

УДК 550.34

## О ТОЧНОСТИ И ОБЪЕКТИВНОСТИ РАСЧЕТА ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕЛКОФОКУСНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

© 2003 г. С. А. Болдырев

Представлено академиком В.Н. Страховым 29.03.2002 г.

Поступило 01.04.2002 г.

Приведены результаты анализа искажающего воздействия скоростных неоднородностей переходной зоны океан–континент на результаты расчета очаговых параметров мелкофокусных землетрясений. Гипоцентры, рассчитанные мировой системой наблюдений, смещены к берегу и заглублены относительно более объективных данных региональной службы.

Представления о глубинной структуре и сейсмотектонических процессах, происходящих в литосфере активных окраин океана, во многом определяются отношением авторов к возможности очаговой сейсмологии – точности и объективности оценки координат гипоцентров. Данные о параметрах очагов землетрясений (координатах, времени возникновения, энергии) являются опорными не только при интерпретации геолого-геофизических материалов. От их точности и надежности зависят результаты расчетов скоростных и диссипативных характеристик среды, решения механизма реализации упругих напряжений. Наиболее актуальным в свете современной геодинамики является изучение структуры литосферы и процессов в зоне перехода от океана к континенту активного типа, где происходят сильнейшие на планете землетрясения, а их очаги образуют сейсмофокальные зоны (СФЗ). Судя по геофизическим данным (повышенным значениям плотности, скорости упругих волн и добротности при сравнительно низкой температуре [1]), СФЗ выделяются относительно окружающей среды своими упругими характеристиками.

Кинематические и динамические параметры очагов активных окраин океана нельзя считать полностью независимыми от условий наблюдения. Во-первых, способы массового их определения основываются на использовании одномерных приближений среды, заведомо сильно неоднород-

ной и вряд ли изотропной, вследствие чего возникают систематические погрешности, величина которых меняется в пространстве. Неблагоприятно для их расчета и расположение регистрирующей сети: основная масса землетрясений расположена под морским дном, в стороне от сети станций. Во-вторых, число и состав регистрирующих станций различны для разных периодов времени, участков исследуемой зоны, энергии источника, что в конечном итоге определяет случайную компоненту ошибки. Другими словами, при картировании аномальные зоны могут быть смещены относительно истинного положения, а влияние случайной компоненты будет сказываться в размывании их контура. Эти проблемы усугубляются при расчете параметров мелкофокусных очагов, которые составляют до 90% каталога землетрясений Камчатского региона.

Координаты очагов камчатских землетрясений с  $H < 60$  км рассчитываются по разным системам наблюдений, и порой расхождения достигают десятков километров. Предлагаемый анализ этих расхождений, природы их возникновения необходим для понимания возможностей очаговой сейсмологии, а сами расхождения дают представление о глубинной структуре переходных зон. В настоящее время имеются три группы данных об очаговых параметрах камчатских землетрясений.

1. Материалы региональной службы, где их расчет основан на временах упругих волн к местным станциям, удаленным не более чем на 1000 км, позволяют пренебречь сферичностью поверхности Земли. При расчете параметров мелкофокусных источников преобладают данные  $P_n$ - и  $S_n$ -волн, проходящих по субгоризонтальным траекториям в сильно неоднородной подкоровой мантии переходной зоны. В региональном годографе заложено соотношение скоростей упругих волн  $\frac{V_P}{V_S} = 1.73$ , а время в очаге  $t_0$  рассчитывается по наклону графиков Вадати путем его экстраполяции в область исчезающе ма-

Объединенный институт физики Земли  
им. О.Ю. Шмидта  
Российской Академии наук, Москва

лых значений разности времен прихода продольных и поперечных волн ( $S-P$ ). И чем дальше источник от регистрирующих станций, тем больше вероятность и возможная величина ошибки  $t_0$  и координат, как систематической ее составляющей, так и случайной.

2. Глобальные системы наблюдений, в частности Международный сейсмологический центр (ISC) [2], в своих расчетах используют записи объемных волн в широком диапазоне эпицентральных расстояний и стандартную модель Земли Джеффриса–Буллена. При этом время в очаге и координаты оцениваются одновременно. С увеличением энергии источника растет число регистрирующих станций, меняется азимутальное окружение. Общее число станций  $N$  мировой сети, регистрирующих камчатские землетрясения, может достигать 700 и более, а в диапазоне  $3.5 < m_b < 5.5$   $\lg N = 1.5 + 0.8(m_b - 4)$ .

