

УДК 550.34.042+551.243

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

© 2003 г. А. В. Ключевский

Представлено академиком В.Н. Страховым 26.08.2002 г.

Поступило 26.09.2002 г.

Многолетнее и систематическое изучение напряженно-деформированного состояния земной коры Байкальского региона показало, 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]. В последнее время было установлено, что поле напряжений рифтовой зоны может претерпевать существенные пространственно-временные вариации, в результате которых изменяются механизмы очагов и сейсмические моменты землетрясений [3, 4]. Наименьшие деформации сейсмофокальной области земной коры наблюдаются на границе юго-западного фланга региона. Сейсмофокальный слой земной коры в центральной части региона деформирован сильнее, чем на флангах и окраинах, а максимальная раздробленность среды обнаружена в пределах Южно-Байкальской впадины [5]. По мнению Н.А. Логачева [6], этот район является самым ранним элементом Байкальской рифтовой системы, ее историческим ядром. В настоящей работе динамические параметры очагов землетрясений Байкальского региона использованы для исследования тонкой структуры пространственно-временных особенностей напряженно-деформированного состояния земной коры. Анализ карт относительного напряженно-деформированного состояния сейсмофокального слоя земной коры позволил выделить протяженные зоны максимумов структурно-силовых неоднородностей, хорошо коррелирующие с ареалом вулканической деятельности. Границы зон соответствуют границам областей напряжений глобального, регионального и суперпозиционного типов, а также границам областей дифференцированных по структуре и вещественному составу неоднородностей земной коры. В пределах зон формируется неустойчивое в пространстве и вре-

мени напряженно-деформированное состояние земной коры и локализуются “особые точки”, которые совпадают с местами и временем начала процесса преобразования полей напряжений при геодинамической активизации конца 1970-х – начала 1980-х гг. Полученные результаты дают возможность мониторинга и отчасти моделирования развития современных геодинамических и сейсмических процессов в Байкальском регионе.

В качестве первичных материалов использованы данные об амплитудах и периодах максимальных смещений в объемных поперечных волнах более 80 тысяч землетрясений с энергетическим классом $14 \geq K \geq 6$, зарегистрированных на территории Байкальского региона ($\varphi = 48^\circ\text{--}60^\circ$ с.ш., $\lambda = 96^\circ\text{--}122^\circ$ в.д.) с 1968 по 1994 г. Сейсмические моменты и радиусы дислокаций землетрясений определены для модели очага Бруна [7] по методике, примененной в [4, 5].

Карты относительного напряженно-деформированного состояния сейсмофокального слоя земной коры получены при использовании безразмерной характеристики – коэффициента формы дислокации $\frac{R_1}{R_2}$. Из массива величин радиусов дислокации, определенных для каждого землетрясения, выбирали максимальное и минимальное значения и находили их отношение $\frac{R_1}{R_2}$. При исследовании пространственных вариаций формы дислокации по данным совокупностей сейсмических событий были определены корреляционные формулы распределения чисел землетрясений в зависимости от коэффициента формы дислокации, имеющие вид

$$\ln N = A + d \frac{R_1}{R_2},$$

где N – число толчков, у которых область изменения отношения радиусов заключена в пределах единицы, A и d – коэффициенты. Формула информирует об относительном напряженно-деформированном состоянии сейсмофокального слоя земной коры по данным совокупности землетрясений,

