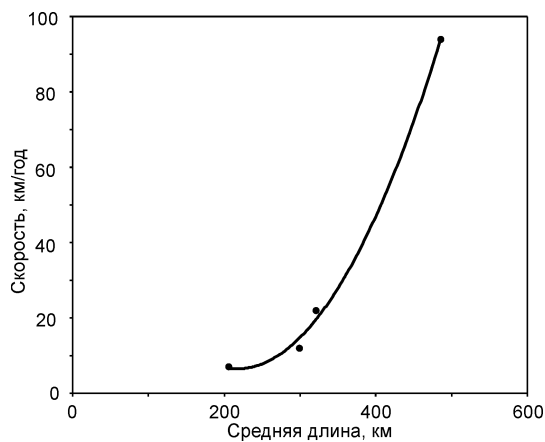


Рис. 10. Зависимость между скоростями движений деформационных волн возбуждений (активизаций) разломов и их длиной

как один из классов механических движений, свойственных земной коре и литосфере в целом [17].

4. Заключение

Введение и использование новых параметров для характеристики активных разломов (средних скоростей и векторов их активизаций) позволяет выявить дополнительные геодинамические свойства разломов как геологических тел, вероятные источники и механизмы их современной активизации.

Активизация разломов и ее относительно высокая частота в масштабах реального времени вызываются медленными деформационными волнами возбуждения, источниками которых могут быть межплитные и межблоковые подвижки хрупкой литосферы. Для рассматриваемой территории они типичны для границы Сибирской и Забайкальской (Амурской) плит [18].

По скорости прохождения деформационных волн возбуждения активные разломы могут классифицироваться на группы, различающиеся по геолого-геофизическим параметрам. Они позволяют оценивать направление фронтов деформационных волн возбуждения и выделять области преимущественной активизации разломов в интервалах реального (с геологической точки зрения мгновенного) времени.

Дальнейшие исследования для более широкой территории позволят глубже изучить тектонофизические закономерности пространственно-временной активизации разломов в реальном времени и ее влияние на другие современные геолого-геофизические процессы.

С отдельными разработками по излагаемым вопросам очень детально ознакомился и представлял в «Доклады РАН» академик С.В. Гольдин, памяти которого посвящена эта работа. Авторы благодарят доктора физико-математических наук, профессора П.В. Макарова за советы, высказанные при ознакомлении с первоначальным вариантом рукописи.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 07-05-00251) и программы Президиума РАН 16.3.

Литература

1. Шерман С.И., Сорокин А.П., Савитский В.А. Новые методы классификации сейсмоактивных разломов литосферы по индексу сейсмичности // Докл. РАН. – 2005. – Т. 401. – № 3. – С. 395–398.
2. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. – Новосибирск: Наука, 1983. – 101 с.
3. Шерман С.И., Савитский В.А. Новые данные о квазипериодических закономерностях активизации разломов в реальном времени на основе мониторинга магнитуд сейсмических событий (на примере Байкальской рифтовой системы) // Докл. РАН. – 2006. – Т. 408. – № 3. – С. 398–403.
4. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
5. Саньков В.А., Семинский К.Ж. Анализ смещений по разрывам в зоне формирующегося трансформного разлома // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1988. – № 4. – С. 10–18.
6. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «Гео», 2003. – 244 с.
7. McGill S.F., Rubin C.M. Surficial slip distribution on the central Emerson fault during the June 28, 1992, Landers earthquake, California // J. Geophys. Res. – 1999. – V. 104. – P. 4811–4833.
8. Kasahara K. Migration of crustal deformation // Tectonophysics. – 1979. – V. 52. – P. 329–341.
9. Шерман С.И., Горбунова Е.А. Количественный анализ современной активности разломов Центральной Азии и их триггерных механизмов // Проблемы современной сейсмогеологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. – С. 195–203.
10. Kim Y.-S., Choi J.-H. Fault propagation, displacement and damage zones // Conference Commemorating the 1957 Gobi-Altay Earthquake. – Ulaanbaatar: Research Center of Astronomy and Geophysics Mongolian Academy of Sciences, 2007. – P. 81–86.
11. Anderson J.G., Wesnousky S.G., Stirling M.W. Earthquake size as a function of fault slip rate // Bull. Seism. Soc. America. – 1996. – V. 86. – No. 3. – P. 683–690.
12. Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 5–22.
13. Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К. Генерация и распространение волн вдоль глубинных разломов // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1986. – № 10. – С. 3–13.
14. Невский М.В. Геофизика на рубеже веков // Избранные труды ученых ОИФЗ РАН. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – С. 124–139.
15. Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений // Физика Земли. – 1993. – С. 43–53.
16. Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46. – № 11. – С. 1176–1190.
17. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 37–54.
18. Карта современной геодинамики Азии / К.Г. Леви, С.И. Шерман, В.А. Саньков и др. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007.

Поступила в редакцию
29.10.2007 г.