

УДК 550.34.042+551.243

СЕЙСМОДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

© 2002 г. А. В. Ключевский, В. М. Демьянович

Представлено академиком Н.А. Логачевым 11.09.2001 г.

Поступило 20.09.2001 г.

При изучении напряженно-деформированного состояния земной коры Байкальского региона используются различные геолого-геофизические, в том числе и сейсмологические, методы. Анализ механизмов очагов землетрясений показал, что на значительной части территории Байкальской рифтовой зоны растягивающие напряжения, ориентированные вкрест простирания основных морфоструктур, играют главную роль [1]. На флангах и за пределами рифтовой зоны доминирующее значение режима растяжения ослабевает [2]. Центральная часть рифтовой зоны характеризуется резким изменением мощности земной коры и большим количеством разломов, амплитуда которых достигает 10 км [3].

В настоящей работе сейсмореформированное состояние земной коры Байкальского региона исследуется при использовании динамических параметров очагов землетрясений. В соответствии с полученными результатами сейсмофокальный слой земной коры в центральной части региона деформирован сильнее, чем на флангах и окраинах. Максимальная раздробленность среды обнаружена в пределах Южнобайкальской впадины. Наименьшие деформации сейсмофокальной области земной коры наблюдаются на юго-западном фланге региона. Полученные в работе карты деформированного состояния фокального слоя земной коры адекватно отражают геодинамику рифта и дают возможность мониторинга процесса сейсмореформирования Байкальского региона.

Как известно, динамические параметры очага тектонического землетрясения зависят от формы и геометрических размеров дислокации [4, 5]. Форма дислокации определяет закон уменьшения модуля амплитудного спектра Фурье на высоких частотах и вклад процессов возникновения и останковки разрыва в уровень спектра, а линейные размеры дислокации связаны с длительностью импульсного процесса разрушения среды. Форма

и размеры дислокации характеризуют напряженно-деформированное состояние среды в зоне очага.

В работе [6] показано, что средние радиусы дислокаций группирующихся толчков Байкальской сейсмической зоны (БСЗ) изменяются в пространстве и во времени, отражая вариации напряженно-деформированного состояния очаговой среды. Поскольку величину среднего радиуса круговой дислокации можно представить полусуммой максимального и минимального радиусов дислокации [7], то вполне естественно предположить, что экстремальные (максимальное и минимальное) значения радиусов также будут варьировать, а величина их отношения (коэффициент формы дислокации) будет характеризовать в первом приближении форму дислокации и напряженно-деформированное состояние очаговой среды.

В настоящей работе результаты анализа пространственно-временных вариаций формы дислокации в очагах землетрясений Байкальского региона положены в основу исследования сейсмореформированного состояния земной коры. В качестве первичных материалов использованы данные о периодах максимальных смещений в объемных поперечных волнах более 80 тысяч землетрясений с энергетическим классом $14 \geq K \geq 6$, зарегистрированных на территории Байкальского региона ($\varphi = 48^\circ - 60^\circ$ с.ш., $\lambda = 96^\circ - 122^\circ$ в.д.) с 1968 по 1994 гг. Радиусы круговых дислокаций определены для модели очага Бруна [8] по методике, разработанной в [9]. Среда распространения сейсмических сигналов принята идеальной, не влияющей на частоту сигнала. Радиусы дислокаций вычислены по формуле

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

где R – радиус дислокации, км, $V = 3.58$ км/с – скорость распространения объемных поперечных волн, f_0 – частота “угловой точки”, которая определяется путем пересчета значения видимого периода максимального смещения в объемной поперечной волне [9]. Из массива величин радиусов дислокации, полученных для каждого землетрясения, выбирались максимальное и минимальное значения и находилось их отношение R_1/R_2 . При

