

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ХАЙЛИНСКОГО (КОРЯКСКОГО) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 8 МАРТА 1991 ГОДА: СУЩЕСТВУЕТ ЛИ ПЛИТА БЕРИНГИЯ?

А.В. Ландер, Б.Г. Букчин, Д.В. Дрознин, А.В. Кирюшин

THE TECTONIC ENVIRONMENT AND SOURCE PARAMETERS OF THE KHAILINO (KORYAKIYA) EARTHQUAKE OF MARCH 8, 1991: DOES A BERINGIA PLATE EXIST?

A.V. Lander, B.G. Bukchin, D.V. Droznin and A.V. Kiryushin

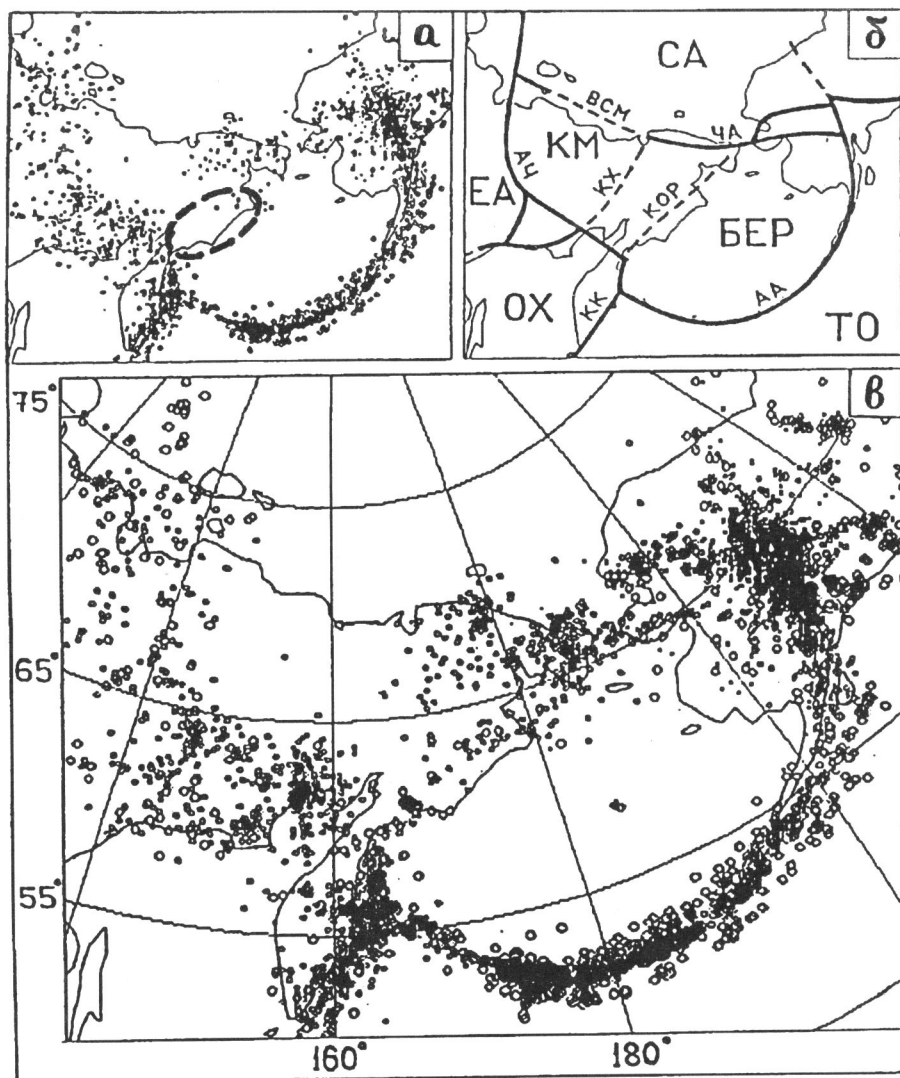
As can be seen from the seismicity of the last decade a continuous seismic belt bounds the Bering sea on the west. Hence the Bering sea region is surrounded by seismic belts, thus identifying the present-day Beringia plate. Alternative hypotheses of the South Koryakiya seismicity origin are discussed. These hypotheses are tested using data for the largest Koryakiya earthquake. Estimates of this earthquake focal mechanism and source spatio-temporal integral parameters were obtained from long period surface wave records. Seismogenic strain fields have been reconstructed from aftershock data. A qualitative model of the source evolution was developed. The relation of the source processes to the recent tectonics of South Koryakiya is demonstrated. The present-day evolution of the plate boundary was compared with past tectonic processes in the region. A rough model of Beringia plate motion was developed.