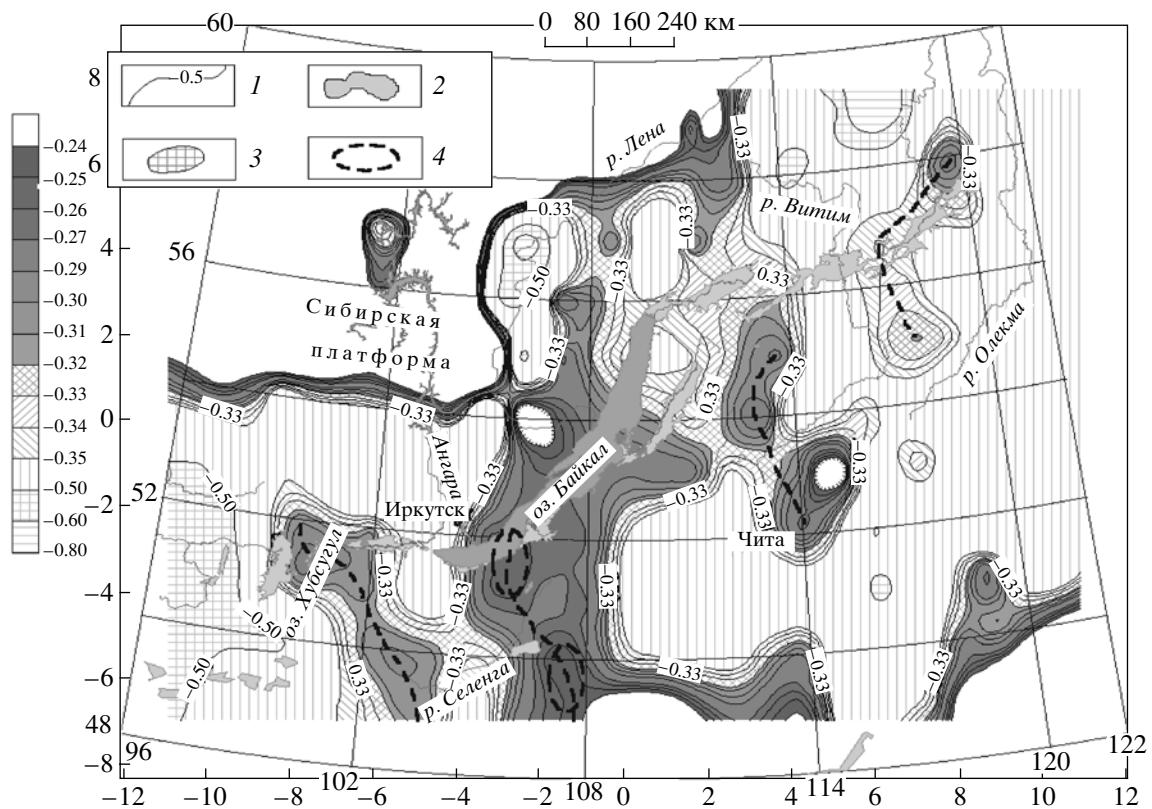


Рис. 1. Карта изолиний коэффициента d . Здесь и на рис. 2: 1 – изолинии коэффициента d ; 2 – впадины; 3 – участки с пониженными значениями d ; 4 – участки с максимальным значением d . Штриховая линия соединяет максимумы зон структурно-силовых неоднородностей.

а коэффициент d характеризует соотношение чисел толчков, имеющих различные значения $\frac{R_1}{R_2}$.

Чем меньше значение d , тем больше в выборке толчков, форма дислокации которых приближается к кругу. Изометрическая форма дислокации ($\frac{R_1}{R_2} \rightarrow 1$) характерна для землетрясений, дислоцирование которых происходит при квазиоднородном напряженно-деформированном состоянии очаговой среды [8].

На рис. 1, 2 представлены два варианта карты относительного напряженно-деформированного состояния сейсмофокального слоя земной коры Байкальского региона. Карты построены в изолиниях значений d , определенных для землетрясений, зарегистрированных в пределах площадок $2.0^\circ \times 2.0^\circ$. Сглаживание данных выполнено при шаге в 1° по широте и долготе, а значения d приписаны центрам площадок. На картах заметно некоторое изменение контура сейсмического поля Байкальского региона, обусловленное использованием крупных площадок отбора данных и построением изолиний d в прямоугольных координатах.