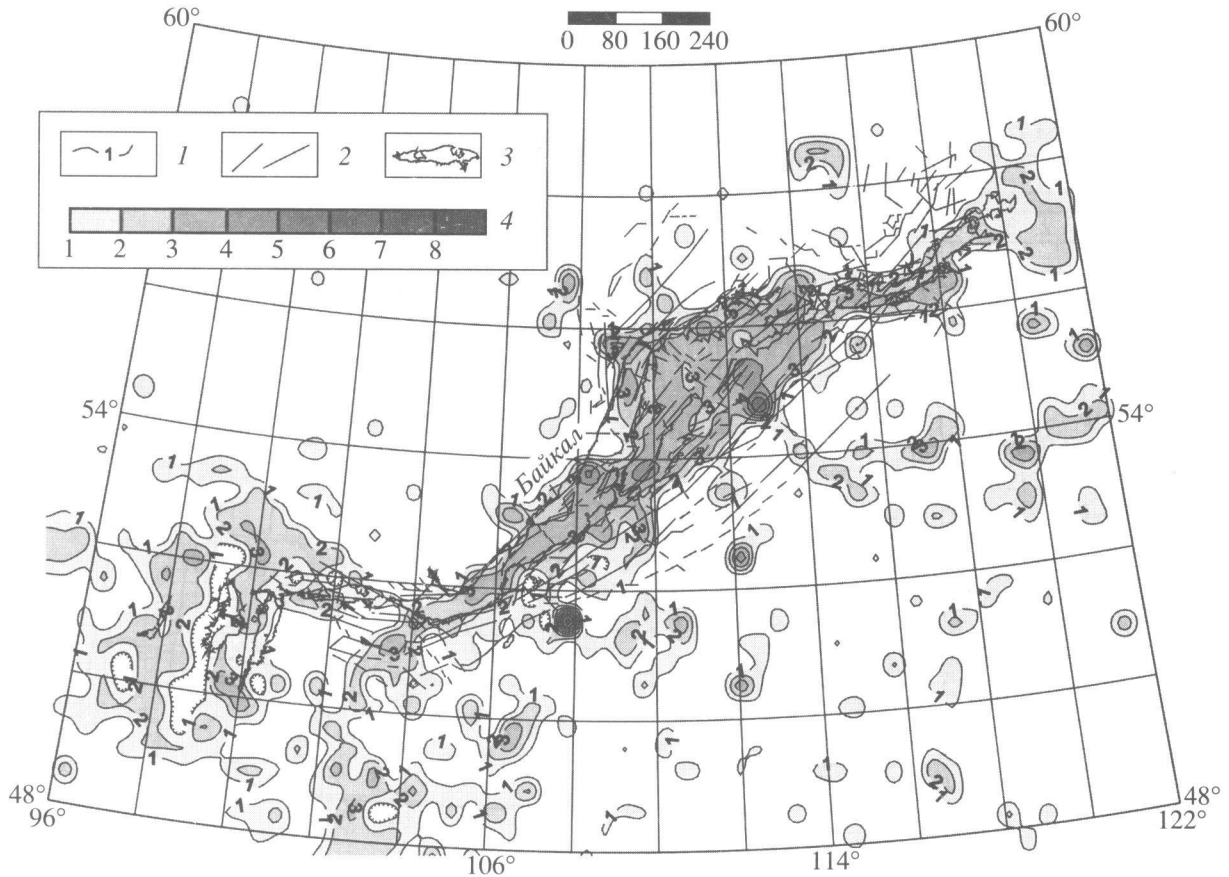


Рис. 1. Карта изолиний средних значений коэффициента формы дислокации. 1 – изолинии; 2 – разломы; 3 – впадины; 4 – шкала изолиний.

исследовании пространственно-временных вариаций формы дислокации для совокупностей сейсмических событий определены корреляционные формулы распределения чисел землетрясений в зависимости от величины отношения радиусов, имеющие вид

$$\lg N = A + d \cdot R_1/R_2, \quad (2)$$

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. Формула (2) имеет вид, аналогичный хорошо известному выражению графика повторяемости землетрясений, в котором энергетический класс K заменен параметром R_1/R_2 , и информирует об интегральном деформированном состоянии сейсмофокального слоя земной коры по данным совокупности землетрясений. Используемый в работе коэффициент d характеризует соотношение чисел толчков, имеющих различные значения R_1/R_2 .