Крайний северо-восток Азии долго оставался одним из немногих крупных сейсмически активных регионов, где не удавалось найти приемлемого плито-тектонического объяснения природы сейсмичности. По имевшимся данным протяженный Чукотский сейсмический пояс не имел западного замыкания, что не позволяло надежно выделить предполагавшуюся самостоятельную литосферную плиту "Берингию". Наблюдения последних десяти лет дают возможность почти полностью проследить "отсутствующую" западную границу этой плиты. Лишь на небольшом участке в Южной Корякии пока недостаточно данных, но именно здесь в 1991 г. произошло сильнейшее (и наиболее информативное) землетрясение региона. Основные цели нашей статьи: проверка соответствия очаговых характеристик данного землетрясения гипотезе существования Корякской границы плиты Берингии и обсуждение структуры юго-западного участка этой границы.

Название "Корякское землетрясение" используется в литературе во второй раз (в первый – для события 1988 г. [1]). Поэтому ниже мы называем землетрясение 8 марта 1991 г. "Хайлинским" по имени ближайшего к эпицентру поселка.

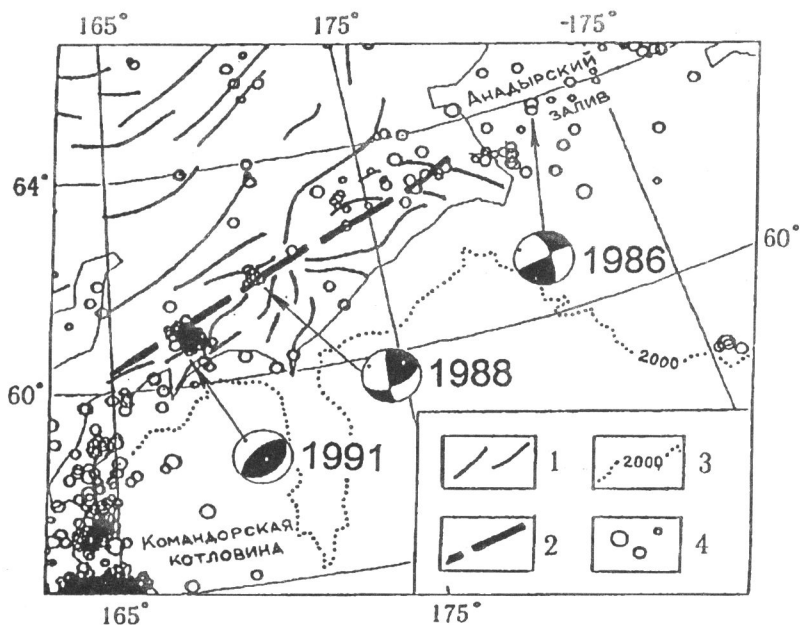
СЕЙСМИЧНОСТЬ И ГРАНИЦЫ ПЛИТ ЗАПАДНОГО ОБРАМЛЕНИЯ БЕРИНГОВОМОРСКОГО РЕГИОНА

На рис. 1, а изображена карта эпицентров землетрясений Берингоморского региона по данным на начало 1980 г. [2–10]. Тогда ситуация выглядела весьма парадоксальной – сейсмический пояс Чукотки – Западной Аляски протяженностью более 2 тыс. км не имел западного замыкания, обрываясь почти в тысяче километров от ближайших сейсмически активных областей Северо-востока Азии. Из этого утверждения вытекают бы весьма необычные следствия: либо Чукотский пояс сейсмичности разделяет две части (арктическую и берингоморскую) единой Северо-Американской (жесткой?) плиты и не является выражением относительного движения плит, либо активные тектонические процессы на западной границе самостоятельной литосферной плиты Берингии не сопровождаются заметной сейсмичностью. Возможной причиной появления таких противоречий мог быть недостаток данных,



