

## ДЕСТРУКЦИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В БАЙКАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ ПО ДАННЫМ О ФОРМЕ ДИСЛОКАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**А.В. Ключевский, В.М. Демьянович**

*Институт земной коры СО РАН*

*664033, Иркутск-33, Лермонтова, 128*

*E-mail: akluchev@crust.irk.ru*

*Поступила в редакцию 28 января 2003 г.*

С целью изучения деструкции земной коры в Байкальском регионе выполнено исследование пространственно-временных вариаций формы дислокации землетрясений. В результате было выяснено, что форма дислокации землетрясения зависит от степени деформированности среды и величины энергетического класса толчка – чем меньше разрушена среда и слабее сейсмическое событие, тем ближе форма дислокации приближается к кругу. Исследования показали, что в центральной части региона земная кора деформирована сильнее, чем на флангах и окраинах, а максимальная деструкция среды обнаружена в Южнобайкальской впадине, являющейся историческим ядром Байкальской рифтовой зоны. Сейсмофокальный слой земной коры на юго-западном фланге региона менее деформирован в масштабах длин разрывов в очагах землетрясений до десятого-одиннадцатого энергетического класса. Выше этой величины разрушенность среды в различных районах Байкальского региона становится сопоставимой. Результаты изучения вариаций формы дислокаций во времени дают основание считать, что в исследуемый интервал времени процесс деструкции земной коры в Байкальском регионе имел тенденцию к ослаблению.

Ключевые слова: *Байкальский регион, деструкция, земная кора, коэффициент формы дислокации.*

## CRUSTAL DESTRUCTION IN THE BAIKAL REGION FROM THE DATA ON THE FORM OF EARTHQUAKE DISLOCATIONS

**A.V. Klyuchevskii, V.M. Demjanovich**

*Institute of the Earth Crust SB RAS, Irkutsk*

Investigation of spatio-temporal variations in dislocation form of earthquakes aimed at examining crustal destruction in the Baikal region has been performed. The results of the study showed that dislocation form of earthquakes depends on the degree of rock deformation and the energy class of a shock: the less the rock is destructed, the closer a form of dislocation approaches a circle. It was found that in the central part of the region the crust is deformed greater than on the flanks and edges and maximum rock fragmentation is observed in the South Baikal basin, which is a historical nuclei of the Baikal rift zone. Seismofocal layer in the crust on the south-western flank of the region is less deformed at the scale of rupture lengths in sources of earthquakes up to tenth-eleventh energy class. Above this value rock destruction in various sites of the Baikal region becomes comparable. The results of the study of variation in dislocation forms with time suggest that the destruction process in the crust in the Baikal region had a tendency to decrease in the study time span.

Key words: *Baikal region, destruction, earth crust, coefficient of dislocation form.*

## Введение

Поскольку пространственное расположение сейсмоопасных зон формируется напряженно-деформированным состоянием земной коры и тенденцией действия тектонических сил, то при выяснении закономерностей сейсмического процесса какого-либо сейсмоактивного региона важнейшее значение имеет понимание его геологического строения и современных процессов деструкции. Изучение напряженно-деформированного состояния земной коры в Байкальском регионе показало, что на значительной части территории Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) субгоризонтальные растягивающие напряжения, ориентированные вкрест простирания основных морфоструктур, играют главную роль [Мишарина, 1972]. Ось промежуточного напряжения также субгоризонтальна, но направлена параллельно геологическим структурам, а ось наименьшего главного напряжения близка к вертикали. На флангах и за пределами рифтовой зоны доминирующее значение режима растяжения ослабевает [Petit et al., 1996; Solonenko et al., 1997]. Центральная часть БРЗ характеризуется резким изменением мощности земной коры и большим количеством разломов, амплитуда которых достигает 10 км [Мишенькина и др., 2000].

При изучении деструкции земной коры в Байкальском регионе используются различные геофизические, в том числе и сейсмологические, методы [Шерман и др., 2002; Ключевский, Демьянович, 2002, б]. Данное исследование основано на том, что динамические параметры очага тектонического землетрясения зависят от формы и геометрических размеров дислокации [Аки, Ричардс, 1983; Ризниченко, 1985]. Форма дислокации определяет закон уменьшения модуля амплитудного спектра Фурье на высоких частотах и вклад процессов возникновения и остановки разрыва в уровень спектра, а линейные размеры дислокации связаны с длительностью импульсного процесса разрушения среды. Форма и размеры дислокации зависят от используемых моделей очага землетрясения и среды распространения сейсмического сигнала и могут изменяться под влиянием следующих основных факторов: энергии толчка; напряженно-деформированного состояния и структуры земной коры в зоне очага; взаиморасположения дислокации и сейсмических станций; числа пунктов регистрации. В случае ис-

пользования одной модели очага в условиях однородной идеальной среды распространения сигнала основными факторами, определяющими форму и размеры дислокации, являются энергия толчка, состояние среды в зоне очага, число регистрирующих станций и пространственное расположение дислокации. При увеличении числа станций и равномерном их распределении вокруг очага повышается вероятность записи всевозможных проявлений процессов дислоцирования. Но, поскольку число пунктов наблюдения ограничено, могут возникнуть искажения в отражении процесса разрывообразования из-за недостаточно плотной системы регистрации. Эти искажения зависят, прежде всего, от взаиморасположения дислокации и сейсмических станций и обуславливают формирование нашего представления о дислокации, как и любого модельного представления, в некотором приближении к реальному.