Внешний контур (рис. 1) соответствует представлению карты относительно территории Байкальского региона. Чтобы привести в близкое соответствие карту и географическую подложку, верхнюю часть карты следует равномерно сжать до пересечения с границами подложки. Для лучшего восприятия карты построены в двух вариантах, различающихся шагом дискретизации изолиний d . Это дает возможность контрастного представления карты при экстремальных значениях d с переменным шагом дискретизации (рис. 1) и детального пространственного распределения с постоянным шагом дискретизации (рис. 2).

Наиболее существенной особенностью карт являются зоны максимальных значений коэффициента d , соответствующие областям повышенной неоднородности напряженно-деформированного состояния земной коры. Самая значительная по размерам и величине коэффициента $d \approx -(0.25-0.32)$ зона выделяется в центральной части карт и имеет в целом субмеридиональное направление. В центральной и южной частях в районе Южно-Байкальской впадины и северо-западной части Хэнтэйского сводового поднятия локализуются два максимума со значениями $d \approx -(0.25-0.26)$. Максимум Южно-Байкальской

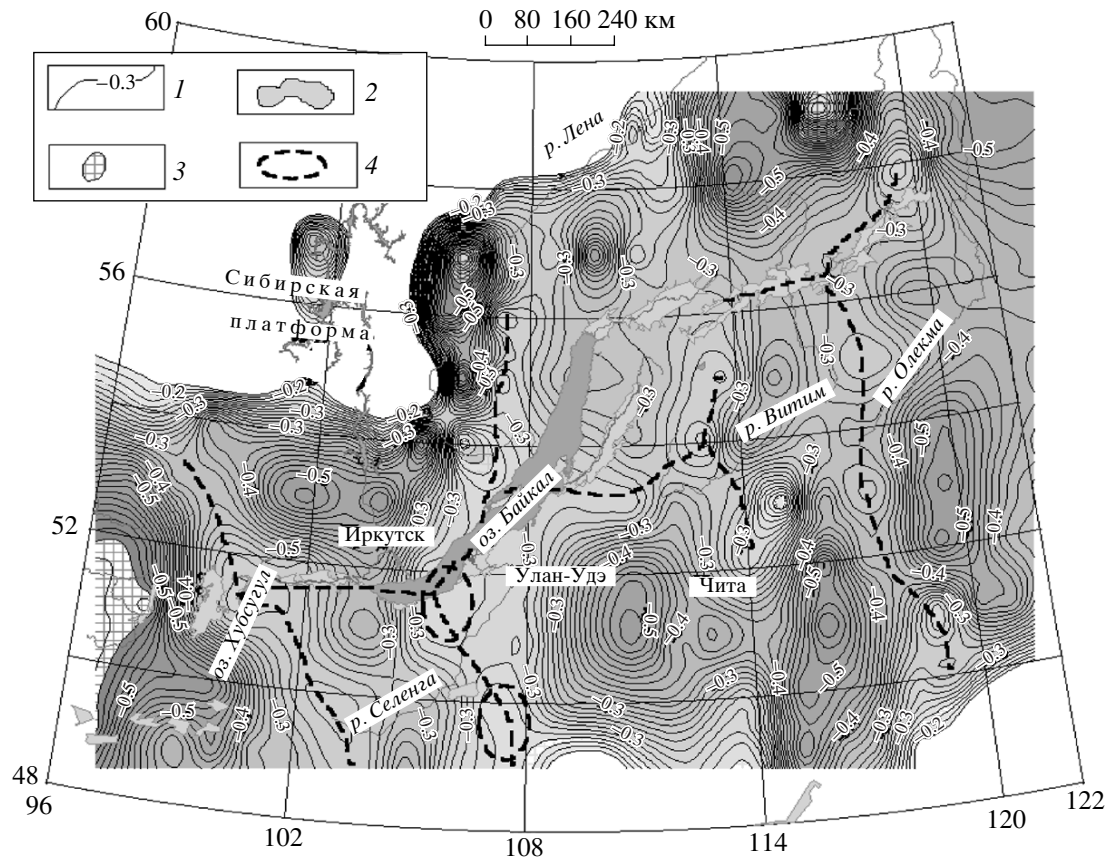


Рис. 2. Детальная карта изолиний коэффициента d . Штриховая линия проходит через зоны структурно-силовых неоднородностей.