Р и с. 1. Сейсмичность и современные границы плит берингоморского региона (к формулировке проблемы существования современной плиты Берингии (а, б) и последние данные о сейсмичности (в))

а – сейсмичность по данным на 1980 г. Пунктиром обведена обсуждаемая область Корякского нагорья, в то время казавшаяся почти асейсмичной; 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 Чукотской 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, Западной и Северной Аляски – все зарегистрированные землетрясения, для сейсмического пояса Арктики – хребта Черского – землетрясение с $M > 3.0$, для Камчатки – с $M > 3.5$, для Алеутской дуги и Южной Аляски – с $M > 5$) (исключены землетрясения в заливе Аляска)



Р и с. 2. Корякский сейсмический пояс по данным на 1992 г.

1 – структурные линии рельефа, 2 – Хатырско-Вывенский линеймент, 3 – изобата 2000 м, 4 – эпицентры землетрясений с $2.5 \leq M \leq 6.6$

связанный с крайней разреженностью местной сейсмической сети (на Чукотке до 1980 г. действовала всего одна станция Иультин).

Исходя из тектонического строения региона, наиболее вероятными можно было считать три направления продолжения Чукотского сейсмического пояса [11] (рис. 1, б):

- на запад через шельф Восточно-Сибирского моря к Новосибирским островам, где на простирации этой линии от основного Арктического пояса сейсмичности отходит небольшая субмеридиональная 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 мировые сети не зафиксировали ни одного землетрясения.

Ситуация начала проявляться только с развертыванием на Чукотке в 1980–1982 гг. стационарной сейсмической сети [6]. Из материалов десятилетних наблюдений (рис. 2) следует, что от Чукотского полуострова на юго-запад через Анадырский залив и северную часть Корякского нагорья в направлении Северной Камчатки протянулась четко выраженная полоса сейсмичности (магнитуды $2.5 \leq M \leq 4$). В 1986 г. в Анадырском заливе произошло и более сильное землетрясение с $M = 5.2$. На простирации этой линии в Центральной Корякии постоянная сейсмичность не регистрировалось, что, возможно, вновь связано с отсутствием станций на севере Камчатки. Однако именно здесь произошло два сильных землетрясения – 1988 г. ($M = 5.5$) и 1991 г. ($M = 6.6$), зарегистрированных мировыми сетями.

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

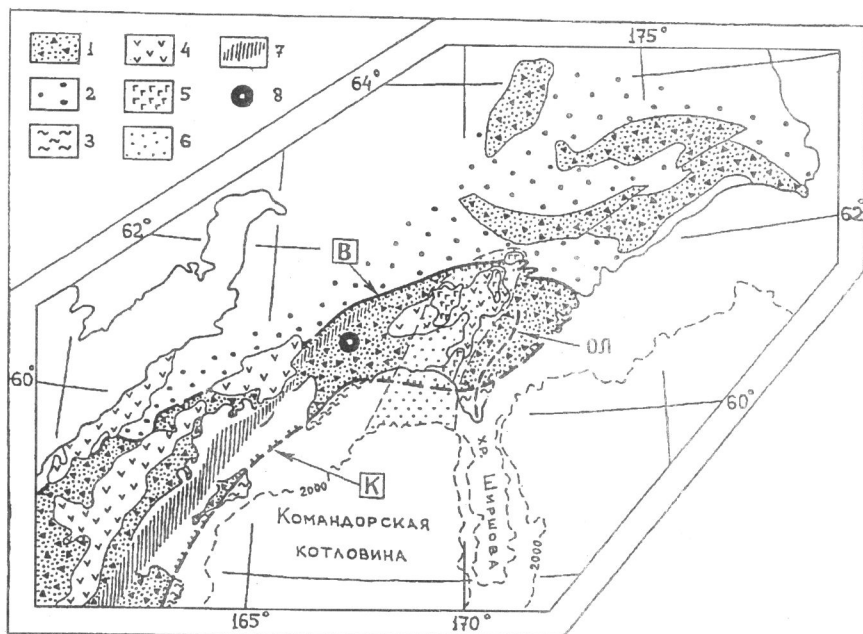
Корякское замыкание не объясняет продолжение Чукотского сейсмического пояса далее на запад вдоль арктического побережья. Небольшое число землетрясений, зарегистрированных в северной части Колымского хребта, пока не может рассматриваться как определенная граница плит. Районы шельфа Восточно-Сибирского 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 рассеянной 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 [12–14], континентальная кора Корякии и Северной Камчатки в основном сформировалась в мезозое–палеогене в результате столкновения с континентальной окраиной Азии нескольких разнородных террейнов, перемещавшихся со стороны Тихого океана. В результате образовалась (рис. 3) контрастная по реологии сильно дислоцированная система разновеликих, преимущественно вулканогенных (в видимой части), блоков, разделенных терригенными толщами континентальной окраины. Крупнейший из этих террейнов – Камчатский, представляет собой меловую островную дугу, присоединившуюся к континенту в середине палеогена (в северной части, возможно, в миоцене). В результате этого столкновения островная дуга была интенсивно деформирована в систему складок и разрывов преимущественно 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 самостоятельным названием "Олюторской зоны".

