ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПРОГРАММА



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ РОССИИ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТОСФЕРЕ, ОРИЕНТИРОВАННОЕ НА ПРОБЛЕМУ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Выпуск

1

Volume

MATHEMATICAL MODELLING OF SEISMOTECTONIC PROCESSES IN THE LITHOSPHERE FOR EARTHQUAKE PREDICTION RESEARCH



ĥ.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТОСФЕРЕ, ОРИЕНТИРОВАННОЕ НА ПРОБЛЕМУ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сборник научных трудов Выпуск 1

Ответственный редактор академик В. И. КЕЙЛИС-БОРОК

Москва, 1993

#### Математическое моделирование сейсмотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений. Вып.1. М.: МИТП РАН, 1993. — 112 с.

Сборник научных трудов является первым выпуском из серии планируемых ежегодных публикаций основных результатов исследований по проблеме 2.1 "Математическое моделирование сейсмотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений." в рамках направления 2 "Сейсмичность и связанные с ней процессы в окружающей среде" Государственной научно-технической программы России "Глобальные изменения природной среды и климата".

Сборник рассчитан на широкий круг специалистов в области наук о Земле.

Рецензенты: академик М.А.Садовский, к.ф.-м.н. В.Б.Смирнов.

Редакционно-издательский совет направления 2 "Сейсмичность и связанные с ней процессы в окружающей среде": чл.-корр. РАН А.В.Николаев (председатель), чл.-корр. АЕН РФ Л.Е.Собисевич (зам. председателя), академик В.И.Кейлис-Борок, чл.-корр. АН Республики Узбекистан В.И.Уломов, академик АЕН РФ Г.А.Соболев, академик В.И.Осипов.

Редакционная коллегия сборника: академик В.И.Кейлис-Борок (отв. ред.), М.Г.Шнирман, А.Г.Прозоров, Б.Г.Букчин.

Научные исследования и публикации сборника осуществлены при финансовой поддержке Министерства науки и технической политики Российской Федерации.

Mathematical modelling of seismotectonic processes in the lithosphere for earthquake prediction research. Vol.1. M.: IIEP RAS, 1993. - 112 p.

A collection of scientific papers is the first edition from a series of planned annual publications of the basic results of investigations on the problem 2.1 "Mathematical modelling of seismotectonic processes in the lithosphere for earthquake prediction research", being developed within the branch 2 "Seismicity and related processes in the environment" of the Federal Research Program of Russia "Global changes in environment and the climate."

The collection of papers is assigned for a wide range of specialists in the field of the Earth sciences.

© Коллектив авторов, 1993

- © Российская академия наук, 1993
- © Миннауки России, 1993



# ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОРЯКСКОГО (ХАИЛИНСКОГО) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 8 МАРТА 1991 г. В КОНТЕКСТЕ ПРОБЛЕМЫ СУЩЕСТВОВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ПЛИТЫ БЕРИНГИИ

А.В. Ландер, Б.Г. Букчин, Д.В. Дрознин, А.В. Кирющин\*

Данные о сейсмичности последних десяти лет показывают, что по западной окраине Берингова моря проходит непрерывный сейсмический пояс. Тем самым Беринговоморский регион оказывается окруженным со всех сторон поясами сейсмичности, что дает возможность выделить современную плиту Берингию. Рассмотрены альтернативные гипотезы происхождения сейсмичности Южной Корякии. Сравнение гипотез проведено на основе данных о сильнейшем землетрясении Корякии. Для него получены оценки длинноволнового фокального механизма, интегральных пространственно-временных характеристик очага и реконструированы поля сейсмогенных деформаций в афтершоковом процессе. На основе выявленных структурно-деформационных неоднородностей очаговой зоны построена качественная модель ее развития. Отмечена и проинтерпретирована связь очаговых процессов с современным тектоническим развитием Южной Корякии. Показаны преимущества модели существования западной границы плиты Берингии над альтернативными гипотезами о происхождении местной сейсмичности. Выявлены черты унаследованности развития современной границы по отношению к древним границам плит данного региона. Построена грубая модель движения плиты Берингии.

#### введение

Крайний Северо-Восток Азии долго оставался одним из немногих крупных сейсмически активных регионов, где не удавалось найти приемлемого объяснения природы сейсмичности с точки зрения тектоники плит. По имевшимся данным протяженный Чукотский сейсмический пояс не имел западного замыкания. Это не позволяло надежно выделить предполагавшуюся самостоятельную литосферную плиту Берингию. Haблюдения последних десяти лет дают возможность почти полностью проследить "отсутствующую" западную границу этой плиты. Лишь на небольшом участке в Южной Корякии данных пока недостаточно. Но именно здесь в 1991 г. произошло сильнейшее (и наиболее информативное) землетрясение региона. В статье сделана попытка проверить соответствие очаговых характеристик данного землетрясения гипотезе существования корякской границы плиты Берингии и

обсудить структуру юго-западного участка этой границы.

Название "Корякское землетрясение" было использовано в литературе для события 1988 г. [Гунбина и др., 1991]. Поэтому землетрясение 8 марта 1991 г. нами названо Хаилинским по ближайшему к эпицентру поселку.

#### СЕЙСМИЧНОСТЬ И ГРАНИЦЫ ПЛИТ ЗАПАДНОГО ОБРАМЛЕНИЯ БЕРИНГОВОМОРСКОГО РЕГИОНА

На рис.1,а изображена карта эпицентров землетрясений Беринговоморского региона по данным на начало 1980 г. [Землетрясения ..., 1965– 1982]. В то время ситуация выглядела весьма парадоксальной — сейсмический пояс Чукотки - Западной Аляски протяженностью более 2 тыс.км не имел западного замыкания, обрываясь почти в 1 тыс.км от ближайших сейсмически активных областей Северо-Востока Азии. Из этого утверждения могли следовать весьма необычные выводы: либо Чукотский сейсмический пояс разделяет две части (арктическую и беринговоморскую) единой Северо-Американской

<sup>•</sup>Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва ©1993 г. А.В. Ландер, Б.Г. Букчия, Д.В. Дрознин, А.В. Кирюшин

#### Рис. 1. Сейсмичность и современные границы плит Беринговоморского региона

а — сейсмичность по данным на 1980 г.; б — современная мозаика плит: СА --- Северо-Американская, ЕА -Евразийская, ОХ — Охотская, ТО — Тихоокеанская, БЕР — предполагаемая Берингия, КМ — условно выделяемая Колымская плита; сейсмические пояса (границы плит): АЧ --- Арктики -- хребта Черского, КК --- Курило-Камчатский, АА — Алеутско-Аляскинский, ЧА — Чукотки - Западной Аляски; возможные замыкания Чукот- 75 ской границы плит: КОР — вдоль Корякского нагорья, КХ - вдоль Колымского хребта, ВСМ -- в Восточно-Сибирском море; в — сейсмичность по данным на 1992 г.; для Северной Камчатки, Корякии, Чукотки и Западной и Северной Аляски — все наблюдавшиеся землетрясения, для сейсмического пояса Арктики - хребта Черского --M > 3.0, для Камчатки — M > 3.5, для Алеутской дуги и 65 Южной Аляски — М > 5.0 (исключены землетрясения в заливе Аляска)



(жесткой?) плиты и не является выражением от- Ситуация начала проясняться только с разверносительного движения плит, либо активные тек- тыванием на Чукотке в 1980-1982 гг. стационартопические процессы на западной границе само- ной сейсмической сети [Сейсмологический ..., стоятельной литосферной плиты Берингии не со- 1982-1989] (рис.2). Из материалов 10-летних напровождаются заметной сейсмичностью. Возможная причина появления таких противоречий - недостаток данных, связанный с крайней разреженностью местной сейсмической сети (на Чукотке до 1980 г. действовала всего одна станция полоса сейсмичности (М = 2.5 - 4). В 1986 г. Иультин).