впадины смещен к западу от субмеридионального простираения зоны, в результате чего в этом месте наблюдается расширение зоны. В центральной части о. Байкал в районе Академической перемычки выделяется субширотное ответвление, которое как бы ограничивает северную часть широкой области максимальных значений коэффициента $d \approx -0.27$. Далее к северу зона протягивается узкой полосой менее высоких значений d с локальными участками повышенного уровня.

На юго-западном фланге Байкальского региона выделяется зона менее высоких значений коэффициента $d \approx -(0.29-0.32)$. Эта зона имеет северо-западное простираение и прослеживается от Хангая через Хубсугульскую впадину к Сибирской платформе. Участок максимального значения коэффициента $d \approx -0.29$ локализуется в северной части между Дархатской и Хубсугульской впадинами и смещен к юго-западу от общего простираения зоны.

К востоку от субширотного ответвления центральной зоны и, возможно, являясь его продолжением, расположена зона из двух участков с высокими значениями коэффициента d . На Витимском плоскогорье значения коэффициента

$d \approx -(0.29-0.32)$, а в южном участке около г. Чита выделяется локальный максимум $d \approx -0.27$. Далее к северо-востоку наблюдаются два локальных участка повышенных значений коэффициента d , а протяженная зона формируется изолиниями $d \approx -(0.34-0.35)$. В центральной части этой зоны, в районе Удокана, происходит изменение направленности изолиний с субмеридионального на северо-восточное вдоль рифтовых впадин. Южный максимум имеет значение коэффициента $d \approx -0.32$, а северный $-d \approx -0.29$. На крайнем юго-востоке Байкальского региона выделяется локальный участок, в котором значение коэффициента $d \approx -0.27$.

Карта рис. 1 менее детальна и построена с целью выделения контрастных особенностей напряженно-деформированного состояния среды. Кроме зон с максимальными значениями коэффициента d на ней показаны участки с минимальными d , расположенные на крайнем юго-западе и в северной части Байкальского региона. Более детальное представление особенностей строения и напряженно-деформированного состояния сейсмофокального слоя земной коры дано на карте рис. 2. На этой карте максимумы значений коэффициента

ента d схематично соединены между собой, что позволяет создать менее формализованное представление, необходимое для поиска связи с геофизическими полями различной природы.

Следует отметить, что зоны максимумов структурно-силовых неоднородностей хорошо коррелируют с ареалом вулканической деятельности. Сопоставление карт (рис. 1, 2) с картой распространения неоген-четвертичных базальтов в Восточной Сибири и Монголии [9] указывает на достаточно хорошее совпадение зон максимумов неоднородностей и базальтового поля на юго-западном фланге региона, в пределах Витимского плоскогорья и Удокана. По данным [10], в Хэнтэйском сводовом поднятии также имеются проявления молодого базальтового вулканизма. Следует иметь в виду, что зоны структурно-вещественных неоднородностей в земной коре могли быть сформированы не только молодым, но и вообще вулканизмом, а полученные карты отражают состояние сейсмофокального слоя земной коры. Вполне возможно, что в некоторых районах базальтовые потоки были незначительны на поверхности земли, но на глубине занимают обширные провинции. Преобладание в этих зонах землетрясений, имеющих форму дислокаций в виде более сжатого эллипса, можно объяснить тем, что базальтовые трещинные внедрения нарушают однородность среды и препятствуют распространению разрыва в процессе дислоцирования.