После присоединения Камчатского террейна к Азии активная граница плит перемещается на его, прежде тыловую, юго-восточную сторону [13]. 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 вулкано-терригенные комплексы [15]. Вдоль юго-восточного края террейна во фронтальной части новой зоны субдукции происходит значительное нарастание континента за счет присоединения преимущественно осадочных аккреционных комплексов. В современной структуре они составляют северо-западное обрамление Командорской котловины Берингова моря [16]. Первоначальное положение зоны субдукции фиксируется Восточно-Камчатским швом (рис. см. 3), отделяющим мезозойский террейн от кайнозойских аккреционных комплексов, а окончательное – погребенным под осадками желобом, протянувшимся вдоль западного континентального подножья Командорской котловины [17]. 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 неогене, по-видимому, существовала субмеридиональная зона спрединга [18], в которой формировалось дно современной Командорской котловины. В четвертичное время эта область растяжения



Р и с. 3. Тектоническая схема Северной Камчатки и Корякии

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

распространилась к северу в пределы континента, частично захватив районы, развивавшиеся прежде в условиях островной дуги (см. рис. 3). На юге Корякии возникает система открытых к югу, в сторону Командорской котловины Апуко-Пахачинских впадин, в пределах которых широко развиты проявления четвертичного рифтогенного вулканизма [19].

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 столкновения 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 хребт является непосредственным продолжением подводного хребта Ширшова (см. рис. 3). Ниже мы покажем, что сходное внутриконтинентальное продолжение имеют и структуры западного обрамления Командорской котловины.

Еще одна структура растяжения – Центрально-Камчатская депрессия – развивается в новейшее время параллельно осевой линии Камчатки. Эта протяженная система узких субмеридиональных впадин в своей северной части (на юге Корякского нагорья) становится прерывистой и постепенно затухает. Ее крайним северным элементом, по-видимому, 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:

I. Землетрясения Корякии от Анадырского залива до Камчатского перешейка являются следствием движений на единой границе плит.

Корякский пояс сейсмичности в целом, по-видимому, соответствует весьма молодой тектонической структуре. На севере Корякского нагорья об этом говорит очевидная дискордантность пояса древнему тектоническому рисунку – пояс сохраняет устойчивое северо-восточное 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 северо-восточное простирание. В первую очередь можно предположить существование линеамента длиной около 700 км, объединяющего: северный борт Вывенской впадины, верховья рек Пахачи и Апуки и верхнюю часть долины р. Хатырки. В северо-восточной части он сечет древние структуры и упирается в Анадырский залив (см. рис. 2). Вблизи этого линеамента, который ниже называется Хатырско-Вывенским, произошло не только большинство землетрясений севера Корякского нагорья, но и два 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. [20–22]. Судя по ним (см. рис. 2) северо-восточный участок границы соответствует правому сдвигу.