В работах [Ключевский, 1994, 1997] было показано, что средние радиусы дислокации землетрясений и афтершоков Байкальской сейсмической зоны (БСЗ) и Монголии изменяются в пространстве и во времени, отражая вариации напряженно-деформированного состояния земной коры. Поскольку величину среднего радиуса круговой дислокации можно представить полусуммой максимального и минимального радиусов дислокации [Львовский, 1982], то вполне естественно предположить, что экстремальные (максимальное и минимальное) значения радиусов также будут варьировать. Величина их отношения (коэффициент формы дислокации) будет характеризовать, в первом приближении, форму дислокации и напряженно-деформированное состояние земной коры [Ризниченко, 1976]. В настоящей работе исследование вариаций формы дислокации землетрясений выполнено с целью изучения деструкции земной коры в Байкальском регионе. Рассмотрена связь формы дислокации с напряженно-деформированным состоянием и структурой земной коры в различных районах БСЗ и в очаговой области сильных сейсмических событий.

## Материалы и методика исследований

Первичные материалы взяты из отчетов "Бюллетень землетрясений Прибайкалья", в которых представлены основные сведения о землетрясениях БСЗ. Эти отчеты подготовлены сотрудниками группы сводной обработки

сейсмических наблюдений Байкальской опытно-методической сейсмологической экспедиции (БОМСЭ). В качестве первичных материалов были использованы периоды максимальных смещений в объемных поперечных волнах более 80 тысяч землетрясений с энергетическим классом  $6 \leq K_p \leq 15$ , зарегистрированных на территории Байкальского региона ( $\varphi=48^\circ-60^\circ$  с.ш.,  $\lambda=96^\circ-122^\circ$  в.д.) с 1968 по 1994 гг. В расчетах применены формулы динамической трещинной модели Бруна [Brune, 1970; 1971], в соответствии с которой дислокация происходит в результате мгновенного приложения тангенциального импульса к внутренней стороне разрыва.

Радиусы дислокаций вычислены по формуле

$$R=2.34V / 2\pi f_0, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус дислокации, км,  $V=3.58$  км/сек – скорость распространения объемных поперечных волн,  $f_0$  – частота угловой точки, которая определяется путем пересчета из значения видимого периода максимального смещения в  $S$ -волне [Ключевский, Демьянович, 2002, а]. Среда распространения сейсмических сигналов принята идеальной, не влияющей на частоту сейсмического сигнала. Такое приближение близко соответствует реальному распределению видимых периодов максимальных смещений в  $S$ -волнах, определенных по записям региональной сети сейсмических станций Прибайкалья [Ключевский, Демьянович, 2003].

Из массива величин радиусов, полученных для каждого землетрясения, выбирались максимальное и минимальное значения радиусов дислокации, и находилось их отношение  $R_1/R_2$ . Форма дислокации зависит от длительности процесса дислоцирования и в выбранном приближении имеет вид эллипса. Такая форма дислокации может сформироваться неоднородностью очаговой среды и появлением препятствий для разрыва, средняя скорость распространения которого постоянна и одинакова во всех направлениях. При исследовании пространственно-временных вариаций формы дислокации для совокупностей сейсмических событий были определены корреляционные формулы распределения чисел землетрясений в зависимости от величины отношения радиусов, имеющие вид

$$\text{Lg } N = A + d \times R_1/R_2, \quad (2)$$

где  $R_1/R_2$  – коэффициент формы дислокации,  $N$  – число толчков, у которых область изменения отношения радиусов заключена в пределах единицы,  $A$  и  $d$  – коэффициенты. Форму-

ла (2) имеет вид, аналогичный хорошо известному выражению графика повторяемости землетрясений, в котором энергетический класс  $K_p$  заменен параметром  $R_1/R_2$ , и информирует об относительном напряженно-деформированном состоянии земной коры по данным совокупности землетрясений. Коэффициент  $d$  характеризует соотношение чисел толчков, имеющих различные значения  $R_1/R_2$ . Чем меньше значение  $d$ , тем больше в выборке толчков, форма дислокации которых приближается к кругу. Изометрическая форма дислокации ( $R_1/R_2 \rightarrow 1$ ) характерна для землетрясений, дислоцирование которых происходит при квазиоднородном напряженно-деформированном состоянии очаговой среды [Ризниченко, 1976; 1985].

С целью регионализации исследований напряженно-деформированного состояния и деструкции земной коры, территория БСЗ была разделена на три района: юго-западный –  $\varphi=48^\circ-53^\circ$  с.ш.,  $\lambda=96^\circ-104^\circ$  в.д.; центральный –  $\varphi=51^\circ-54^\circ$  с.ш.,  $\lambda=104^\circ-113^\circ$  в.д. и северо-восточный –  $\varphi=54^\circ-60^\circ$  с.ш.,  $\lambda=109^\circ-122^\circ$  в.д. В процессе исследований каждый из этих районов был разделен на два примерно равные по площади участка по долготе  $\lambda=100^\circ$  в.д.;  $\lambda=108^\circ$  в.д. и  $\lambda=116^\circ$  в.д., соответственно. Для удобства определим их как районы 1, 2, 3 и участки 1–6, начиная отсчет последовательно с юго-запада на северо-восток. Такое разделение территории, отражающее структуру сейсмического поля Байкальской региона, состоящего из юго-западного и северо-восточного флангов и центральной части, оказалось удобным при исследовании пространственно-временных вариаций сейсмических моментов землетрясений БСЗ [Ключевский, 2000].