наиболее вероятны три направления продолже- этой линии в Пентральной Корякии постолиная ния Чукотского сейсмического пояса [Ландер, сейсмичность не регистрировалось, что, возмож-1990] (рис.1,б):

моря к Новосибирским островам, где на прости- два сильных землетрясения — 1988 г. (M = 5.5), рании этой линии от основного Арктического по- 1991 г. (M = 6.6), зарегистрированных станциями яса сейсмичности отходит небольшая субмери- мировых сетей. диональная полоса землетрясений;

- на юго-запад вдоль горных сооружений Колымского хребта к южному окончанию хребта Черского;

- через Корякское нагорье к Северной Камчатке, т.е. к области сочленения Арктического и Тихоокеанского сейсмических поясов.

Тем не менее до 1980 г. ни в одной из перечисленных областей станции мировых сетей не зафиксировали ни одного землетрясения. ние Чукотского сейсмического пояса далее на за-

блюдений следует, что от Чукотского полуострова на юго-запад через Анадырский залив и северную часть Корякского нагорья в направлении Северной Камчатки протянулась четко выраженная в Анадырском заливе произошло и более силь-Исходя из тектонического строения региона, ное землетрясение с M = 5.2. На простирании но, вновь связано с отсутствием станций на се-- на запад через шельф Восточно-Сибирского вере Камчатки. Однако именно здесь произошли

> Таким образом, с больщой вероятностью существует корякское замыкание системы сейсмических поясов: Алеутского, Центральной и Западной Аляски, Чукотского, окружающих относительно стабильный Беринговоморский регион. Это позволяет говорить о самостоятельной литосферной плите Берингии (рис, 1,б,в).

Корякское замыкание не объясняет продолже-



Рис. 2. Корякский сейсмический пояс по данным на 1992 r.

1 — структурные линии рельефа; 2 — Хатырско-Вывенский линеамент; 3 -- изобата 2000 м ; 4 -- опицентры землетрясений с M = 2.5 - 6.6

пад вдоль арктического побережья. Небольшое число землетрясений, зарегистрированных в северной части Колымского хребта, пока не может рассматриваться как определенная граница плит. Районы шельфа Восточно-Сибирского моря по-прежнему достаточно удалены от сейсмических станций. Поэтому вопрос о том, какие плиты разделяет Корякская полоса землетрясений, остается открытым. Она может быть частью широкой области расселнной сейсмичности, отделяющей Берингию от Северо-Американской плиты. Но возможно, что западнее Берингии расположена еще одна небольшая Колымская плита (см. рис.1,б).

#### ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ И СТРУКТУРА СЕВЕРА КАМЧАТКИ И ЮГА КОРЯКИИ

Согласно современным представлениям [Ставский и др., 1988; Чехович и др., 1990, Соколов, 1992], континентальная кора Корякии и Северной Камчатки в основном сформировалась в мезозоепалеогене в результате столкновения с континентальной окраиной Азии нескольких разнородных террейнов, перемещавшихся со стороны Тихого океана. В результате образовалась контрастная по реологии сильно дислоцированная система разновеликих, преимущественно вулканогенных (в видимой части), блоков, разделенных тер-(рис.3).

Крупнейший из них, Камчатский, представляет собой меловую островную дугу, присоединившуюся к континенту в середине палеогена (в северной части, возможно, в миоцене). В результате столкновения дуга была интенсивно деформирована в систему складок и разрывов преимуб<sup>о</sup>щественно продольного северо-восточного простирания. В современной структуре Камчатский террейн отделен от расположенных западнее автохтонных терригенных толщ региональным Ватынским пологим швом, прослеживаемым с перерывами от Корякии до Центральной Камчатки. Северная, расположенная в Корякии, часть террейна отличается некоторыми деталями кайнозойской истории от его камчатских областей. Обычно ее выделяют под названием "Олюторская зона".

После присоединения Камчаткого террейна к Азии активная граница плит перемещается на его юго-восточную (прежде тыловую) сторону [Чехович и др., 1990]. Здесь, по-видимому, с конца эоцена образуется самостоятельная Командорская плита, которая, продолжая движение на северо-запад, начинает пододвигаться под Камчатку. Над возникшей зоной субдукции появляется пояс известково-щелочного вулканизма и отлагаются сопутствующие ему мощные вулканотерригенные комплексы. Вдоль юго-восточного края террейна во фронтальной части новой зоны субдукции континент значительно нарастает за счет присоединения преимущественно осадочных аккреционных комплексов. В современной структуре они составляют северо-западное обрамление Командорской котловины Берингова моря [Шапиро, 1987]. Первоначальное положение зоны субдукции фиксируется Восточно-Камчатским швом (рис.3), отделяющим мезозойский террейн от кайнозойских аккреционных комплексов, а окончательное — погребенным под осадками желобом, протянувшимся вдоль западного континентального подножья Командорской котловины [Исаев и др., 1972]. Судя по возрасту затухания кайнозойского островодужного вулканизма,процесс активной субдукции в основном заканчивается к концу неогена.

Положение кайнозойской зоны субдукции определялось формой восточного края мезозойского террейна. В результате вулканическая дуга оказалась обращенной вогнутой стороной к пододвигающейся Командорской плите. Эта необычная для островной дуги форма была разрушена только в четвертичное время, когда процессы субдукции затухали. В тылу пододвигавшейся плиты в ригенными толщами континентальной окраины неогене, по-видимому, существовала субмеридиональная зона спрединга [Baranov et al., 1991], в





1 — докайнозойские террейны (сияты кайнозойские осадочные комплексы); 2 — автохтонные терригенные комплексы азиатской окраины, заполняющие пространство между террейнами, 3 — кайнозойские аккреционные комплексы; 4 — кайнозойская вулканическая дуга; 5 — четвертичные вулканиты области "олюторского" растяжения; 6 — область, охваченная четвертичными процессами "олюторского" растяжения; 7 — северные впадины Центрально-Камчатской депрессии; 8 — впицентр Хаилинского землетрясения; ОЛ — Олюторский хребет. Границы Камчатского террейна: В — Ватынский шов, К — Восточно-Камчатский шов

которой формировалось дно современной Командорской котловины. В четвертичное время эта область растяжения распространилась к северу в пределы континента, частично захватив районы, развивавшиеся прежде в условиях островной дуги (см. рис.3). На юге Корякии возникает система Апуко-Пахачинских впадин, открытых к югу в сторону Командорской котловины, в пределах которых широко развиты проявления четвертичного рифтогенного вулканизма [Кепежинскас, 1987].