Альтернативные гипотезы:

II. Сейсмичность северного и западного обрамления Командорской котловины является реликтом затухшего кайнозойского процесса субдукции со стороны котловины 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 (см. рис. 2). Эта полоса сейсмичности приблизительно повторяет в плане 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 являются правосторонними, оба варианта могут не различаться по условиям в очагах местных землетрясений, предсказывая западное или северо-западное сжатие.

Ш. Сейсмичность юга Корякского нагорья – реликт процесса раскрытия Командорской котловины.

В пространственном распределении единичных известных до 1991 г. землетрясений Южной Корьякии 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.

IV. 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 простирации 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.

Хаилинское землетрясение (как следует из [23]) произошло в 11h 36m 28.4s, имело координаты 60.90 °N, 167.02 °E, глубину 13 км. По данным В.М. Зобина с соавторами [4] очаг, возможно, является более глубоким – до 35–50 км. Магнитуда по разным определениям оценивается в пределах 6.4–7.0.

Землетрясение сопровождалось значительной форшоковой (4 события) и афтершоковой (62 землетрясения с $M \geq 4$, из них 22 с $M \geq 5$) 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 магнитудой около 4.5. Скорректированные данные о координатах афтершоков заимствованы нами из [4]. 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.

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 [24, 25], используя записи основных гармоник волн Релея и Лява на 12 станциях, в диапазоне периодов 30–200 с (рис. 4):

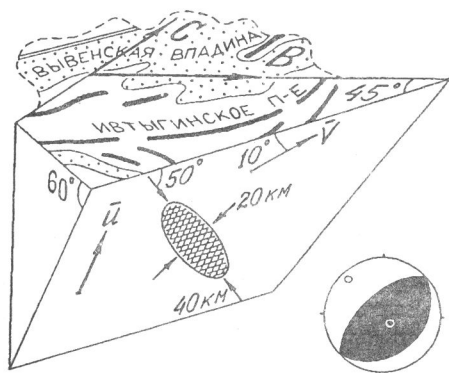
– сейсмический момент $1.3 \cdot 10^{26}$ дн · см;

– фокальный механизм (предпочтительная плоскость): азимут простирации 225° , угол падения 60° , угол подвижки 90° ;

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

Определение тензора сейсмического момента проводилось в интервале периодов 70–200 с, вторых моментов – 30–60 с.

Для основного землетрясения, одного форшока и 46 афтершоков, произошедших в течение последующих четырех месяцев, известны знаки первых вступлений объемных



Р и с. 4. Фокальный механизм и интегральные очаговые параметры главного толчка Хатырского землетрясения (по поверхностным волнам)