При изучении динамики процессов деструкции в земной коре Байкальского региона были определены значения коэффициента  $d$  в годовых выборках землетрясений, произошедших с 1968 по 1994 гг. на территории БСЗ, трех районов и шести участков, и рассмотрены их вариации во времени. Коэффициент  $d$  был использован при анализе временных вариаций  $R_1/R_2$  в продолжительных сериях афтершоков Бусингольского (27.12.1991; 09-09-36.4 с;  $M_{LH}=6.5$ ;  $K_p=16.2$ ;  $\varphi=50.98^\circ$  с.ш.,  $\lambda=98.08^\circ$  в.д.) и Южно-Якутского (20.04.1989; 22-59-54.8 с;  $M_{LH}=6.6$ ;  $K_p=16.5$ ;  $\varphi=57.17^\circ$  с.ш.,  $\lambda=122.31^\circ$  в.д.) землетрясений, произошедших на юго-западном и северо-восточном флангах БСЗ. Значения коэффициента  $d$  были определены в выборках из

Результаты исследований

200 афтершоков, последовательно делящих серии толчков. Афтершоки Южно-Якутского землетрясения регистрировались и обрабатывались совместными усилиями якутских и иркутских сейсмологов, развернувших в окрестностях эпицентра локальную группу временных сейсмических станций. Имеющиеся фактические данные дают возможность исследования коэффициента  $d$  с начала серии и до конца 1989 года с привлечением и без привлечения материалов группы временных станций. Афтершоки локализованы в площадке, ограниченной координатами  $\varphi=56.90^{\circ}-57.25^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=122.00^{\circ}-122.60^{\circ}$  в.д. Радиусы дислокаций главного землетрясения и двух наиболее сильных афтершоков 29.04 и 17.05.1989 ( $K_p=13.7, M_{LH}=5.2$  и  $K_p=14.8, M_{LH}=6.0$ ) не использовались в расчетах из-за отсутствия исходных данных. Исследование афтершоков Бусингольского землетрясения выполнено для толчков, зарегистрированных в площадке  $\varphi=50.80^{\circ}-51.20^{\circ}$  с.ш.,  $\lambda=97.80^{\circ}-98.20^{\circ}$  в.д. с начала серии до конца 1994 г.

При изучении зависимости формы дислокации от энергетического класса землетрясений Байкальского региона и трех районов коэффициенты  $d$  были вычислены по распределениям чисел толчков каждого класса. Установлены корреляционные соотношения параметра  $R_1/R_2$  и энергетического класса  $K_p$  для ряда пространственно-временных выборок землетрясений.

На рис. 1 представлены вариации коэффициента  $d$  в Южно-Якутской и Бусингольской афтершоковых сериях. На графиках начало отсчета близко соответствует моменту времени основного сильного землетрясения, а значение коэффициента  $d$  приписывается середине временного интервала выборки из 200 афтершоков. На рис. 1 видно, что изменения  $d$  наиболее существенны во время сильных афтершоков серий, а самое заметное уменьшение  $d$  в Южно-Якутской последовательности толчков наблюдается в промежутке времени между двумя сильнейшими афтершоками. Это отражает тот факт, что максимальные объемные разрушения среды происходят в результате сильных землетрясений. Для совокупностей афтершоков Южно-Якутской и Бусингольской серий уравнения корреляции логарифма  $N$  в зависимости от  $R_1/R_2$  получены в виде:

$$\text{Lg } N \pm 0.23 = (3.24 \pm 0.13) - (0.24 \pm 0.02) R_1/R_2, \quad \rho = 0.98 \pm 0.01, F = 20.3, n = 2515, \quad (3)$$

$$\text{Lg } N \pm 0.12 = (4.49 \pm 0.11) - (0.77 \pm 0.03) R_1/R_2, \quad \rho = 0.99 \pm 0.01, F = 83.2, n = 6079, \quad (4)$$

где  $\rho$  – коэффициент корреляции,  $F$  – критерий Фишера,  $n$  – число использованных толчков. Из формул (3, 4) видно, что коэффициент  $d$  в Бусингольской серии почти в три раза меньше, чем в Южно-Якутской. Это указывает на

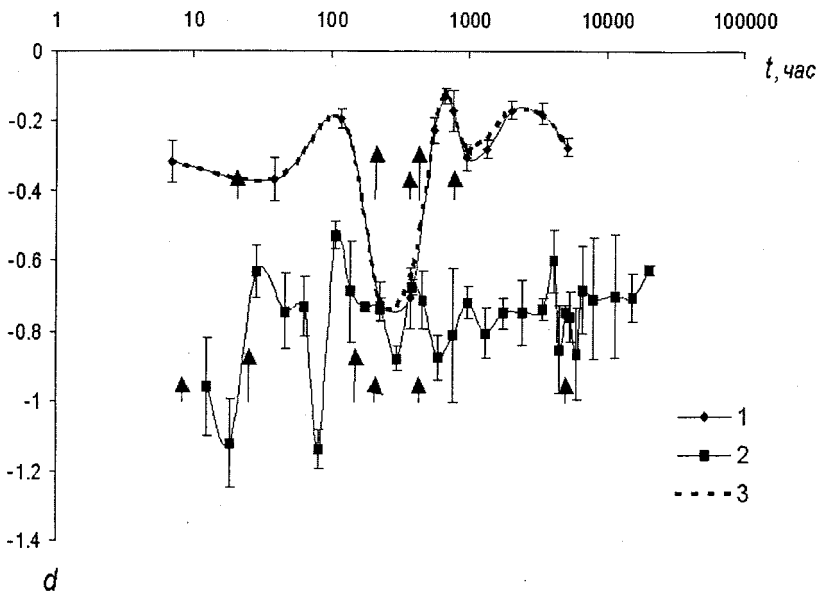


Рис. 1. Вариации коэффициента  $d$  при развитии афтершоковых серий.

1 – Южно-Якутская серия, 2 – Бусингольская серия, 3 – Южно-Якутская серия без учета данных группы временных сейсмических станций; длинные стрелки в Южно-Якутской серии указывают моменты времени землетрясений с  $K_p \approx 14-15$ ; длинные стрелки в Бусингольской серии указывают время групп из пяти и трех афтершоков с  $K_p \approx 13$ ; короткие стрелки указывают моменты времени толчков с  $K_p \approx 13$  в обеих сериях.

то, что афтершоки в Бусингольской серии чаще имели более изометрическую форму дислокации, чем толчки в Южно-Якутской последовательности, и очаговая зона Бусингольского землетрясения разрушена слабее, чем очаговая зона Южно-Якутского события.