В результате в современном структурном рисунке Южной Корякии наблюдается наложение двух преобладающих простираний: "древних" и "олюторских" (существующих только в пределах Олюторской зоны). "Древние" простирания отражают эпизод столкиовения террейна с континентом и процесс кайнозойской субдукции. "Олюторские" структуры наиболее отчетливо проявились в четвертичное время, когда они были связаны с процессами наложенного рифтогенеза, но, возможно, они развивались и в более широком временном интервале (аналогичные простирания имеют некоторые миоценовые дислокации). Обе группы структурных линий являются непосредственными продолжениями расположенных южнее структур Камчатки или Командорской котловины. Но "древние" структуры постепенно изгибаются к востоку, повторяя форму границы шельфа Командорской котловины, а "олюторские" как бы продолжают рисунок самой котловины к северу в пределы континента. Последнее относится не только к наложенным Апуко-Пахачинским впадинам, но и к обрамляющим их горным хребтам. На востоке расположенный на континенте и дискордантный древней структуре Олюторский хребет является непосредственным продолжением подводного хребта Ширшова (см. рис.3). Ниже мы покажем, что сходное внутриконтинентальное продолжение имеет и западное обрамление Командорской котловины.

Еще одна структура растяжения — Центрально-Камчатская депрессия — развивается в новейшее время параллельно осевой линии Камчатки. Эта протяженная система узких субмеридиональных впадин становится на юге Корякии прерывистой и затухает. Судя по расположению на простирании системы, ее крайним северным элементом, возможно, является Вывенская впадина, которая особенно интересна для нас тем, что именно в ее пределах находится эпицентр Хаилинского землетрясения.

#### НЕСКОЛЬКО ГИПОТЕЗ О ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ СЕЙСМИЧНОСТИ ЮГА КОРЯКИИ

Изложенные представления о структуре района позволяют рассмотреть гипотезу о существовании молодой корякской границы плит в ряду других альтернативных (но не обязательно противоречащих ей) взглядов, связывающих сейсмичность Южной Корякии с процессами, происходившими в этом районе в недавнем геологическом прошлом.

#### Основная гипотеза

(1). Землетрясения Корякии от Анадырского залива до Камчатского перешейка происходят вследствие движений на единой границе плит.

Корякский пояс сейсмичности в целом, повидимому, соответствует весьма молодой тектонической структуре. На севере Корякского нагорья об этом свидетельствует очевидная дискордантность пояса древнему тектоническому рисунку — пояс сохраняет устойчивое северовосточное простирание, в то время как главные структурные направления (включая рельеф) разворачиваются к юго-востоку. Впрочем в структуре Корякского нагорья, по-видимому, дешифрируются отдельные наложенные элементы, сохраняющие на всем своем протяжении северовосточное простирание. В первую очередь можно предположить существование линеамента длиной около 700 км, объединяющего северный борт Вывенской впадины верховья рек Пахачи и Апуки верхнюю часть долины р. Хатыр-В северо-восточной части он сечет древκи. ние структуры и упирается в Анадырский залив (см. рис.2). Вблизи этого линеамента, который ниже называется Хатырско-Вывенским, произошли не только большинство землетрясений севера Корякского нагорья, но и оба расположенных южнее крупнейших землетрясения района (1988 и 1991 гг.). Геологические подтверждения существования такого разлома могли бы дать конкретную информацию о возрасте возникновения здесь современной границы плит.

Помимо Хаилинского землетрясения 1991 г. (см. ниже), надежные механизмы были определены только для землетрясений 1986 и 1988 гг. [Dziewonski et al., 1987, 1989, 1992]. Судя по ним (рис.2), северо-восточный участок границы соответствует правому сдвигу.

#### Альтернативные гипотезы

(2). Сейсмичность северного и западного обрамления Командорской котловины является реликтом затухшего кайнозойского процесса субдукции со стороны котдовины под Северную Камчатку.

Южнее Корякского нагорья эпицентры землетрясений тяготеют к береговой линии Командорской котловины, причем не только на направлении общего северо-восточного простирания пояса, но и на субширотном участке ее северного берега (рис.2). Эта полоса сейсмичности в плане приблизительно повторяет форму зоны кайнозойской субдукции, в частности Восточно-Камчатского шва, отделяющего кайнозойские аккреционные комплексы от расположенного западнее мезозойского террейна. Возможно, что в проявлениях сейсмичности мы видим последнюю фазу отмирающего процесса, но вполне вероятно, что по древним возникшим в процессе субдукции разломам реализуется движение Берингии относительно Северной Камчатки. Поскольку сдвиговые компоненты в механизмах землетрясений Корякского пояса правосторонние, оба варианта могут не различаться по условиям в очагах местных землетрясений, предсказывая западное или северо-западное сжатие.

(3). Сейсмичность юга Корякского нагорья — остаточные явления процесса раскрытия Командорской котловины.

В пространственном распределении единичных известных до 1991 г. землетрясений Южной Корякии не было заметно корреляции с "олюторскими" структурными направлениями. Но четвертичный процесс опускания и вулканизма Апуко-Пахачинских впадин — один из самых молодых в этом районе. Землетрясения 1988 и 1991 гг. произошли в непосредственной близости от ареала его развития. Поэтому исходно мы не отказываемся от возможности влияния этого процесса на современную сейсмичность.

(4). Развитие Центрально-Камчатской депрессии.

Это наиболее молодой из крупных тектонических процессов на Камчатке. Гипоцентры землетрясений Северной Камчатки определены не настолько точно, чтобы связать их с конкретной структурой. Но часть из них лежит в пределах северных впадин Центрально-Камчатской депрессии. Землетрясение 1991 г. произошло на ее простирании в пределах Вывенской впадины.

Последним двум гипотезам должно соответствовать северо-западное или западное растяжение в очагах землетрясений.

#### ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ХАИЛИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 8 МАРТА 1991 г.

По данным [Earthquake ..., 1991], землетрясение произошло в 11 ч 36 мин 28.4 с, имело координаты 60.90° N, 167.02° Е, глубину 13 км. По данным В.М. Зобина с соавторами [Зобин и др., 1993], очаг, возможно, более глубокий — до 35-50 км. Магнитуда оценивается в пределах 6.4-7.0.