Чтобы охарактеризовать уровень деформаций сейсмофокального слоя земной коры Байкальского региона, на рис. 1, 2 представлены карты изолиний средних и максимальных значений коэф-

фициента формы дислокации. Карты построены по данным с площадок размером $0.15^\circ \times 0.10^\circ$ при градации изолиний R_1/R_2 в единицу. На рис. 1 видно, что на флангах и периферии БСЗ средние величины R_1/R_2 меньше, чем в центральной части. Это указывает на то, что в центральной части БСЗ чаще происходят землетрясения, у которых форма дислокации более сжата, чем у толчков на флангах и периферии зоны. Поскольку в квазиоднородных условиях форма очагов тяготеет к изометрической ($R_1/R_2 \rightarrow 1$) [5], то преобладание землетрясений с более сжатой формой дислокации говорит об относительном повышении уровня деформации сейсмофокального слоя земной коры в центральной части БСЗ. На рис. 1 максимумы средних значений не превышают величины $R_1/R_2 = 4-5$ на всей территории. Только в одном случае среднее $R_1/R_2 \approx 8$ на площадке ($\varphi \approx 51.5^\circ$ с.ш., $\lambda \approx 107.8^\circ$ в.д.), в пределах которой произошел единственный толчок с таким высоким значением коэффициента формы дислокации.

На рис. 2 видно, что на флангах и периферии БСЗ максимальные величины R_1/R_2 меньше, чем в центральной части Байкальского региона. Зоны, в которых максимальные значения коэффи-