На рис. 2 представлены распределения чисел землетрясений БСЗ, трех районов и шести участков в зависимости от величины  $R_1/R_2$ . Область изменения отношения радиусов дислокаций равна  $1.0 < R_1/R_2 \leq 14.0$  при дискретизации отношения радиусов  $R_1/R_2 = 1$  и средних значениях диапазонов дискретизации  $R_1/R_2 = 1.5; 2.5; \dots 13.5$ . На рис. 2 видно, что форма распределений сохраняется для всех исследуемых областей. Наиболее существенное отличие формы графиков наблюдается для толчков первого участка – наклон более крутой, чем в остальных районах, а чем круче наклон графика, тем больше землетрясений с изометрической формой дислокации и тем меньше деструкция земной коры.

На рис. 3 приведена карта изолиний значений  $d$ , определенных для землетрясений БСЗ, зарегистрированных в пределах площадок  $2.0^\circ \times 2.0^\circ$ . Сглаживание данных выполнено при шаге в  $1^\circ$  по широте и долготе, а значения  $d$  приписаны центрам площадок. На карте заметно некоторое изменение контура сейсмического поля Байкальского региона, обусловленное использованием крупных площадок отбора данных и построением изолиний  $d$  в прямоугольных координатах. На рис. 3 видно, что в центральной части карты в пределах третьего участка параметр  $d$  имеет повышенные значения, а максимум  $d \approx -0.26$  локализуется в Южно-Байкальской впадине. По мнению Н.А. Логачева [Логачев, 1999, 2000] этот участок является самым ранним элементом Байкальской рифтовой системы, ее историческим ядром,

Рис. 2. Распределения чисел землетрясений в зависимости от величины коэффициента формы дислокации.

1 – БСЗ, 2-4 – первый-третий районы, 5-10 – первый-шестой участки.

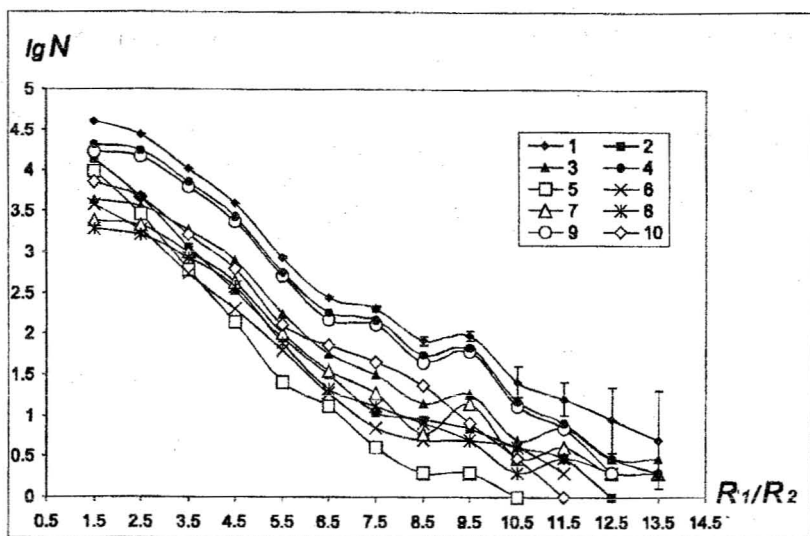
а чем продолжительнее история деформационных процессов, тем сильнее и в большем объеме должна быть разрушена земная кора. К северо-востоку и юго-западу, в области рифтовых впадин, значения параметра  $d$  меньше. За пределами рифтовой зоны наблюдается дальнейшее уменьшение коэффициента  $d$  и выделяются локальные участки с минимальными  $d$ . В этих участках сейсмические события имели изометрическую форму дислокации чаще, чем в центральной части Байкальского региона. Самый большой участок расположен на юго-западном фланге БСЗ. Следует отметить, что некоторые из этих участков совпадают с зонами промышленных взрывов.

На рис. 4 показаны вариации годовых значений параметра  $d$  в Байкальском регионе и трех районах. На рис. 4 видно, что графики, полученные для БСЗ, второго и третьего районов, совпадают при 10%-ом уровне значимости. Значения параметра  $d$  на юго-западном фланге меньше, чем в центральном и северо-восточном районах. Графики имеют тенденцию к уменьшению  $d$  со временем. Для Байкальского региона корреляционная зависимость коэффициента  $d$  от времени получена в виде

$$d \pm 0.04 = [-0.005(T-68) \pm 0.001 + (-0.30 \pm 0.02)],$$

$$\rho = -0.73 \pm 0.09, F = 2.14. \quad (5)$$

где  $T$  – время, отсчитываемое с 1968 г. Для районов и участков вид зависимости (5) сохраняется, а значения коэффициента перед переменной  $T$  изменяются от  $-0.002$  в уравнении для 3-го участка до  $-0.009$  в формуле для 1-го участка. В начале девяностых годов наблюдается сильное понижение параметра  $d$  в первом районе и первом участке. Минимальное значение  $d$  соответствует 1992 году, и этот ми-