Землетрясение сопровождалось значительной форшоковой (4 события) и афтершоковой (62 землетрясения с  $M \ge 4.0$ , из них 22 с  $M \ge 5.0$ ) активностью, зафиксированной в течение примерно четырех месяцев. Через полтора месяца после главного толчка наблюдалось кратковременное возрастание активности афтершоков, локализованное примерно в 10 км юго-западнее главного эпицентра. После июня 1991 г. в течение года был зафиксирован всего один афтершок с M = 4.5, а в июле 1992 г. в том же месте в течение одного часа последовала серия из трех толчков с  $M \approx 4.5$ . Скорректированные данные о координатах афтершоков были предоставлены нам В.М. Зобиным. Все гипоцентры являются коровыми, но удовлетворительные определения глубин отсутствуют. Поэтому интерпретации поддается только распределение эпицентров. Облако афтершоков с характерными размерами 60 × 30 км вытянуто в целом в северо-западном направлении.



Рис. 4. Фокальный механизм и интегральные очаговые параметры главного толчка Хаилинского землетрясения (по поверхностным волнам)

U — вектор подвижки; V — вектор скорости мгновенного центроида.

Главное землетрясение записано многими станциями мировых цифровых сетей, что позволило оценить параметры сейсмического очага по спектрам длиннопериодных поверхностных волн. Приведенные ниже характеристики очага получены по методике Б.Г. Букчина [1986, 1992], с использованием записи основных гармоник волн Релея и Лява на 12 станциях, в диапазоне периодов 30-200 с (рис.4):

— сейсмический момент 1.3 · 10<sup>26</sup> Дн<sup>·</sup> · см;

— фокальный механизм (предпочтительная плоскость): азимут простирания 225°, угол падения 60°, угол подвижки 90° (взброс);

— параметры вторых пространственно-временных моментов на фокальной плоскости (гипотеза плоского очага, углы измерены от оси простирания против часовой стрелки): интегральная длительность 6-8 с, масимальный размер очага 40 км, минимальный размер 20 км; направление максимальной оси 50°, абсолютное значение скорости мгновенного центроида 3.3 км/с, направление скорости мгновенного центроида 170°.

Тензор сейсмического момента определялся в интервале периодов 70-200 с, вторые моменты — 30-60 с.

Для основного землетрясения, одного форшока и 46 афтершоков, происшедших в течение последующих четырех месяцев, известны знаки первых вступлений объемных волн. Большинство решений для фокальных механизмов обладают низким правдоподобием, не удовлетворяя гипотезе двойного диполя. Тем не менее, объединяя данные от близких повторных толчков, удается проследить тенденции пространственного распределения деформаций в пределах очаговой зоны. Ниже обсуждаются карты полей деформаций в афтершоковом процессе, построенные по методике, описанной в Приложении. Для основных эффектов, наблюдаемых в полях деформаций, отношение их амплитуд к характерной ошибке (см. Приложение) лежит в интервале 0.5-2.0, поэтому результаты могут рассматриваться только как качественные тенденции.

#### СТРУКТУРА ОЧАГОВОЙ ЗОНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

#### Тектоническое строение

Эпицентр землетрясения и связанные с ним поверхностные нарушения находятся в пределах небольшой впадины долины р. Тылговаям, оперяющей с юга более крупную Вывенскую впадину, в области развития как "древних", так и "олюторских" структур (рис.5).

По отношению к "древнему" структурному плану очаг землетрясения расположен в осевой части мезозойского террейна, образования которого вместе с лежащими выше отложениями объединены в единую структуру синклинория северо-восточного простирания шириной около 90 км (см. рис.5). Мезозойские вулканогенные комплексы выходят на поверхность на выраженных поднятиями рельефа крыльях синклинория, в ядре они скрыты под мощным чехлом вулканотерригенных толщ, генетически связанных с кайнозойским островодужным процессом [Геологическая ..., 1983]. С обоих бортов синклинорий ограничен встречно падающими пологими шовными зонами: на северо-западе — Ватынской, на юго-востоке — Восточно-Камчатской. Синклинорий асимметричен: наиболее опущенная его часть, занимаемая современной Вывенской впадиной, смещена от осевой линии к северо-западу и отделена от узкого северозападного крыла Вывенским разломом, представляющим южный участок упоминавшегося выше Хатырско-Вывенского сейсмически активного линеамента.

Севернее п-ова Говена юго-восточное крыло синклинория разветвляется на два независимых поднятия, соответствующих "древнему" и "олюторскому" структурным планам (рис.5). Одно из поднятий (Пылгинские горы), по-видимому, более древнее, повторяя форму береговой линии, отклоняется к востоку в соответствии с общей формой синклинория. Второе поднятие (Ивтыгинское), сохраняя типичное для более южных районов северо-восточное простирание, пересе-



кает изгибающийся мезозойский террейн, почти достигая Хатырско-Вывенского линеамента. Это поднятие разделяет систему Апуко-Пахачинских и Вывенскую впадины и, по-видимому, является крайним западным элементом "олюторской" группы структур.

Ивтыгинское поднятие соответствует миоценовой системе чешуйчатых надвигов западной вергентности [Геологическая ..., 1983], но в современном рельефе имеет в плане форму дуги, выпуклой в противоположном юго-восточном направлении, с максимальными высотами во фронтальной части. По-видимому, такая картина является отражением серии поздних (четвертичных ?) взбросовых движений в юго-восточном направлении (рис.5).

Как следует из последнего предположения, современное Ивтыгинское поднятие продолжает в глубь континента дискордантно "древним" простираниям характерный структурный рисунок западного обрамления Командорской котловины. Вместе с прилегающими с запада областями поднятие образует современный синклинорий, по структуре сходный с древним синклинорий, но занимающий лишь часть последнего. Вывенская впадина, расположенная в тылу Ивтыгинского поднятия, занимает по отношению к неРис. 5. Тектоническая схема и разрез опицентральной зоны Хаилинского землетрясения (по данным В.М.Зобина и др. [1993])

На карте: 1— дочетвертичные разломы; 2— Хатырско-Вывенский линеамент; 3— структурные линии рельефа; 4— опицентр Хаилинского землетрясения.

На карте и разрезе: 5 — автохтонные терригенные комплексы азиатской окраины; 6,7 — комплексы Камчатского террейна (6 — меловые, 7 — палеогеновые); 8 — кайнозойские аккреционные комплексы; 9 островодужные комплексы кайнозойского чехла (а вулканогенные, 6 — вулканогенно-терригенные); 10 современные впадины.

На разрезе по профилю А-А: 11 — дочетвертичные разломы; 12 — Хатырско-Вывенский линеамент; 13 предполагаемые четвертичные разломы; 14 — главный разрыв в очаге Хаилинского землетрясения. ВВ — Вывенская впадина, ИП — Ивтыгинское поднятие, В — 60° Ватынский шов, К — Восточно-Камчатский шов

му тектоническую позицию, аналогичную положению Центрально-Камчатской депрессии относительно береговых восточных хребтов Камчатки.