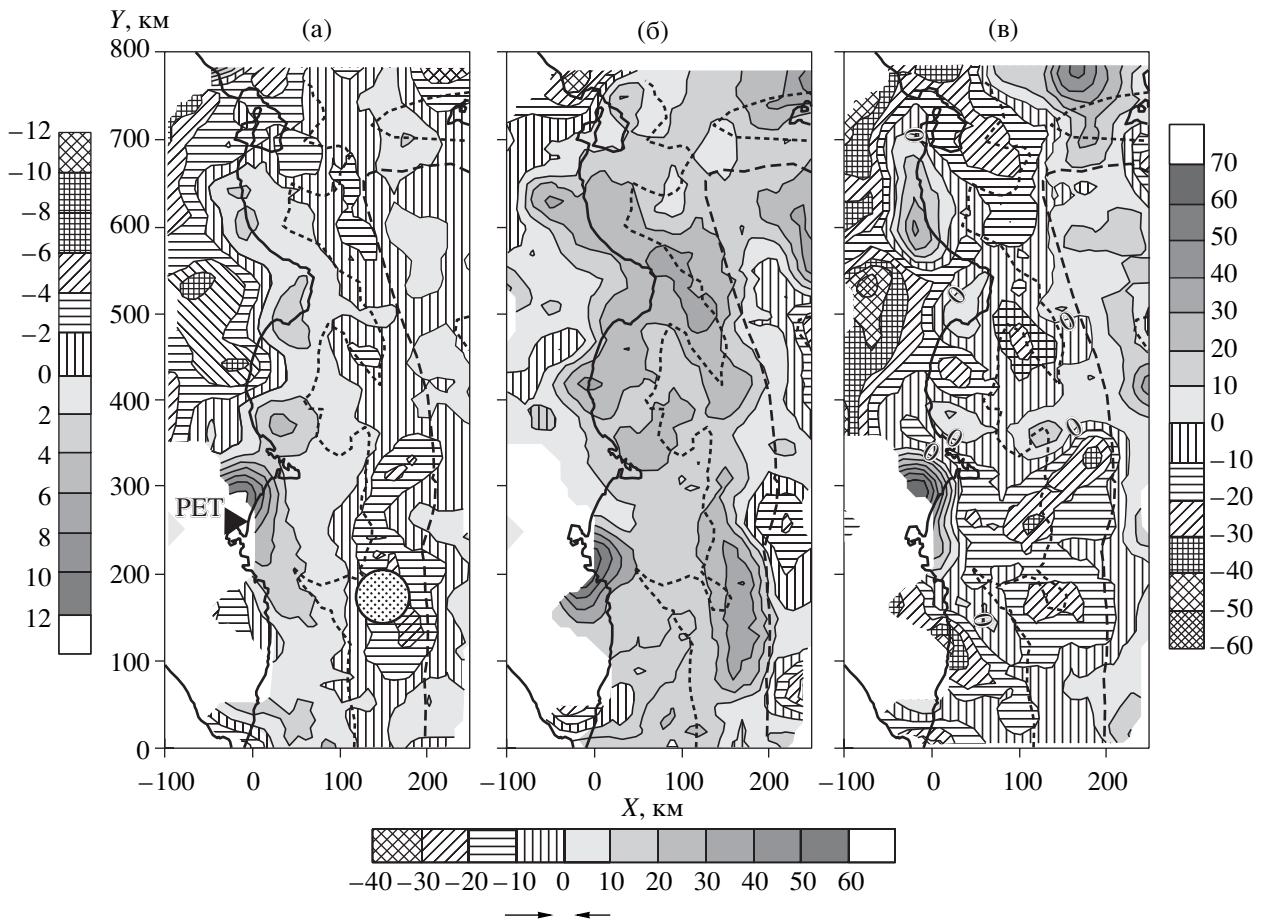
3. Очаговые параметры примерно 240 сравнительно сильных землетрясений ( $m_b > 4.5$ ) Камчатского региона 1976–1998 гг. рассчитаны по кинематическим и динамическим характеристикам длиннопериодных колебаний методом центраида тензора сейсмического момента (СМТ-очаг) [2, 3].