u – вектор подвижки, v – вектор скорости мгновенного центра

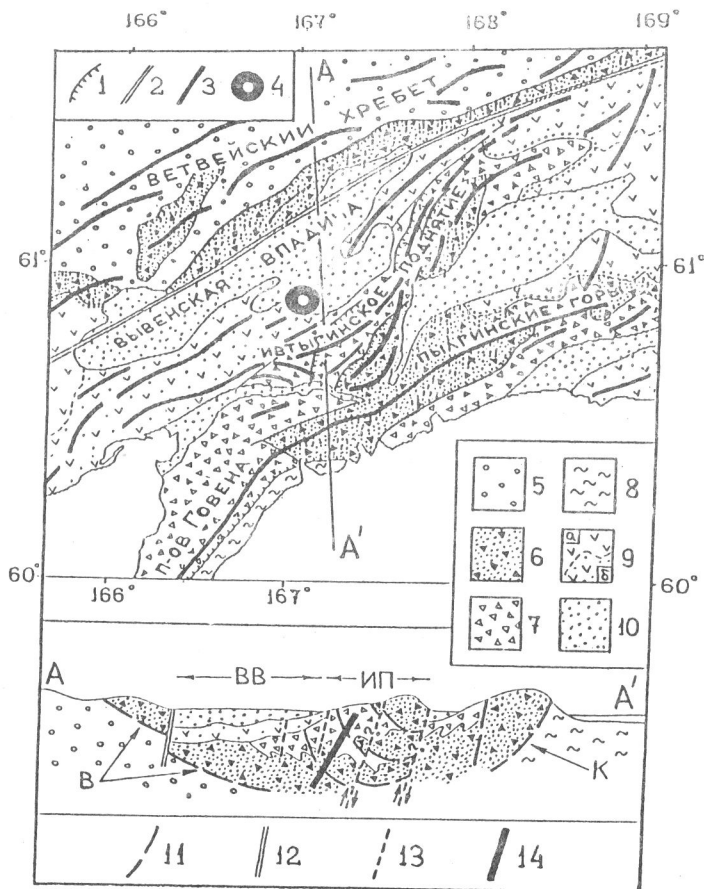
волн. Большинство решений для фокальных механизмов обладают низким правдоподобием, не удовлетворяя гипотезе двойного диполя. Тем не менее, объединяя данные от близких повторных толчков, удастся проследить тенденции пространственного распределения деформаций в пределах очаговой зоны. Ниже обсуждаются 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 [4] находятся в пределах небольшой впадины долины реки 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 синклиория в целом северо-восточного простирания и шириной около 90 км (рис. 5 – разрез). Мезозойские вулканогенные комплексы выходят на поверхность на выраженных поднятиях рельефа крыльях синклиория, а в ядре скрыты под мощным чехлом вулканогенных толщ, генетически связанных с кайнозойским островодужным процессом [26]. С обеих бортов синклиорий ограничен встречно падающими пологими шовными зонами: на северо-западе – Ватынской, на юго-востоке – Восточно-Камчатской. Синклиорий асимметричен: наиболее опущенная его часть, занимаемая современной Вывенской впадиной, смещена от осевой линии к северо-западу и отделена от узкого северо-западного крыла Вывенским разломом, который является южным участком упоминавшегося выше Хатырско-Вывенского сейсмического активного линеамента.

Севернее полуострова Говена юго-восточное крыло синклиория разветвляется на два независимых поднятия, соответствующих "древнему" и "олюторскому" структурным планам (рис. 5). Одно из поднятий, по-видимому, более древнее (Пылгинские горы), повторяя форму береговой линии, отклоняется к востоку в соответствии с общей формой синклиория. Другое поднятие (мы будем называть его Ивтыгинским по имени одного из хребтов), сохраняя северо-восточное простирание, типичное для более южных райнов, пересекает изгибающийся мезозойский террейн, почти достигая Халтырско-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 [26], но в современном рельефе имеет в плане форму дуги,



Р и с. 5. Тектоническая схема и разрез эпицентральной зоны Хаилинского землетрясения

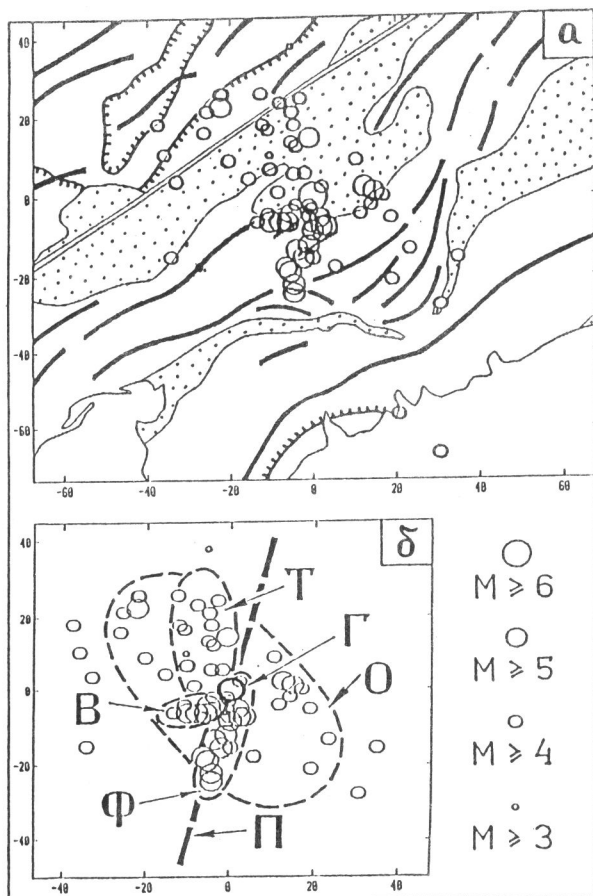
На карте: 1 – дочетвертичные разломы, 2 – Хатырско-Вывенский линеймент, 3 – структурные линии рельефа, 4 – эпицентр Хаилинского землетрясения.