#### Облако афтершоков

Очаговая зона землетрясения, точнее охваченная афтершоковым процессом область, полностью расположена в отделяемой Ивтыгинским поднятием части Камчатского террейна, занимая тыловую область дугообразного изгиба поднятия. Северо-западная граница облака афтершоков на удивление точно соответствует Ватынскому шву, или, учитывая погрешность в определении эпицентров, возможно, Хатырско-Вывенскому линеаменту. Главный толчок и наиболее сильные афтершоки (18 из 23 с  $M \ge 5.0$ ) произошли вблизи северо-западных склонов Ивтыгинского поднятия и частично в его пределах. Магнитуды афтершоков с эпицентрами в Вывенской впадине значимо ниже (всего одно землетрясение c M > 5.0).

Форма очаговой области явно не вписывается в общий структурный рисунок района. Облако афтершоков (рис.6) в целом вытянуто в северозападном направлении поперек общих простираний, пересекая Вывенскую впадину и прилегающие области поднятий. Обращает на себя внимание фактическое совпадение большой оси облака с осью симметрии дуги Ивтыгинского поднятия.

Внутренняя структура облака афтершоков не повторяет его внешних очертаний. Области более плотного расположения эпицентров, по дан-



#### Рис. 6. Облако афтершоков

а --- расположение относительно структурного плана района (изображение структур соответствует рис.5); б упоминаемые в тексте элементы облака: Г — главный толчок, О — общая форма облака, Ф, Т, В — субмеридиональная наиболее плотная полоса афтершоков (Ф --фроктальная группа, Т -- группа в тылу главного взброса, В — афтершоки, связанные со вспышкой активности через 1.5 мес после главного толчка); П - направление горизонтальной проекции большой оси вллипса, аппроксимирующего главную трещину (инструментальная оценка); рис. 6-10 приведены в километровой декартовой системе с началом координат в впицентре главного толчка

диональную полосу общим размером 50 × 15 км, части очаговой зоны (рис.7). Заметим, что етот расширяющуюся в районе эпицентра главно- результат — не прямое следствие магнитудного го землетрясения (рис.6). Такое расположение превосходства афтершоков юго-западной части не соответствует какой-либо видимой геологической структуре. Поскольку глубины гипоцентров ленное сходство их механизмов. определены неточно, у нас нет возможности привязать афтершоки к определенному крылу глав- разбивается на несколько принципиально разного разрыва. Но в целом южная часть субмеридиональной полосы расположена во фронтальной диональная группа афтершоков четко распадапо отношению к главному взбросу области, а се- ется на две полосы, кулисообразно подстраиваверная часть — в его тылу.

#### Главные структурные направления

Таким образом, в пределах очаговой зоны выделяются три характерных направления, соответствующих структурам различного масштаба:

 северо-восточное простирание основных геологических структур;

 северо-западное простирание облака афтершоков в целом:

 субмеридиональное простирание наиболее плотной группы афтершоков.

Каждое из этих направлений присутствует и в инструментально определенных параметрах главного очага, причем в соответствии с заложенным в методике масштабом осреднения:

— длинноволновые оценки фокального механизма главного землетрясения соответствуют движению по разлому северо-восточного простирания, падающему в сторону континента (см. рис.4), что характерно как для западного обрамления Командорской котловины, так, повидимому, и для его современного продолжения в глубь континента — Ивтыгинского поднятия;

- горизонтальная компонента взбросовой подвижки направлена вдоль простирания облака афтершоков, совпадающего с направлением оси симметрии дугообразного изгиба Ивтыгинского поднятия;

- субмеридиональные простирания во внутренней структуре облака афтершоков коррелируют с формой главного разрыва, точнее с направлением горизонтальной проекции большой оси вллипса, аппроксимирующего главную трещину (рис.6), но общая протяженность субмеридиональной полосы афтершоков более чем в два раза превышает размер проекции большой оси вллипса.

Оценки полей сейсмогенных деформаций в афтершоковом процессе позволяют сделать следующие выводы.

1. Максимальные деформации происходили во ным В.М. Зобина и др., вытягиваются в субмери- фронтальной (по отношению к главному взбросу) очаговой зоны, но также подразумевает опреде-

> По характеру деформаций очаговая зона личных областей (рис.8). В частности, субмериющиеся в районе эпицентра главного землетрясения. Южная (фронтальная) полоса совпадает



Рис. 7. Карта пространственного распределения амплитуд деформаций в афтершоковом процессе Единицы измерения условные

На рисунки 7-10 нанесены отдельные элементы структурного плана района, соответствующие рис.5, кружками изображены эпицентры афтершоков, использованных для реконструкции полей деформаций

с областью максимальных деформаций. Она отклоняется от меридионального направления к востоку, приближаясь к общему простиранию Ивтыгинского поднятия. Северная (тыловая) полоса, полностью лежащая в пределах Вывенской впадины, состоит из более слабых афтершоков и имеет меридиональное простирание. Отличаясь между собой по характеру деформаций, обе полосы внутрение достаточно однородны. Исключение составляет группа афтершоков, расположенных юго-западнее эпицентра и занимающих промежуточное положение как пространственно, так и по типу деформаций. Эти афтершоки соответствуют вспышке активности, происшедшей через 1.5 мес после главного толчка, которая, повидимому, должна рассматриваться как самостоятельное событие, связанное с появлением нового крупного разрыва. В других частях очаговой зоны выделяется область на северо-западном борту Вывенской впадины, где деформации близки по типу к фронтальной полосе.

3. Характер тектонических процессов в различных частях очаговой зоны наглядно представляется в терминах деформаций горизонтальной плоскости. В южной фронтальной полосе в афтершоковом процессе преобладали горизонтальные деформации сжатия или процессы поднятия (в принятой модели эти утверждения тождественны — см. Приложение). В северной полосе, наоборот, шел процесс растяжения или



Рис. 8. Карта различия тензоров деформаций За критерий различия выбран угол в 5-мерном пространстве (см. Приложение) по отношению к вектору, описывающему деформации в области максимальных амплитуд (см.рис.7)

опускания (рис.9). Интересно, что даже в пределах одной очаговой зоны деформации, связанные с сейсмическим процессом, хорошо коррелируют с тектонической структурой и рельефом района. В относительно приподнятых юго-восточном и северо-западном краях зоны преобладают процессы сжатия, в пределах Вывенской впадины растяжения.

 Во фронтальной полосе направление вектора максимальных горизонтальных деформаций (в данном случае — сжатия) практически совпа-



Рис. 9. Карта распределения областей общего поднятия и опускания (общего горизонтального сжатия и растяжения). Единицы измерения условные



Рис. 10. Карты направлений осей горизонтального сжатия и растяжения а — отклонение осей сжатия от направления горизонтальной проекции большой оси трещины, возникшей при главном землетрясении (азимут 14°); б — отклонение осей растяжения от опорного направления (азимут 340°)

дает с простиранием самой полосы афтершоков (рис.10,а). Таким образом, в афтершоковом процессе основные смещения в данном месте происходили вдоль полосы. Но это направление соответствует и инструментальной оценке большой оси эллипса, аппроксимирующего главный разрыв. Сопоставляя последние три наблюдения, можно предположить, что в данной части обла-

ка афтершоков движения происходили преимущественно вдоль трещины, возникшей в результате главного толчка.