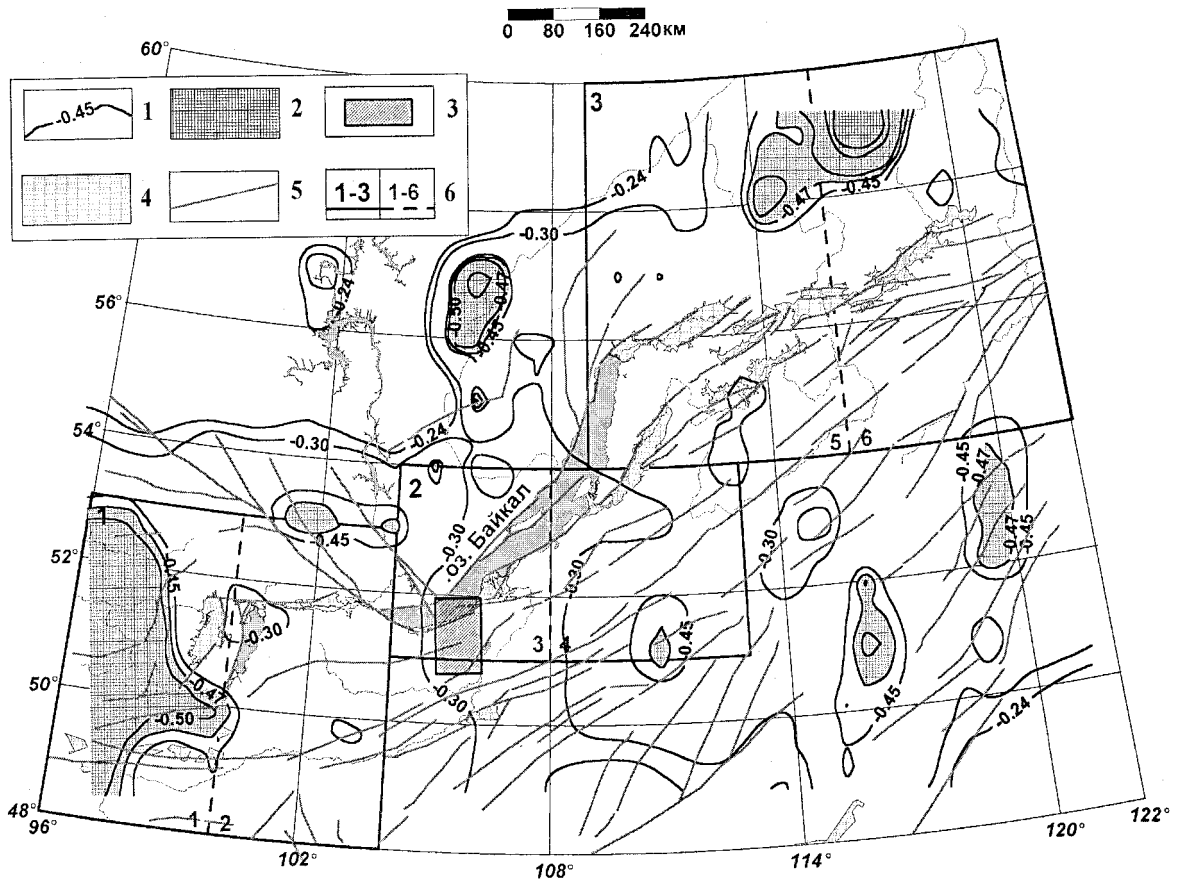


Рис. 3. Карта изолиний коэффициента  $d$ .

1 – изолинии коэффициента  $d$ , 2 – участки с пониженными значениями  $d$ , 3 – участок с максимальным значением  $d$ , 4 – впадины, 5 – разломы, 6 – номера районов и участков.

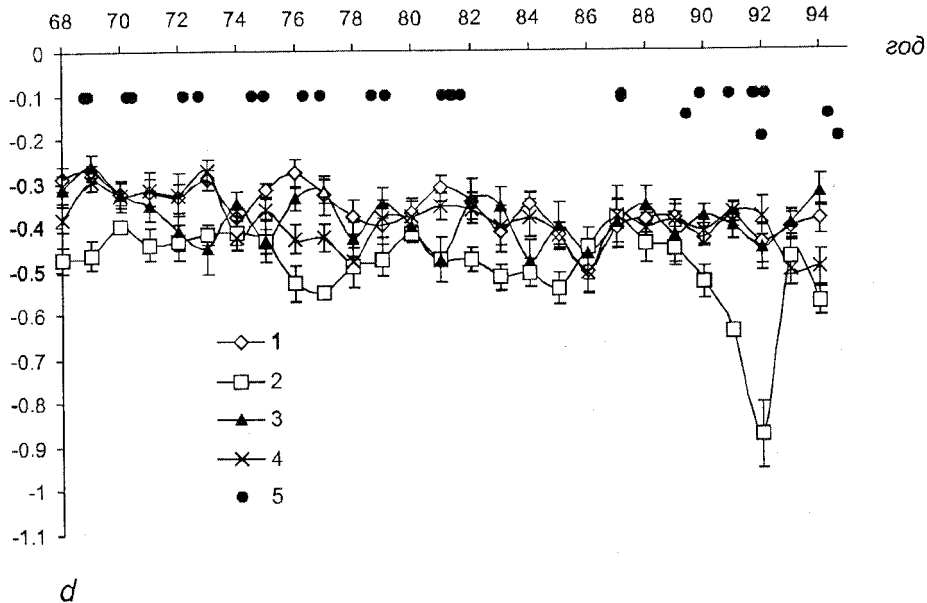


Рис. 4. Вариации коэффициента  $d$  во времени.

1 – БСЗ, 2-4 – первый-третий районы, 5 – моменты времени землетрясений с  $K \geq 14$  – при  $K_p = 14$ ; 15 и 16 уровень маркера равен -0,1; -0,15 и -0,2, соответственно.

нимум совпадает во времени с Бусингольским землетрясением и его афтершоковой серией.

На рис. 5 представлены графики изменения коэффициента  $d$  от энергетического класса землетрясений БСЗ и трех районов. На рисунке видно, что в диапазоне энергетических классов  $K_p=6-10$  наблюдается совпадение графиков, полученных для БСЗ, второго и третьего районов, и существенное их отличие от графика юго-западного фланга. При  $K_p=11-12$  происходит пересечение графиков и для более сильных землетрясений они совпадают в пределах стандартного отклонения параметра  $d$ . Уравнение корреляционной связи параметра  $d$  с энергетическим классом землетрясений БСЗ получено в виде

$$d \pm 0.04 = (-0.67 \pm 0.05) + (0.040 \pm 0.005) K_p, \quad \rho = 0.95 \pm 0.03, \quad F = 7.70. \quad (6)$$

Это уравнение показывает, что форма дислокации зависит от энергетического класса толчка – чем слабее сейсмическое событие, тем ближе форма дислокации приближается к кругу.