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, б – вулканогенно-терригенные), 10 – современные впадины.

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

выпуклой в противоположном юго-восточном направлении, с максимальными высотами во фронтальной части. По-видимому, такая картина является выражением серии поздних (четвертичных?) взбросовых движений в юго-восточном направлении (рис. 5 – разрез).

Из последнего предположения вытекает, что современное Ивтыгинское поднятие продолжает вглубь континента дискордантно "древним" простираниям характерный структурный рисунок западного обрамления Командорской котловины. Вместе с прилегающими с запада областями, поднятие образует современный синклиниорий, структурно сходный с древним синклиниорием, но занимающий лишь часть последнего. Вывенская впадина, расположенная в тылу Ивтыгинского поднятия, занимает по отношению к нему тектоническую позицию, аналогичную положению Центрально-Камчатской депрессии относительно береговых Восточных хребтов Камчатки.



Р и с. 6. Облако афтершоков

a – расположение относительно структурного плана района (изображение структур соответствует рис. 5);
b – упоминаемые в тексте элементы облака: Г – главный толчок; О – общая форма облака; Ф, Т, В – субмеридиональная наиболее плотная полоса афтершоков (Ф – фронтальная группа, Т – группа в тылу главного взброса, В – афтершоки, связанные со вспышкой активности через полтора месяца после главного толчка); П – направление горизонтальной проекции большой оси эллипса, аппроксимирующего главную трещину (инструментальная оценка)

Облако афтершоков. Очаговая зона землетрясения, точнее область, охваченная афтершоковым процессом, 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 линеamentу. Главный толчок и наиболее сильные афтершоки (18 из 23 с $M \geq 5.0$) произошли вблизи северо-западных склонов Ивтыгинского поднятия и, частично, в его пределах. Магнитуды афтершоков с эпицентрами в Вывенской впадине значимо ниже (всего одно землетрясение с $M > 5$).

Форма очаговой области явно не вписывается в общий структурный рисунок района. Облако афтершоков (рис. 6)* в целом вытянуто в северо-западном направлении

* Рисунки 6–10 приведены в километровой декартовой системе с началом координат в эпицентре главного толчка.

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 вытягиваются в субмеридиональную полосу общим размером 50×15 км, расширяющуюся в районе эпицентра главного землетрясения (см. рис. 6). Такое расположение не соответствует какой-либо видимой геологической структуре. Поскольку глубины гипоцентров определены неточно, у нас нет возможности привязать афтершоки к определенному крылу главного разрыва. Но в целом южная часть субмеридиональной полосы расположена во фронтальной по отношению к главному взбросу области, а северная часть полосы – в его тылу.

Главные структурные направления. В пределах очаговой зоны, таким образом, выделяется три характерных направления, соответствующие 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 масштабом осреднения, заложенным в методике):

– 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, по-видимому, и для его современного продолжения вглубь континента – Ивтыгинского поднятия;

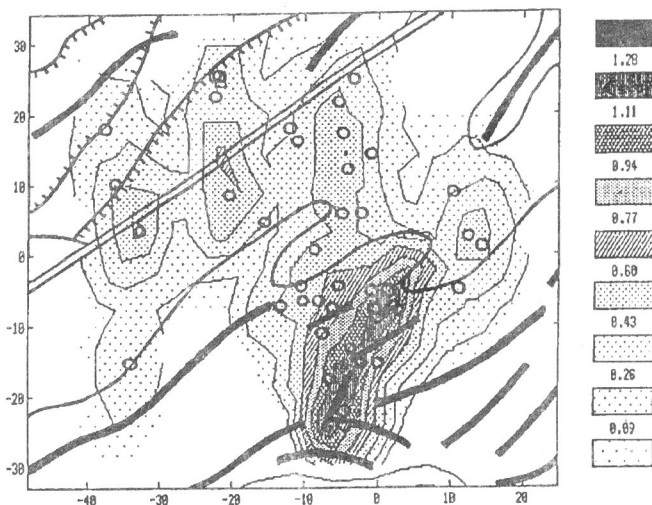
– горизонтальная компонента взбросовой подвижки направлена вдоль простирания облака афтершоков, совпадающего с направлением оси симметрии дугообразного изгиба Ивтыгинского поднятия;

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

Оценки полей сейсмогенных деформаций в афтершоковом процессе выявляют следующие тенденции.