5. В северной полосе тот же эффект выражен не столь четко. Хотя вектор максимальных горизонтальных деформаций (растяжения) отклоняется от меридионального простирания полосы всего на 20°, он одновременно настолько же близок и к наиболее вероятному направлению растяжения Вывенской впадины (рис.10,б). В условиях невысокого качества данных не ясно, какой из этих фактов заслуживает большего внимания.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В попытке восстановить напряженное состояние или тип движений на локальном участке предполагаемой границы плиты Берингии мы сталкиваемся с определенными трудностями. В очаговой зоне обсуждаемого сильного землетрясения наблюдаются различные (частично противоположные) реакции на интересующее нас исходное поле тектонических напряжений. Направления движений в главном толчке и в основной части афтершокового процесса отличаются не менее чем на 45°. Причиной этого может быть несоответствие современных движений и разломной реологии района. Поэтому прежде всего мы обсудим возможную сейсмотектоническую интерпретацию наблюдаемых очаговых характеристик и их различий.

#### Сейсмологические аспекты

В пространственных и деформационных параметрах афтершокового процесса явно просматриваются корреляции с инструментальными оценками формы трещины, активной в процессе главного толчка (рис.4,6,7-10). По-видимому, появление этой трещины в дальнейшем определяло анизотропию прочностных свойств очаговой области. Предел прочности (трение) на ее внутренней поверхности оказался ниже, чем в окружающей среде, и материал "потек" вдоль ослабленной зоны. Это "течение" мы наблюдаем в виде полосы афтершоков, направленной вдоль большой оси эллипса, аппроксимирующего трещину.

Выше отмечалось, что по деформационным характеристикам такой модели лучше всего удовлетворяет наиболее активная (включающая 11 из 23 событий с  $M \ge 5.0$ ) фронтальная группа афтершоков, расположенная в юго-восточной части очаговой зоны (на рис.7 это область максимальных деформаций). Ее линейная протяженность (20 км) также соответствует инструментальной оценке большой оси трещины, спроектированной на дневную поверхность. Таким образом, главный разрыв, вероятнее всего, располагался в юго-восточной части очаговой зоны. Пространственное совмещение трещины с фронтальной группой афтершоков означает, что продолжение плоскости разрыва пересекает дневную поверхность в пределах Ивтыгинского поднятия. Поэтому, хотя эпицентры главного толчка и большинства афтершоков в плане тяготеют к впадине, основное землетрясение, видимо, правильнее относить к южной части Ивтыгинского поднятия.

Сама по себе приуроченность "вторичного течения" поверхности главного разрыва не является чем-то неожиданным. Своеобразие рассматриваемой ситуации — в явной дискордантности трещины всем главным направлениям механизма землетрясения. В результате "вторичное течение" оказалось направленным под углом ≈ 45° к главной подвижке. Заметим, что наблюдаемое направление "течения" (на юг, что соответствует фронтальному сжатию) совпадает с направлением проекции главной подвижки на большую ось трещины.

Резкое изменение характера анизотропии прочностных свойств очага позволяет предположить, что разрыв, проявившийся в процессе Хаилинского землетрясения, является новым образованием, а не элементом длительно развивающегося разлома. Еще отчетливее это видно из распределения деформаций в афтершоковом процессе. Облако афтершоков значительно превосходит по размерам область первоначального возбуждения. Однако описанная выше картина "вторичного течения" наблюдается только в окрестности главной трещины. Вдали от нее характер деформаций принципиально иной (рис.8-10), т.е. на полученных картах полей деформаций не выявлено ни продолжения трещины, ни, тем более, типичной для многих землетрясений картины возбуждения крупного разлома. Напомним, что в видимой тектонической структуре очаговой зоны такой разлом также отсутствует.

Возникновение удаленных от главной трещины афтершоков можно объяснить наведенными при смещении ее краев дополнительными статическими полями напряжений. Фактически на одной трещине в разное время действовали два относительно простых источника: главный толчок и "вторичное течение", различающиеся направлениями подвижки. В геометрии облака афтершоков мы видим проявления обоих полей. Облако в целом вытянуто примерно по направлению максимальных горизонтальных статических напряжений, порожденных главным толчком. Аналогично субмеридиональная полоса афтершоков, расположенная севернее главной трещины, вытянута по направлению максимальных напряжений, порожденных "вторичным течением". В последнем случае обсуждаемая модель объясняет. и знак деформаций - горизонтальное растяжение. Действительно, афтершоки, произошедшие



**Рис.11.** Схема распределения областей сжатия и растяжения в разрезе афтершоковой зоны Хаилинского землетрясения

 главный разрыв; 2 — области горизонтального растяжения и сжатия; 3 — вертикальная составляющая деформации дневной поверхности; 4 — современные (?) разломы; ВВ — Вывенская впадина, ИП — Ивтыгинское поднятие

в районе Вывенской впадины на коровых глубинах, оказываются относительно главной трещины в тыловой части аллохтонного блока. Если подвижка имеет взбросовую составляющую, в этой области возникают напряжения субгоризонтального растяжения (рис.11).

Интересно, что мы не наблюдаем симметричной картины в автохтонном блоке. Возможно, это свидетельствует о том, что в данном землетрясении активен был только аллохтон.

При использовании тех или иных деформационных характеристик очага Хаилинского землетрясения для восстановления кинематики границы плит нужно, конечно, сделать выбор в пользу параметров механизма главного толчка. Помимо чисто масштабных соображений (крупнейшее землетрясение, максимальное пространственное осреднение процесса) еще раз подчеркнем, что главный толчок происходил в значительно более изотропной среде, чем последующий афтершоковый процесс и, следовательно, непосредственнее отражает тектонические напряженное состояние на локальном участке границы плит. Параметры главного толчка соответствуют северозападному сжатию.

Из сейсмологических данных можно сделать следующие выводы и предположения:

--- Хаилинское землетрясение произошло в районе преобладающего северо-западного сжатия и имело характер корового взброса в юговосточном направлении;

 — землетрясение не лежит на крупном активном разломе, образовавшийся в пределах земной коры разрыв протяженностью около 40 км представляет собой новую дислокацию;

— образование главного разрыва, вытянутого под углом около 45° к направлению подвижки, привело к возникновению значительной анизотропии прочностных свойств очага, направление дальнейших деформаций (большинство сильнейших афтершоков) в значительной степени определялось формой ослабленной зоны;

— большинство афтершоков приурочены к главному разрыву и аллохтонному блоку, при этом во фронтальной части последнего продолжала (как и в главном точке) развиваться зона горизонтального сжатия, а в его тылу — зона растяжения.