Чтобы детально охарактеризовать уровень деструкции земной коры в Байкальском регионе, на рис. 6 представлена карта изолиний максимальных значений коэффициента формы дислокации. Карта построена по данным с площадок размером  $0.15^\circ \times 0.10^\circ$  при градации изолиний  $R_1/R_2$  в единицу. На рис. 6 видно, что на флангах и периферии БСЗ максимальные величины  $R_1/R_2$  меньше, чем в центральной части региона. Зоны, в которых максимальные значения коэффициента формы дислокации превышают  $R_1/R_2 \geq 6$ , выделяются на карте в виде отдельных “пятен” повышенного локального разрушения и расположены вдоль Байкальского рифта. Эти зоны, как правило, приурочены к рифтовым впадинам, а размеры “пятен” достаточно хорошо коррелируются с размерами соответ-

ствующих впадин – наиболее обширные области максимально разрушенной среды наблюдаются в пределах впадины озера Байкал, с последующим уменьшением размеров “пятен” к юго-западу и северо-востоку. Самая большая область вытянута вдоль Южнобайкальской впадины в районе Селенгинской перемычки. Несколько меньшая область расположена в районе Академической перемычки (о. Ольхон – Академический хребет – Ушканий архипелаг) с направлением изолиний поперек впадины. На юго-западном фланге зона повышенных значений  $R_1/R_2$  совпадает с западной оконечностью Тункинской впадины. В северо-восточной части карты наблюдается последовательность “пятен” северо-восточного и восточного направления, наиболее значительное из которых расположено в районе Северомуйской перемычки.

По аналогии с [Ризниченко, 1976] оценка корреляционной связи  $R_1/R_2$  и энергетического класса  $K_p$  землетрясений Байкальского региона выполнена в виде линейной регрессии. Полученное уравнение корреляции указывает на достаточно сильную зависимость формы дислокаций от  $K_p$  и разброс исходных данных

$$R_1/R_2 \pm 1.10 = (0.18 \pm 0.03) + (0.31 \pm 0.01) K_p, \quad \rho = 0.29 \pm 0.003, \quad F = 1.09, \quad n = 83492. \quad (7)$$

Разброс значений  $R_1/R_2$  следовало ожидать исходя из результатов исследования пространственных вариаций коэффициента формы дислокации, которые указывают на локальную избирательность процесса деструкции земной коры в Байкальском регионе. Следует отметить, что коэффициент пропорциональности для всей зоны, приближаясь к величине, равной 0.3, отличается от значе-

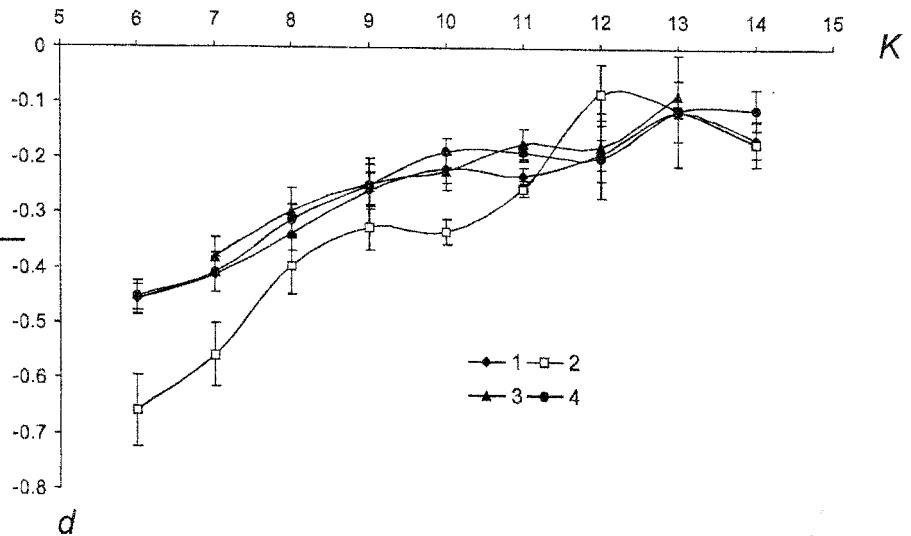


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента  $d$  от энергетического класса землетрясений.

1 – БСЗ, 2-4 – первый-третий районы.