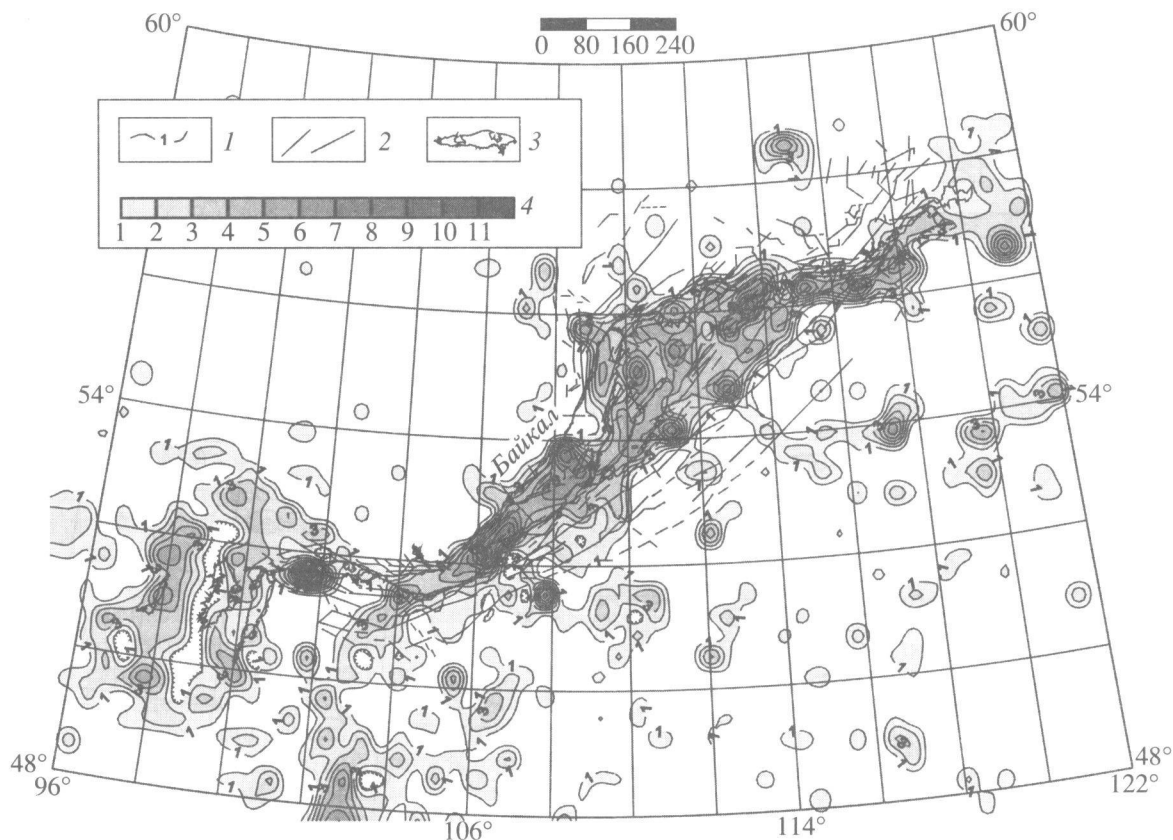


Рис. 2. Карта изолиний максимальных значений коэффициента формы дислокации. 1 – изолинии, 2 – разломы, 3 – впадины, 4 – шкала изолиний.

циента формы дислокации превышают $R_1/R_2 \geq 8$, выделяются на карте (рис. 2) в виде отдельных “пятен” и расположены вдоль Байкальского рифта. Эти зоны, как правило, приурочены к рифтовым впадинам, а размеры “пятен” достаточно хорошо коррелируются с размерами соответствующих впадин – наиболее обширные области максимального сейсмодетформированной среды наблюдаются в пределах впадины оз. 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-западе 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 направлений, наиболее значительное из которых расположено в районе Северомуйской перемычки.

На рис. 3 приведена карта изолиний значений d , определенных для землетрясений, зарегистри-

рованных в пределах площадок $2.0^\circ \times 2.0^\circ$. Изолинии построены методом кригинга при сглаживании данных с шагом в 1° по широте и долготу. На карте заметно некоторое изменение контура сейсмического поля Байкальского региона, обусловленное использованием крупных площадок отбора данных и процедурой сглаживания. На рис. 3 видно, что в центральной части карты параметр d имеет повышенные значения, а максимум $d \approx -0.26$ локализуется в выделенной на карте площадке. К северо-востоку и западу от этой площадки, в области рифтовых впадин, значение параметра d несколько понижается. За пределами этой области наблюдается дальнейшее уменьшение параметра d и выделяются несколько локальных участков с минимальными величинами d . В этих участках сейсмические события чаще имели более округлую форму дислокации, чем в центральной части Байкальского региона. Некоторые из этих участков совпадают с зонами промышленных взрывов. Самый большой участок, в котором из-за его географического расположения промышленные взрывы, вероятно, не проводились, находится на юго-западном фланге БСЗ. Появление на карте изолиний -0.3 и -0.2 , расположенных по контуру сейсмического поля, обус-