Восточно-Саянская и Витимо-Становая зоны Байкальского региона на карте новейшей тектоники Северной Евразии выделены в области предрифтового режима. Основные диагностические признаки предрифтового режима сводятся к следующему [11]: 1) амплитуды вертикальных движений выше, чем на платформах; 2) разрывные нарушения достаточно хорошо развиты; 3) ареальный базальтовый вулканизм как следствие трещинных излияний может занимать значительные пространства; 4) тепловой поток в 1.5–2 раза выше платформенного; 5) сейсмическая активность достаточно высока; 6) поле напряжений нестационарно. Все эти признаки, вероятно, будут диагностироваться в зонах максимумов структурно-силовых неоднородностей. Возможно, что границы зон отражают мощность и глубину залегания, а также особенности формы объема и поверхности мантийного диапира, подъем и растекание которого обусловили образование системы рифтовых впадин. Юго-восточная направленность оси зоны максимумов структурно-силовых неоднородностей в южной части центральной области хорошо соответствует направлению горизонтального течения вещества мантии, определенного здесь путем поляризации сейсмических волн SKS [12]. Форма границы зоны максимума структурно-силовых неоднородностей в районе

г. Чита достаточно хорошо повторяет необычный изгиб границы области с аномально низкой скоростью на поверхности мантии, выделенный в этом месте по сейсмическим данным [13]. В ряде мест наблюдается совпадение границ зон структурно-силовых неоднородностей и глубинных швов по геологическим данным [14]. По материалам фондов Производственного объединения “Читагеология” в Забайкалье эти зоны хорошо коррелируются с зонами дифференцированных гравитационных минимумов первого порядка. Не исключено, что в пределах зон максимумов структурно-силовых неоднородностей сформированы узлы и рудные участки с повышенным накоплением полезных ископаемых.

Для детального исследования изменений сейсмических моментов землетрясений во времени и пространстве были использованы значения коэффициентов b перед переменной K в уравнениях корреляции логарифма сейсмического момента и энергетического класса землетрясений юго-западного фланга Байкальского региона ($\varphi = 48^\circ - 53^\circ$ с.ш., $\lambda = 96^\circ - 104^\circ$ в.д.). Коэффициент b опосредованно характеризует среднюю эффективность совокупности сейсмических источников. Территория юго-западного фланга была разделена по долготе на 8 секторов шириной в 1° и длиной 5° . Первый сектор ограничен координатами $\lambda = 96^\circ - 97^\circ$ в.д., $\varphi = 48^\circ - 53^\circ$ с.ш., второй – $\lambda = 97^\circ - 98^\circ$ в.д., $\varphi = 48^\circ - 53^\circ$ с.ш. и т.д. Аналогичное разделение территория юго-западного фланга по широте формирует 5 зон шириной в 1° и длиной 8° . Первая зона ограничена координатами $\varphi = 48^\circ - 49^\circ$ с.ш., $\lambda = 96^\circ - 104^\circ$ в.д., вторая – $\varphi = 49^\circ - 50^\circ$ с.ш., $\lambda = 96^\circ - 104^\circ$ в.д. и т.д. Расчеты уравнений корреляции выполнены для годовых выборок землетрясений, произошедших в пределах секторов и зон с 1968 по 1994 г. Среднее число толчков в годовых выборках землетрясений секторов приближается к 100 событиям. Вычисленные значения коэффициентов b приписывались началу соответствующего года и середине соответствующей долготы секторов (широты зон).

На рис. 3 приведены карты изолиний коэффициента b , построенные методом Kriging из пакета программ Surfer для секторов и зон и совмещенные в одном масштабе времени. Изолинии проведены с шагом дискретизации 2σ . На рис. 3 можно выделить три градации цвета, характеризующие сейсмические моменты землетрясений в продолжение трех геодинамических этапов, выделенных в [4]: 1) возможное усиление активного рифтинга в конце 1960-х гг.; 2) ослабление активного рифтинга в конце 1970-х – начале 1980-х гг.; 3) вероятное усиление влияния Индо-Азиатской коллизии в конце 1980-х – начале 1990-х гг. Следует обратить внимание на светлое пятно с координатами $\varphi = 50^\circ - 51^\circ$ с.ш., $\lambda = 100^\circ - 101^\circ$ в.д., появившееся в 1979 г. в центральной части рис. 3.