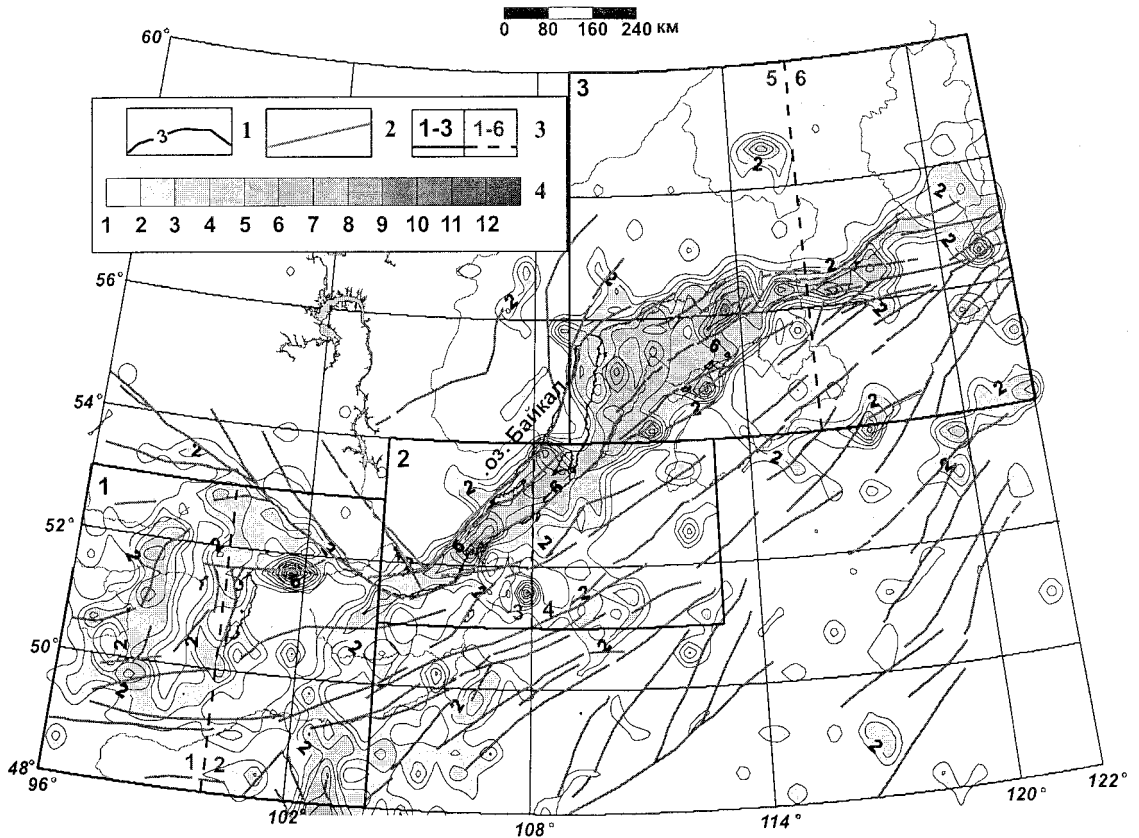


Рис. 6. Карта изолиний максимальных значений коэффициента формы дислокации. 1 – изолинии, 2 – разломы, 3 – номера районов и участков, 4 – шкала изолиний.

ния 0.1, принятого в работе [Ризниченко, 1976] при теоретической оценке соотношения длины и ширины очага корового землетрясения. Высокое значение коэффициента может быть обусловлено широким спектром и различными уровнями разрушений земной коры в Байкальском регионе, которые особенно значительны в рифтовой зоне. Можно отметить, что для небольших пространственно-временных выборок землетрясений величина коэффициента корреляции, как правило, выше. Так для толчков с  $7 \leq K_p \leq 14$ , зарегистрированных в пределах площадки  $\varphi = 50^\circ - 52^\circ$  с.ш.,  $\lambda = 96^\circ - 98^\circ$  в.д. за интервал времени 1968–1972 гг., было получено уравнение корреляции

$$R_1/R_2 \pm 0.78 = (-1.09 \pm 0.40) + (0.33 \pm 0.05) K_p, \\ \rho = 0.55 \pm 0.06, F = 1.42, n = 154.$$

### Обсуждение результатов

Из формулы (2) следует, что уменьшение параметра  $d$  происходит при относительном увеличении в выборке числа землетрясений, у которых форма дислокации стремится к кругу, а величина  $R_1/R_2 \rightarrow 1$ . Приближение коэффициента формы дислокации к единице может осуществляться двумя способами – при уменьшении максимальных радиусов дислокации до минимальных и при увеличении минимальных радиусов до максимальных. Уменьшение максимальных радиусов дислокации происходит в процессе афтершоковых серий, когда среда в одном месте разрушается при сильных повторных толчках [Ключевский, 1994]. Это локальное anomalous явление выделяется на рис. 1 между двумя сильнейшими афтершоками



Южно-Якутской последовательности толчков, а также на рис. 4 на графиках первого района во время Бусингольской афтершоковой серии. Приближение минимальных радиусов дислокации к максимальным, скорее всего, будет происходить в условиях однородной изотропной среды при квазистационарном поле тектонических напряжений. В пределах БСЗ подобное приближение частично выполняется в отдельных участках на флангах и вне рифтовой зоны. На это указывают карты изолиний параметра  $d$  и максимальных значений  $R_1/R_2$  (рис. 3, 6).

Расположение площадки с максимальным значением параметра  $d$  в районе Южнобайкальской впадины (рис. 3) на границе двух главных литосферных плит Восточной Сибири не случайно. По мнению Н.А. Логачева [1999, 2000] этот район является самым ранним элементом Байкальской рифтовой системы, ее историческим ядром. Естественно, чем продолжительнее история тектонических и сейсмодоформационных процессов, тем сильнее и в большем объеме будет разрушена среда, на что и указывает максимум параметра  $d$ . На карте изолиний максимальных значений коэффициента формы дислокации (рис. 6) в этом районе наблюдается обширная зона очень высоких значений  $R_1/R_2 \geq 6$ .

Можно предположить, что совпадение зон промышленных взрывов с локальными участками, в которых коэффициенты  $d$  минимальны, также не случайно. Взрывы характеризуются объемной областью расширения более округлой формы, чем дислокации землетрясений. Возможно, что некоторые из сейсмических событий, зарегистрированных сетью станций БОМСЭ в пределах этих локальных участков, не землетрясения, а взрывы.

Для всех исследованных территорий отмечается тенденция уменьшения величины параметра  $d$  со временем. Наиболее сильно это происходит на первом участке, а наименее заметно – на третьем участке. Уменьшение параметра  $d$  со временем указывает на относительный рост числа очагов с изометрической формой дислокации. Это, как отмечено выше, будет происходить, в основном, при стремлении напряженно-деформированного состояния среды к квазиоднородности и квазистационарности. Уменьшение параметра  $d$  со временем показывает, что процесс деструкции земной коры в Байкальском регионе может ослабевать. Распределение моментов времени наиболее сильных землетрясений БСЗ с энергетическим клас-

сом  $K_p \geq 14$ , приведенное на рис. 4, не противоречит этому выводу. На рис. 4 видно, что вплоть до 1989 года на территории Байкальского региона зарегистрированы толчки с  $K_p \leq 14$ , и только в 1992 и 1994 годах в пределах первого и шестого участков произошли землетрясения с  $K_p = 16$  и, возможно, процесс деструкции земной коры БСЗ усилился.