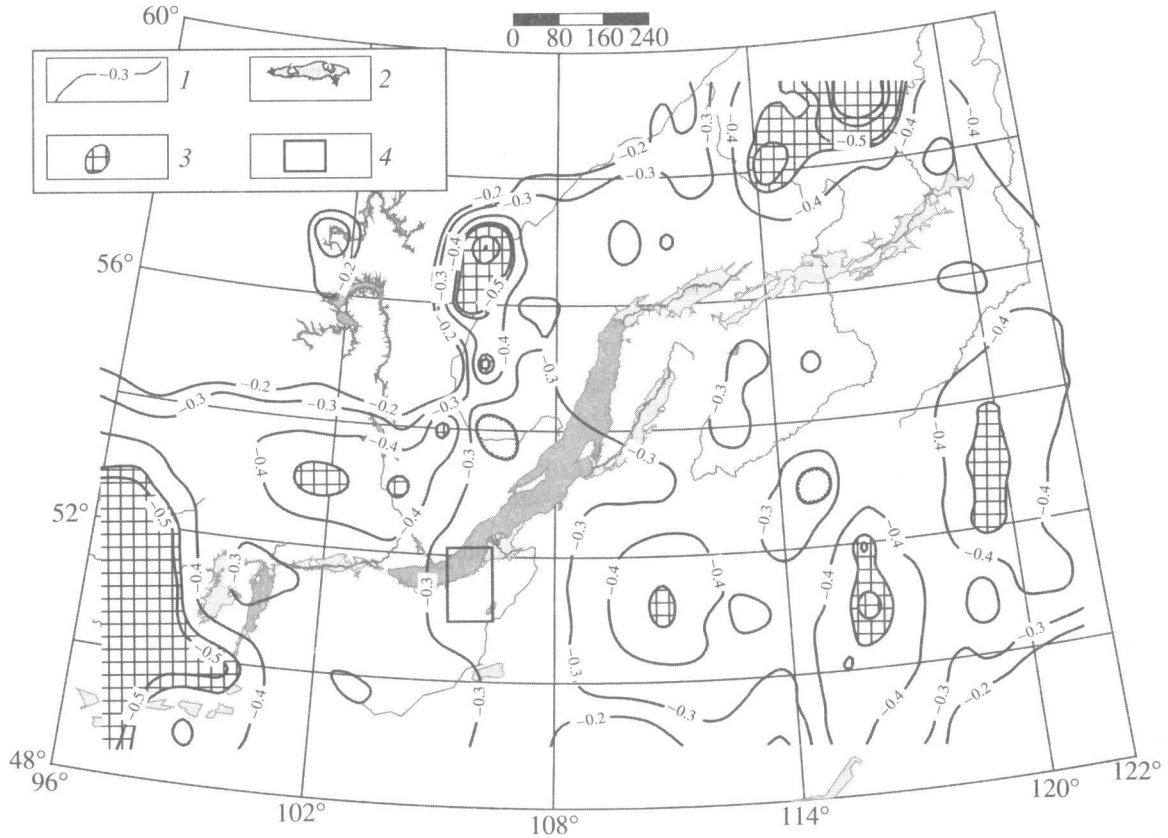


Рис. 3. Карта изолиний коэффициента d . 1 – изолинии коэффициента d ; 2 – впадины; 3 – участки с пониженными значениями d ; 4 – участок с максимальным значением d .

ловлено методикой построения изолиний, аппроксимирующей значения d к нулю.

Из формулы (2) следует, что чем выше значение параметра d , тем больше в этой выборке землетрясений с более сжатой формой дислокации. Это, как отмечено выше, соответствует более высокому уровню деформированного состояния сейсмофокальной среды. Таким образом, анализ карты изолиний параметра d приводит к выводам, полностью согласующимся с результатами, полученными при анализе карт изолиний средних и максимальных значений коэффициента формы дислокации (рис. 1, 2). Эти выводы сводятся к тому, что сейсмофокальный слой земной коры в центральной части Байкальского региона деформирован сильнее, чем на флангах и окраинах. Максимальная раздробленность среды обнаружена в пределах Южнобайкальской впадины. 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 [10], этот район является самым ранним элементом Байкальской рифтовой системы, ее историческим ядром. Естественно, чем продолжительнее история тектониче-

ских и сейсмодформационных процессов, тем сильнее и в большем объеме будет разрушена среда, на что и указывают максимум параметра d и максимальные размеры области высоких значе-

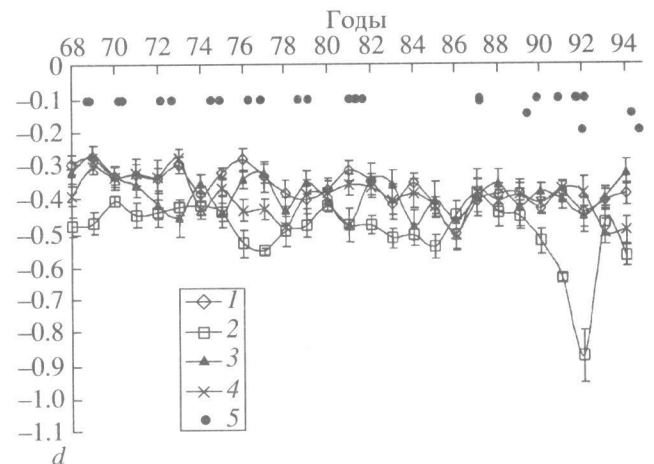


Рис. 4. Графики вариаций коэффициента d во времени. 1 – БСЗ; 2, 3 и 4 – юго-западный, центральный и северо-восточный районы соответственно; 5 – моменты времени землетрясений с $K \geq 14$: при $K = 14$; 15 и 16 уровень маркера равен -0.1 , -0.15 и -0.2 соответственно.