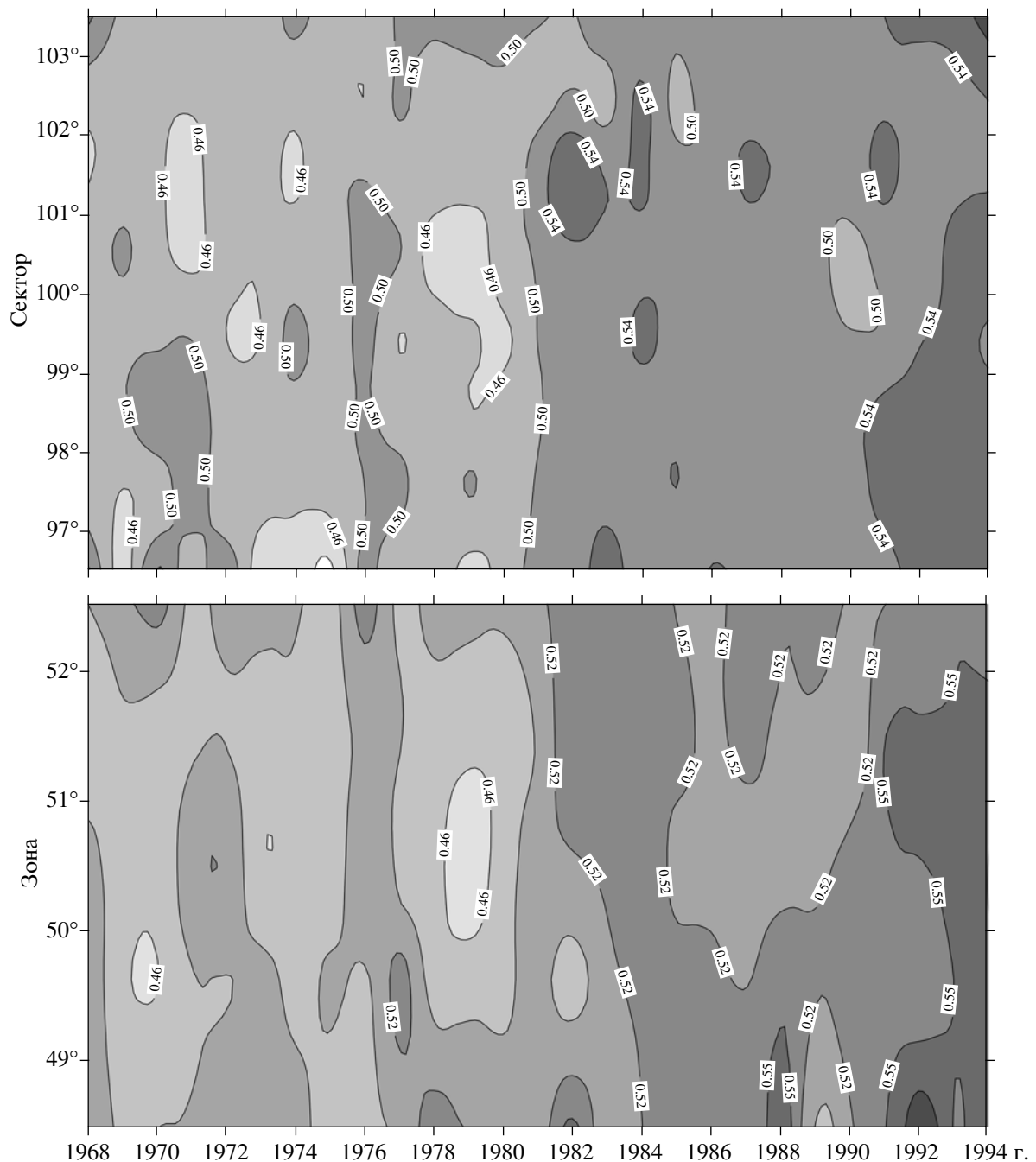


Рис. 3. Карты изолиний коэффициента b юго-западного фланга Байкальского региона.