В начале 70-х годов высказано предположение [4], что относительное смещение гипоцентров Камчатского региона по данным местной и мировой сетей станций обусловлено горизонтальными неоднородностями физических свойств среды очаговой зоны. К настоящему времени существенно возросла база данных, что позволяет провести количественный анализ расхождений параметров очага камчатских землетрясений, рассчитанных по материалам местной (КАМ) и мировой (ISC) систем наблюдений, изучить специфику этих расхождений в регионе, оценить роль факторов, определяющих их. Сопоставлялись данные Камчатской региональной службы (КАМ) и ISC о мелкофокусных ( $H < 60$  км) землетрясениях Камчатского региона ( $50-57^\circ$  с.ш.,  $157-167^\circ$  в.д.), произошедших в 1964–1997 гг. Всего около 4500 землетрясений, для которых время в очаге  $\Delta t_0 = T_{0\text{КАМ}} - T_{0\text{ISC}}$  отличалось не более чем на  $\pm 40$  с. Эти события, как правило, регистрировались не менее чем 40 станциями мировой сети, в том числе 10–15 станциями Камчатки. Для удобства расчетов географические координаты пересчитаны для прямоугольной сетки с началом в точке  $51^\circ$  с.ш.,  $157^\circ$  в.д., а ось  $Y$  повернута на  $30^\circ$  по часовой стрелке от меридиана и совпадает с направлением вулканической гряды. Распределение изучаемых отклонений близко к нормальному, а их средние значения соответственно равны:  $\Delta t_0 = -0.3$  с ( $\pm 0.06$ ),  $\Delta X = X_{\text{КАМ}} - X_{\text{ISC}} = 17.6$  ( $\pm 0.5$ ) км;  $\Delta Y = Y_{\text{КАМ}} - Y_{\text{ISC}} = -2$  ( $\pm 0.7$ ) км,  $\Delta H = H_{\text{КАМ}} - H_{\text{ISC}} = -11$  ( $\pm 4$ ), т.е. основная масса очагов по материалам местной сети

произошла на 0.3 с раньше, чем по данным мировой сети, эпицентр смещен в сторону океана перпендикулярно СФЗ, а глубина КАМ-очагов на 11 км меньше, чем в каталоге ISC.

В целом средние значения отклонений почти не выходят за пределы формальной точности расчетов. Однако пространственное распределение этих расхождений свидетельствует о том, что локальные аномалии могут быть значительными. Карты рис. 1 строились по осредненным в клетках  $20 \times 20$  км значениям с использованием координат КАМ. Детальность и надежность схем рис. 1 определяются плотностью эпицентров, поэтому восточнее желоба и непосредственно под Камчаткой влияние случайных ошибок очень вероятно и велико. По-видимому, наиболее принципиальным фактором, определяющим характер поля остальных расхождений, являются значения  $\Delta t_0 = T_{0\text{КАМ}} - T_{0\text{ISC}}$  – разницы времен возникновения очага (рис. 1а). В основной эпицентральной зоне области положительных и отрицательных значений образуют сопряженную систему, в которой разграничение проходит примерно по изобате – 3500 м, т.е. при переходе от шельфа к континентальному склону ( $X = 100$ ). Невязка  $\Delta t_0$  монотонно меняется по мере удаления от берега, достигая максимума при  $X = 100-150$  км. В южной части региона ( $Y < 300$ ) на базе примерно 120 км  $\Delta t_0$  меняется от +3 с при  $X = 30$  до –7 с при  $X = 150$  км. Точно так по мере приближения к берегу возрастает относительно камчатского варианта глубина очагов ISC (рис. 1в). Величина смещения эпицентра вдоль СФЗ ( $\Delta Y$ ) практически на всей исследуемой области не превышает пределы рассеяния данных ( $\pm 10$  км), а смещение  $\Delta X$  поперек СФЗ на рис. 1б достигает максимальных значений под континентальным склоном желоба ( $X = 120-170$  км) и уменьшается в западном направлении. Эти генеральные фоновые изменения невязок хорошо согласуются с конфигурацией основных морфоструктур региона, что указывает на их связь с глубинной структурой островодужных систем – наклоном СФЗ и аномальными свойствами слагающего ее вещества.