#### Попытка тектонической интерпретации

Ни одна из изложенных выше альтернативных гипотез (2)-(4), связывающих сейсмичность южной Корякии с тектоническими процессами, происходившими в этом районе в недавнем геологическом прошлом, не может самостоятельно объяснить сейсмотектонические явления, наблюдаемые в очаге Хаилинского землетрясения. "Субдукционной" гипотезе (2) противоречит пространственное расположение землетрясения. Его неглубокий очаг явно смещен к северо-западу относительно любого возможного положения древней зоны субдукции и лежит выше ее поверхности. Гипотезы (3) и (4) неприемлемы, так как, исходя из них, в очаге должно преобладать горизонтальное растяжение вместо наблюдаемого сжатия.

И тем не менее отдельные черты альтернативных гипотез явно присутствуют в очаговых характеристиках Хаилинского землетрясения. Характер движений в главном землетрясении (длинноволновый механизм) хорошо соответствует субдукционной гипотезе (2). Плоскость разрыва падает под континент и повторяет общее простирание структур западного обрамления Командорской котловины. Черты, предсказываемые гипотезами (2) и (4), присутствуют в наблюдаемом поле деформаций. Очаговое поле в меньшем масштабе повторяет типичную картину сопряженных зон сжатия и "задугового растяжения". Тыловое расположение области растяжения Вывенской впадины относительно сопряженной области сжатия в Ивтыгинском поднятии аналогично тектонической позиции Центрально-Камчатской депрессии по отношению к кайнозойской или современной зонам субдукции. Такое наблюдение оправдывает предполагаемую генетическую связь впадины с депрессией.

Перечисленные черты Хаилинского землетрясения показывают, что современные тектонические движения Южной Корякии, не будучи непосредственным продолжением какого-либо из крупных предыдущих процессов, тем не менее обладают по отношению к ним определенной кинематической преемственностью. Иными словами, начиная с четвертичного времени в этом районе произошла перестройка границ плит, причем новая граница унаследовала некоторые черты древних. Нам остается взглянуть на имеющиеся данные с точки зрения гипотезы (1).

85

В обсуждаемой современной картине явно просматривается тенденция, проявившаяся в этом районе начиная с четвертичного времени: продолжение на север в пределы континента (в Южную Корякию) структур Командорской котловины и ее обрамления. По-видимому, в это время, когда на проходившей по восточному краю Северной Камчатки границе заканчивается процесс активной субдукции, сама граница несколько продлевается к северу, пересекая Командорский шельф и край континента примерно до линии современного Хатырско-Вывенского линеамента (судя по ареалу распространения вулканитов Олюторской области растяжения [Геологическая карта, 1983]). Начиная именно с этого момента существует граница плит в районе, где произошло Хаилинское землетрясение. Однако современный характер движений на границе устанавливается не сразу. Некоторое время (соответствующее интервалу четвертичного олюторского вулканизма) еще существует независимая Командорская плита, отделенная от расположенной восточнее Берингии границей, проходившей, по-видимому, по Олюторскому хребту в Корякии и подводному хребту Ширшова. В настоящее время все эти структуры пассивны, что означает присоединение Командорской плиты к Берингии. Только после того как это произошло, на западной границе Берингии установился современный режим движений.

Современная западная (Корякско-Северокамчатская) граница Берингии может быть подразделена на два участка (рис.12). Северный (Корякский), судя по сейсмичности, проходит из Анадырского залива на юго-запад через Центральную Корякию и приблизительно соответствует Хатырско-Вывенскому линеаменту. Ориентируясь на время развития "олюторских" структур, т.е. на время продвижения границы плит в глубь континента, возраст северного участка границы можно условно принять раннечетвертичным. Судя по крайне ограниченной информации о механизмах землетрясений (рис.2),



Рис. 12. Качественная схема современного движения Берингии

границы плит (проведены по сейсмическим поясам);
линии вращения Берингии относительно расположенной восточнее плиты (Северо-Американской или Колымской);
полюс вращения с координатами 67° N,
176° Е;
чизобата 2000 м. На врезке увеличен район Южной Корякии и дополнительно нанесен контур Ивтыгинского поднятия и епицентры афтершоков Хаилинского землетрясения

характер движений на этой границе постепенно меняется от чистого правого сдвига в Анадырском заливе к взбросо-сдвигу ближе к югозападному окончанию линеамента.

Южный (Камчатский) участок границы, вероятно, в значительной степени наследует зоны разломов, возникшие в результате кайнозойской субдукции. Здесь преобладает взбросовый характер движений (горизонтальное сжатие). В тылу зоны сжатия продолжается развитие сопряженной зоны растяжения - впадин северного окончания Центрально-Камчатской депрессии. Тип движений на камчатском участке границы геометрически примерно подобен неогеновой субдукции Командорской плиты под Камчатку. Но скорость перемещения Берингии относительно Камчатки, по-видимому, существенно ниже, чем скорость перемещения Командорской плиты в неогене. Современная зона субдукции в этом районе отсутствует. "Древние" разломы южного участка границы непосредственно не соединяются с северным Хатырско-Вывенским линеаментом.

Хаилинское землетрясение произошло в небольшой области, разделяющей Корякский и Камчатский участки западной границы Берингии. Выше отмечено отсутствие в окрестности очага крупных разломов, контролирующих сейсмичность. Вероятно, структурно этот переходный короткий участок границы еще не вполне сформировался. Однако по характеру напряженного состояния и типу деформаций он непрерывно продолжает Камчатский участок границы.

На рис.12 предпринята попытка оценить положение современного полюса вращения Берингии относительно расположенных западнее территорий. Напомним, что разбиение на плиты районов, окружающих Берингию с запада и севера, остается еще не решенной проблемой. Постепенному изменению относительных движений вдоль западной границы Берингии от правых сдвигов в Анадырском заливе к нормальному сжатию на Камчатке соответствуют полюса, расположенные приблизительно в центральной части Чукотки. На рис.12 изображено одно из возможных положений полюса (67° N, 176° E). Из данного положения полюса, возможно, следует и простая картина движений на юго-восточной границе Берингии: если Алеутская дуга неподвижна относительно Северной Камчатки, Берингия, возможно, "скользит" на запад вдоль линии Алеутской дуги. Кроме того, если районы Азии западнее Берингии относятся к Северо-Американской плите, то рассматриваемая модель предсказывает субмеридиональное растяжение в Центральной и Запалной Аляске.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны М.Н. Шапиро за постоянные консультации и обсуждения проблем тектоники Камчатки и Корякии, а также В.М. Зобину за предоставление материалов по Хаилинскому землетрясению на стадии подготовки их к печати. А.В.Ландер и др. — Тектоническая позиция и очаговые параметры Корякского землетрясения

87

#### Приложение

#### Краткое описание методики реконструкции полей сейсмогенных деформаций

1. Для каждого землетрясения (индекс k) по наблюдениям знаков вступлений обычным образом [Желанкина и др., 1971] вычисляются функция правдоподобия l от нормированного тензора деформаций m (рассматриваемого как вектор в пятимерном линейном пространстве трехмерных симметричных тензоров с нулевым следом) и апостериорная плотность вероятности

$$P_k(m) = l(m) / \int l(m) dt.$$

Здесь и ниже интеграл (на практике сумма) приближенно вычисляется по единичной пятимерной сфере.