Форма дислокации землетрясения зависит от степени деформированности среды и величины энергетического класса толчка – чем меньше разрушена среда и слабее сейсмическое событие, тем ближе форма дислокации приближается к кругу. В соответствии с рис. 5 земная кора юго-западного фланга БСЗ менее деформирована в масштабах длин разрывов в очагах землетрясений до десятого-одиннадцатого энергетического класса (порядка первых километров). Выше этой величины разрушенность земной коры в различных районах Байкальского региона становится, очевидно, сопоставимой.

При анализе графиков рис. 2 было отмечено, что распределение чисел землетрясений первого участка от величины  $R_1/R_2$  имеет более крутой наклон, чем остальные графики. Это указывает на то, что в пределах первого участка землетрясения чаще имели изометричную форму дислокации. Объединение групп толчков с различными тенденциями образования формы дислокации создаст наблюдаемый на рис. 2 эффект суперпозиции – излом на графике первого района в точке  $R_1/R_2 = 7.5$  обусловлен, скорее всего, совместным использованием землетрясений первого и второго участков. При этом толчки первого участка вносят основной вклад в левую часть графика первого района, а толчки второго участка – в правую половину. На графике, полученном для землетрясений БСЗ, особенности дислокаций толчков первого участка уже не прослеживаются. Из графиков на рис. 2 следует, что максимумы распределения чисел землетрясений всех энергетических классов соответствуют значению  $R_1/R_2 = 1.5-2.5$  и среди землетрясений Байкальского региона преобладают толчки, у которых длина дислокации в среднем в полтора-три раза больше ширины.

## Выводы

При изучении деструкции земной коры в Байкальской сейсмической зоне выполнено исследование пространственно-временных вариаций формы дислокации землетрясений. В результате исследований было получено:

1. Форма дислокации землетрясения зависит от степени деформированности среды и величины энергетического класса толчка – чем меньше разрушена среда и слабее сейсмическое событие, тем ближе форма дислокации приближается к кругу.

2. В центральной части региона земная кора деформирована сильнее, чем на флангах и окраинах. Максимальная деструкция среды обнаружена в Южнобайкальской впадине, являющейся историческим ядром Байкальской рифтовой зоны. Наименьшая разрушенность среды наблюдается на юго-западном фланге БСЗ, где земная кора менее деформирована в масштабах длин разрывов в очагах землетрясений до десятого-одиннадцатого энергетического класса (порядка первых километров). Выше этой величины разрушенность среды в различных районах Байкальского региона становится сопоставимой.

3. Результаты изучения вариаций формы дислокаций во времени дают основание считать, что в исследуемый интервал времени процесс деструкции земной коры в Байкальском регионе имел тенденцию к ослаблению.

### Список литературы

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. М.: Мир, 1983. 872 с.

Ключевский А.В. Динамические параметры очагов афтершоков Байкальской сейсмической зоны // Геология и геофизика. 1994. № 2. С. 109–116.

Ключевский А.В. Динамические параметры очагов землетрясений Монголии // Вулканология и сейсмология. 1997. № 3. С. 100–110.

Ключевский А.В. Пространственно-временные вариации сейсмических моментов очагов землетрясений Байкальского региона // Доклады АН. 2000. Т. 373. № 5. С. 681–683.

Ключевский А.В., Демьянович В.М. Динамические параметры очагов сильных землетрясений Байкальской сейсмической зоны // Физика Земли. 2002 а. № 2. С. 55–66.

Ключевский А.В., Демьянович В.М. Сейсмодетформированное состояние земной коры Байкальского региона // Доклады АН. 2002 б. Т. 382. № 6. С. 816–820.

Ключевский А.В., Демьянович В.М. Оценка влияния модели среды распространения сейсмических сигналов на определение динамических параметров очагов землетрясений Байкальского региона // Вулканология и сейсмология. 2003. № 2. С. 58–71.

Логачев Н.А. Главные структурные черты и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Физическая мезомеханика. 1999. Т. 2. № 1–2. С. 163–170.

Логачев Н.А. О рациональном районировании геологической структуры впадины озера Байкал // Доклады АН. 2000. Т. 375. № 5. С. 657–661.

Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул // М.: Высшая школа, 1982. 224 с.

Мишарина Л.А. Напряжения в очагах землетрясений Монголо-Байкальской зоны // Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. С. 161–171.

Мишенькина З.Р., Мишенькин Б.П., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф. Возможности изучения литосферы методом глубинного сейсмического зондирования на примере Байкальской рифтовой зоны // Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. С. 166–170.

Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.

Ризниченко Ю.И. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 405 с.

Шерман С.И., Демьянович В.М., Лысак С.В. Новые данные о современной деструкции литосферы в Байкальской рифтовой зоне // Доклады АН. 2002. Т. 387. № 4. С. 533–536.

Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. PP. 4997–5009.

Brune J.N. Corrections // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 5002.

Petit C., Deverchere J., Houdry F., Sankov V.A., Melnikova V.I. and Delvaux D. Present-day stress field changes along Baikal rift and tectonic implication // Tectonics. 1996. V. 15. No. 6. P. 1171–1191.

Solonenko A., Solonenko N., Melnikova V. and Shteiman E. The seismicity and earthquake focal mechanisms of the Baikal Rift Zone // Bull. Centres Rech. Elf Explor. Prod. 1997. V. 25. No. 1. P. 207–231.

Рецензент доктор геол.-мин. наук С.Н. Кашибин