Механизм возникновения подобных расхождений проанализирован по материалам 150 очагов 1994–1997 гг., произошедших в юго-восточной части Авачинского залива, выделенной на рис. 1а кружком. Здесь градиент отклонений  $\Delta X$  поперек СФЗ составляет почти 1 км/км (рис. 1б). Для данной группы очагов характерна взаимосвязь отклонений времени в очаге  $\Delta t_0$  и смещения  $\Delta X$ , которая при уровне корреляции –0.67 составляет  $\Delta X(\Delta t_0) = 12-5.6\Delta t_0$ , причем эти две связанные величины зависят от энергии (магнитуды) источника. Зависимость расхождений очаговых параметров (КАМ-ISC) от магнитуды (числа регистрирующих станций) реализуется на фоне значи-



**Рис. 1.** Расхождение очаговых параметров 2450 камчатских землетрясений 1964–1998 гг. ( $H < 70$ ;  $K_S > 10.0$ ) по данным камчатской (КАМ) и мировой (ISC) сетей станций. а – различие времени в очаге  $\Delta t_0 = T_{0\text{КАМ}} - T_{0\text{ISC}}$ , с; кружком выделен участок дальнейших исследований. б – смещение эпицентра поперек сейсмоактивной зоны  $\Delta X = X_{\text{КАМ}} - X_{\text{ISC}}$ , км. г – различие глубины источника  $\Delta H = H_{\text{КАМ}} - H_{\text{ISC}}$  км.

тельного разброса данных (рис. 2), но в интервале  $3.5 < m_b < 4.7$ , где содержится более 90% данных, тенденция изменений очевидна:

$$\Delta t_0 = -2.5 \pm 0.13(m_b - 4.0),$$

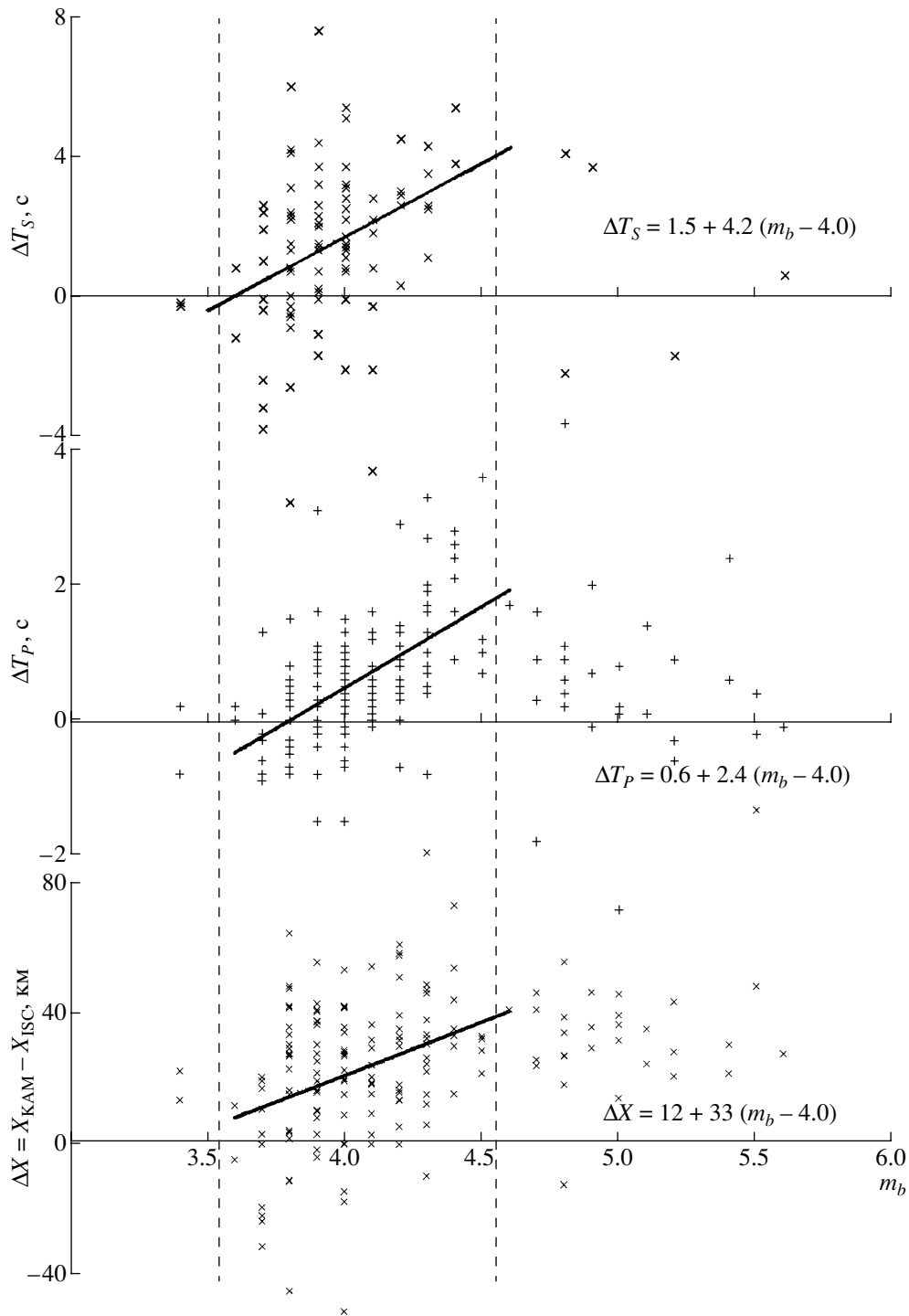
$$\Delta H = -16 + 18(m_b - 4),$$

$$\Delta X = 12 + 33(m_b - 4).$$

Таким образом, различие в  $\Delta t_0$  практически не зависит от числа станций (магнитуды) и определяется в основном региональными особенностями, а облако гипоцентров, полученное по решениям региональной сети, в ISC-каталоге дифференцируется по магнитуде: чем больше магнитуда, тем ближе к берегу ISC-очаг, тем меньше его глубина.

Объективность ISC-решений можно оценить по их соответствию (невязкам) наблюдаемым временам на какой-либо станции. Для данной группы очагов решения ISC сопоставлялись с невязками времен пробега до ближайшей станции РЕТ (Петропавловск), тем более что разность

времени регистрации фаз  $P$ - и  $S$ -волн от этих источников на РЕТ (величина, не зависящая от решений параметров очага) составляет 21–22 с, т.е. гипоцентральные расстояния до РЕТ должны быть примерно одинаковыми. Невязка времени регистрации  $\Delta T$  отражает различие наблюдаемого на данной станции времени пробега от расчетного при заданных времени в очаге  $t_0$ , скоростном разрезе и способе оценки очаговых параметров. Положительные значения невязок соответствуют в том случае, если время в очаге задано раньше “реального”, либо расчетный источник смещен к пункту регистрации. Для данной группы очагов на станции РЕТ среднестатистические значения невязок для решения камчатской сети составляют соответственно  $\Delta T_P = -0.74 \pm 0.05$  и  $\Delta T_S = -0.88 \pm 0.06$  и практически не зависят от энергии источника, а относительно ISC-решений на рис. 2 определяются зависимостью  $\Delta T_P = 0.6 + 2.4(m_b - 4.0)$  и  $\Delta T_S = 1.5 + 4.2(m_b - 4.0)$ .



**Рис. 2.** Зависимость от магнитуды  $m_b$  смещения  $\Delta X = X_{\text{КАМ}} - X_{\text{ИСС}}$  и невязок времен пробега  $P$ - и  $S$ -волн до станции Петропавловск в решениях ИСС для очагов из эпицентральной зоны, выделенной на рис. 1.

В табл. 1 приведены средние значения отклонений (КАМ-ИСС) и невязок  $\Delta T_P$  и  $\Delta T_S$  на станции РЕТ для разных значений магнитуды. Эти отклонения характеризуют группу очагов, центр которых по версии КАМ ( $X = 145$ ,  $Y = 145$ ,  $H = 33$ ) уда-

лен от РЕТ на 220 км. Из табл. 1 следует, что чем больше магнитуда, тем ближе к берегу и мельче ИСС-очаг, за счет чего гипоцентральное расстояние до станции РЕТ уменьшается с 200 ( $m_b = 3.5$ ) до 170 км ( $m_b = 4.5$ ). При этом время пробега уп-

ругих волн до РЕТ также должно бы уменьшаться (хотя бы за счет увеличения абсолютного времени в ISC-очаге). Однако в данном случае этого не происходит –  $\Delta t_0$  практически не меняется, а рост невязок обусловлен смещением гипоцентра в сторону станции РЕТ, т.е. решения ISC противоречат объективным характеристикам – временам пробега упругих волн. Скорее всего, подобная зависимость решений ISC от магнитуды источника характерна и для других участков очаговой зоны Камчатского региона.