ний коэффициента формы дислокации. Наименьшие деформации сейсмофокальной области земной коры наблюдаются на юго-западном фланге Байкальского региона.

На рис. 4 приведены графики вариаций годовых значений параметра d на территории БСЗ и трех районов, имеющих следующие координаты: юго-западный – $\varphi = 48^\circ\text{--}53^\circ$ с.ш., $\lambda = 96^\circ\text{--}104^\circ$ в.д.; центральный – $\varphi = 51^\circ\text{--}54^\circ$ с.ш., $\lambda = 104^\circ\text{--}113^\circ$ в.д. и северо-восточный – $\varphi = 54^\circ\text{--}60^\circ$ с.ш., $\lambda = 109^\circ\text{--}122^\circ$ в.д. На рис. 4 видно, что графики, полученные для БСЗ, центрального и северо-восточного районов, совпадают в пределах погрешностей определения коэффициента d . Значения параметра d на территории юго-западного района меньше, чем в центральном и северо-восточном районах. Наиболее существенное изменение параметра d наблюдается в юго-западном районе в начале 90-х годов. Минимальное значение d соответствует 1992 г., и этот минимум совпадает во времени с Бусингольским землетрясением ($M_s = 6.5$, 27.12.1991 г., $\varphi = 50.98^\circ$ с.ш., $\lambda = 98.08^\circ$ в.д.) и последовавшей за ним афтершоковой серией. Графики имеют тенденцию к уменьшению величины d со временем. Для всего Байкальского региона корреляционная зависимость коэффициента d от времени получена в виде

$$d \pm 0.04 = [-0.005(T-68) \pm 0.001] + (-0.30 \pm 0.02), \quad (3)$$

$$\rho = -0.73 \pm 0.09, \quad F = 2.14,$$

где T – время, отсчитываемое с 1968 г., ρ – коэффициент корреляции, F – критерий Фишера. Для районов вид зависимости (3) сохраняется, а значения коэффициента перед переменной T изменяются от -0.006 в формуле для юго-западного до -0.003 в уравнении для центрального районов.

Таким образом, на всех территориях отмечается тенденция уменьшения величины параметра d со временем, что указывает на относительный рост числа очагов с более округлой формой дислокации. Это, как отмечено выше, будет происходить в основном при стремлении напряженно-

деформированного состояния среды к квазиоднородности и обусловлено, возможно, ослаблением процесса деформирования земной коры. Распределение моментов времени наиболее сильных землетрясений БСЗ с энергетическим классом $K \geq 14$, приведенное на рис. 4, не противоречит этому предположению. На рис. 4 видно, что вплоть до 1989 г. на территории Байкальского региона зарегистрированы толчки с $K \leq 14$, причем с 1982 по 1989 г. произошло всего два землетрясения с $K = 14$. Только в конце 1991 г. и в 1994 г. на юго-западном и северо-восточном флангах зоны произошли землетрясения с $K = 16$, и, возможно, процесс деформирования земной коры БСЗ усилился.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишарина Л.А. В сб.: Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. С. 161–171.
2. Solonenko A., Solonenko N., Melnikova V., Shteyman E. // Bull. Centres Rech. Elf Explor. Prod. 1997. V. 25. № 1. P. 207–231.
3. Мишенькина З.Р., Мишенькин Б.П., Петрик Г.В., Шелудько И.Ф. В сб.: Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. С. 166–170.
4. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. М.: Мир, 1983. 880 с.
5. Ризниченко Ю.И. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 405 с.
6. Ключевский А.В. // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 2. С. 109–116.
7. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высш. шк., 1982. 224 с.
8. Brune J.N. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4997–5009.
9. Ключевский А.В. Определение динамических параметров очагов землетрясений по записям аппаратуры с магнитной и гальванометрической регистрацией. Деп. в ВИНТИ 20.04.1989. № 2577. М., 1989. 16 с.
10. Логачев Н.А. // ДАН. 2000. Т. 375. № 5. С. 657–661.