По плотности вероятности определяются среднее значение тензора и ковариационная "матрица ошибок" его компонент:

$$\langle m \rangle_k = \int m P_k(m) dm; \quad B_k = \int m m^T P_k(m) dm.$$

2. Предполагается, что амплитуда деформаций в эпицентре землетрясения не зависит от его магнитуды  $M_k$ , но соответствующие деформации m, описываемые вероятностным распределением  $P_k(m)$ , приписываются объему, окружающему kгипоцентр  $r_k$  с характерным радиусом

$$\lg R_k = M_k/2 + const$$

В пределах выбранного объема амплитуда деформаций плавно убывает от центра к краям по фиксированному закону  $D((r - r_k)/R_k)$ , конкретный вид которого определяется априорными представлениями о структуре района и имеющимися данными.

3. В предположении независимости *m<sub>k</sub>* для разных землетрясений суммарная деформация в произвольной точке *г* вычисляется как

$$M(r) = \sum_{k} D((r-r_k)/R_k) < m >_k,$$

а "матрица ошибок"

$$B(r) = \sum_{k} D((r - r_k)/R_k)B_k$$

Амплитуда деформаций в точке r (см. рис.7) определяется как модуль пятимерного вектора |M(r)|.

Для оценки надежности результатов используется, в частности, характерное отношение сигнал/шум:

$$q(r) = \{|M(r)|/[Trace\{B(r)\}/5]\}^{1/2}$$

В качестве меры различия деформаций в разных точках  $r_1$  и  $r_2$  на рис.8 использован угол  $\alpha$ между векторами  $M(r_1)$  и  $M(r_2)$  в пятимерном пространстве, определяемый соотношением

$$\alpha = \arccos[M(r_1), M(r_2)]. \tag{1}$$

4. Горизонтальные деформации горизонтальной плоскости задаются тензором  $h(2 \times 2)$ , являющимся минором полного тензора деформаций M (в матричной форме) в соответствующем базисе. Параметры пространственного распределения ориентации главных осей тензора h приведены на рис.10.

Тензор h имеет, вообще говоря, ненулевой слел. Это означает, что в горизонтальной плоскости существуют области общего сжатия  $(Trace{h} < 0)$  и растяжения  $(Trace{h} > 0)$ . Из условия  $Trace\{M\} = 0$  следует, что значение Trace{h} с обратным знаком равно вертикальной составляющей деформации горизонтальной плоскости. Поэтому в рассматриваемой модели области общего горизонтального сжатия однозначно являются и областями опускания, а области растяжения — областями поднятий. Соответственно, карты поднятий-опусканий дневной поверхности, приведенные на рис.9, простой заменой знака превращаются в карты горизонтального сжатия-растяжения (карты значений  $Trace\{h\}$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

Букчин Б.Г. Оценки временных и геометрических характеристик очага землетрясения по пространственно-временным моментам тензора избыточных напряжений// Математические методы в сейсмологии и геодинамике. М.: Наука, 1986. С.145-155. (Вычисл. сейсмология; Вып.19).

Букчин Б.Г. Предварительная оценка параметров очага Рачинского землетрясения 29 апреля 1991 г.// Изв. РАН. Физика Земли. 1992. N 5. C.5-13.

Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1000000. Министерство геологии СССР, 1983.

Гунбина Л.В., Ефремова Л.В., Бобков А.О., Рудик М.И. Корякское землетрясение 13 октября 1988 г. Препр. СевКНИИ ДВО АН СССР. Магадан, 1991.

Желанкина Т.С., Кейлис-Борок В.И., Писаренко В.Ф., Пятецкий-Шапиро И.И. Определение механизма землетрясений на цифровой электронной вычислительной машине// Алгоритмы интерпретации сейсмических данных. М.: Наука, 1971. С.3-27. (Вычисл. сейсмология; Вып.5).

Землетрясевия в СССР в 1962-1989 гг. М.: Наука, 1965-1992.

Зобин В.М., Бахтиаров В.Ф., Борисенко В.Н. и др. Корякское землетрясение 8 марта 1991 г.// Землетрясения в Северной Евразии в 1991 году. М.: Наука. В печати.

Исаев Е.Н., Ушаков С.А., Гайнанов А.Г. Геофизические данные о закономерностях структуры коры в северной части Тихоокеанской переходной зоны// Земная кора островных дуг и дальневосточных морей. М.: Наука, 1972. С.69-83.

Кепежинскас П.К. Позднекайнозойские вулканические серии обрамления Командорской котловины: Автореф. дис...,канд. геол.-минерал. наук. М., 1987. 21 с.

Ландер А.В. О современных границах плит на Северо-Востоке Азии// Тектоника и минерагения Северо-Востока СССР: Тез.докладов школы-семинара. Магадан, 1990.

Новый каталог сильных землетрясений на тер-

ритории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977.

Сейсмологический бюллетень Дальнего Востока 1982-1989 гг. Южно-Сахалинск, 1990.

Соколов С.Д. Аккреционная тектоника Корякско-Чукотского сегмента Тихоокеанского пояса. М.: Наука, 1992. 181 с.

Ставский Ф.П., Чехович В.Д., Кононов М.В., Зоненшайн Л.П. Тектоника плит и палинспастические реконструкции Анадырско-Корякского региона// Геотектоника. 1988. N 6. C.32-42.

Чехович В.Д., Богданов Н.А., Кравченко-Бережной И.Р. и др. Геология западной части Беринговоморья. М.: Наука, 1990. 159 с.

Шавцер А.Е., Шапиро М.Н. Позднекайнозойская геодинамика Северной Камчатки// Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып.1. М.: ИФЗ РАН, 1993. С.240-250.

Шапиро М.Н., Ермаков В.А., Шанцер А.Е. и др. Очерки тектонического развития Камчатки. М.: Наука, 1987.

**Baranov** B.V., Seliverstov N.I., Murav'ev A.V., Musurov E.L. The Komandorsky Basin as a product of spreading behind a transform plate boundary// Tectonophysics. 1991. Vol.199, N 2/4. P.237-269.

Bulletin of the International Seismological Centre. 1985.

Dziewonski A.M., Ekstrom G., Woodhouse J.H., Zwart G. Centroid-moment tensor solutions for October-December 1986// Phys. Earth and Planet. Inter. 1987. Vol.48. P.5-17.

Dziewonski A.M., Ekstrom G., Woodhouse J.H., Zwart G. Centroid-moment tensor solutions for October-December 1988// Phys. Earth and Planet. Inter. 1989. Vol.57. P.179-191.

Dziewonski A.M., Ekstrom G., Salganik M.P., Zwart G. Centroid-moment tensor solutions for January-March 1991// Phys. Earth and Planet. Inter. 1992, Vol.70. P.7-15.

Global Hypocentres Data Base CD-ROM 1989. NEIC/USGS. II Denver, CO.

Earthquake Data Report. US Department of the Interior Geological Survey. 1989-1992.

Taggart. Alaska Aleutian Islands Catalog 1786-1981.