Форма изолиний на рис. 1 свидетельствует о том, что различия очаговых параметров мелкофокусных очагов по материалам региональной и глобальных систем наблюдений обусловлены глубинной структурой региона. Воздействие скоростных неоднородностей активных окраин океана (наклонной СФЗ) на решения глобальной системы наблюдений ISC зависит не только от местоположения источника, но и от его интенсивности, поскольку с увеличением магнитуды возрастают дальность его регистрации и число станций. При этом в решениях очаговых параметров увеличивается роль удаленных станций, трассы до которых в очаговой зоне имеют близвертикальное направление. За счет рефракции в высокоскоростной СФЗ эпицентры ISC-очагов смещаются к берегу. И это смещение тем больше, чем больше магнитуда. Изменение азимутального окружения при этом практически не играет заметной роли. Таким образом, влияние скоростных неоднородностей активных окраин океана на расчет очаговых параметров местных землетрясений глобальной сетью складывается из некоторой постоянной составляющей, обусловленной расположением очага, и переменной части, связанной с изменением соотношения близких и удаленных станций, которая фактически играет роль случайной составляющей ошибки, хотя ее величина предопределена магнитудой.

Основная часть камчатских землетрясений регистрируется примерно одинаковой группой станций местной сети, для которых величина станционных кинематических невязок при решении очаговых параметров не превышает  $\pm 1.0$  с и мало зависит от энергии источника. Оценки очаговых параметров Камчатской региональной службой не только более однородны, но, по-видимому, и ближе к истине, чем данные Международного центра. Косвенным подтверждением этого могут служить результаты сопоставления КАМ-каталога с положением 240 гипоцентров сильнейших землетрясений 1976–1998 гг., рассчитанных методом СМТ [2, 3] по записям длиннопериодных колебаний мировой сети станций. В целом

Таблица 1

$m_b$	$\Delta t_0$ , с	$\Delta T_p$ , с	$\Delta T_s$ , с	$\Delta X$ , км	$\Delta Y$ , км	$\Delta H$ , км
3.5	-2.1	-0.6	-0.6	5	4	-24
4.0	-2.0	0.6	1.5	21	5	-15
4.5	-1.9	1.8	3.6	38	6	-6
5.0	-1.8	3.0	5.7	54	6	3

СМТ-параметры мелкофокусных очагов на фоне большого разброса данных не имеют существенных систематических отклонений от данных Камчатской службы:  $X_{КАМ} - X_{СМТ} = -6$  км,  $Y_{КАМ} - Y_{СМТ} = -2$  км,  $H_{КАМ} - H_{СМТ} = -4$  км, а их региональные изменения не выходят за пределы разброса данных. К тому же различия координат КАМ–СМТ этих источников в целом гораздо меньше, чем различия ISC–СМТ. По-видимому, скоростные аномалии переходных зон имеют ограниченные размеры, к которым длиннопериодные сейсмические колебания мало чувствительны.

В прибрежных участках, где статистическая представительность данных позволяет выделять аномалии отклонений с большей детальностью, изменения конфигурации изолиний вдоль СФЗ на рис. 1, скорее всего, обусловлены горизонтальными изменениями скорости в литосфере. В этом отношении показательно распределение отклонений  $\Delta H$  (рис. 1в), образующих субширотные аномалии, проходящие через центр Авачинского, Кроноцкого и Камчатского заливов. Заглубление ISC-очагов в них можно связать с влиянием низкоскоростных включений.

Автор выражает свою признательность В.И. Левиной, Н.А. Сергеевой и И.П. Гапсаровой за помощь в подборе материалов, Г.В. Чернышовой и М.С. Соловьевой, чьи программы обработки материалов были использованы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев С.А. В сб.: Сравнительная тектоника континентов и океанов. М.: Наука, 1987. С. 116–126.
2. International Seismological Center Catalog 1964–1997. CD-ROMs, ISC 2000.
3. Dziewonsky A.M., Chou T, Woodhouse J.S. // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. № 4. P. 2825–2852.
4. Гусев А.А., Кондорская Н.В., Федотов С.А. В сб.: Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 63–65.
5. Болдырев С.А. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1981. № 4. С. 25–32.