Положение пятна указывает на место и время начала процесса геодинамической активизации юго-западного фланга Байкальского региона в период ослабления активного рифтинга и обусловлено относительным увеличением средних сейсмических моментов слабых землетрясений в этом объеме земной коры. Если сопоставить рис. 3 и рис. 1, можно заметить, что расположение пятна достаточно хорошо соответствует положению максимума значения коэффициента

$d \approx -0.29$, локализованного между Дархатской и Хубсугульской впадинами.

Аналогичное исследование, выполненное для северо-восточного фланга Байкальского региона, дает возможность локализовать максимальное проявление начала геодинамической активизации в 1979 г. в площадке с координатами $\varphi = 55.5^\circ - 56.5^\circ$ с.ш., $\lambda = 115^\circ - 116^\circ$ в.д. Эта площадка расположена рядом с изгибом северо-восточной

зоны высоких значений коэффициента d в районе Удокана (рис. 1). В центральной части Байкальского региона максимальное проявление начала геодинамической активизации наблюдается в 1979 г. на территории $\varphi = 52^\circ\text{--}53^\circ$ с.ш., $\lambda = 105^\circ\text{--}106^\circ$ в.д., которая хорошо соответствует зоне максимума значения коэффициента $d \approx -0.26$, локализованной в Южно-Байкальской впадине (рис. 1).

Совпадение участков максимального проявления начала геодинамической активизации и максимумов зон неоднородностей указывает на то, что выделение таких зон на карте обусловлено не только структурно-вещественными свойствами сейсмофокального слоя земной коры, но и особенностями трансформирования силовых полей в этих участках при активном рифтинге. Эти участки расположены вблизи границ областей напряжений глобального, регионального и суперпозиционного типов, установленных в [2] по данным о механизмах очагов землетрясений. Дифференциация вещественного состава и высокая концентрация структурно-силовых неоднородностей являются основной причиной более вытянутой формы дислокации землетрясений в этих зонах. Северная часть юго-западной зоны структурно-силовых неоднородностей (Хамар-Дабанский ареал) определена А.Ф. Грачевым как "горячая точка Байкальского рифта" [15]. Возможно, что некоторые из рассмотренных выше участков зон структурно-силовых неоднородностей также подходят под определение "горячая точка".

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., Mel'nikova V., Shteiman E. // Bull. Centres Rech. Explor.- Prod. Elf. Aquit. 1997. V. 25. № 1. P. 207–231.
3. Дядьков П.Г., Мельникова В.И., Саньков В.А. и др. // ДАН. 2000. Т. 372. № 1. С. 99–103.
4. Ключевский А.В. // ДАН. 2002. Т. 384. № 5. С. 687–691.
5. Ключевский А.В., Демьянович В.М. // ДАН. 2002. Т. 382. № 6. С. 816–820.
6. Логачев Н.А. // ДАН. 2000. Т. 375. № 5. С. 657–661.
7. Brune J.N. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4997–5009.
8. Ризниченко Ю.И. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 405 с.
9. Киселев А.И., Медведев М.Е., Головкин Г.А. Вулканизм Байкальской рифтовой зоны и проблемы глубинного магмообразования. Новосибирск: Наука, 1979. 196 с.
10. Логачев Н.А., Антощенко-Оленев И.В., Базаров Д.Б. и др. Нагорья Прибайкалья и Забайкалья. М.: Наука, 1974. 359 с.
11. Грачев А.Ф. // Физика Земли. 1996. № 12. С. 5–36.
12. Gao S., Davis P.M., Liu H. et al. // Nature. 1994. V. 371. P. 149–151.
13. Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П. и др. Недр Байкала (по сейсмическим данным). Новосибирск: Наука, 1981. 105 с.
14. Тектоника Евразии / Под ред. А.Л. Яншина. М.: Наука, 1966. 487 с.
15. Грачев А.Ф. // Физика Земли. 1998. № 12. С. 3–28.