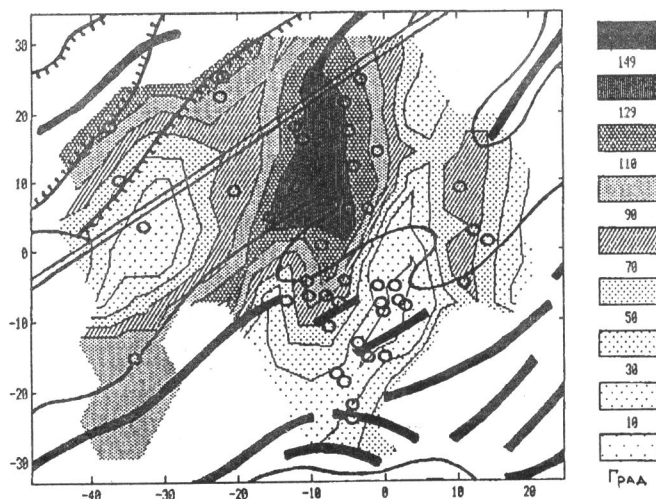
1. Максимальные деформации происходили во фронтальной (по отношению к главному взбросу) части очаговой зоны (рис. 7). Заметим, что этот результат не является прямым следствием магнитудного превосходства афтершоков юго-западной части очаговой зоны, но подразумевает также определенное сходство их механизмов.

2. По характеру деформаций очаговая зона разбивается на несколько принципиально различных областей (рис. 8). В частности, субмеридиональная группа афтершоков четко распадается на две полосы, кулисообразно подстраивающие друг друга в районе эпицентра главного землетрясения. Южная (фронтальная) полоса совпадает 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 внутренне 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, произошедшей через полтора месяца после главного толчка, и, по-видимому, должны



Р и с. 7. Карта пространственного распределения амплитуд деформаций в афтершоковом процессе (единицы измерения – условные)

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

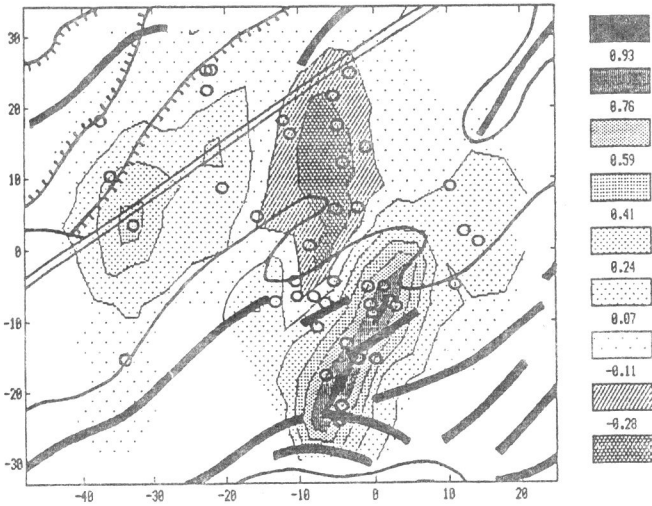


Р и с. 8. Карта различия тензоров деформаций

За критерий различия выбран угол в пятимерном пространстве (формула (А) Приложения) по отношению к вектору, описывающему деформации в области максимальных амплитуд (см. рис. 7)

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 опускания (рис. 9). Интересно, что даже в пределах одной очаговой зоны



Р и с. 9. Карта распределения областей общего поднятия и опускания (общего горизонтального сжатия и растяжения).

Единицы измерения – условные

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, а пределах Вывенской впадины – растяжения.

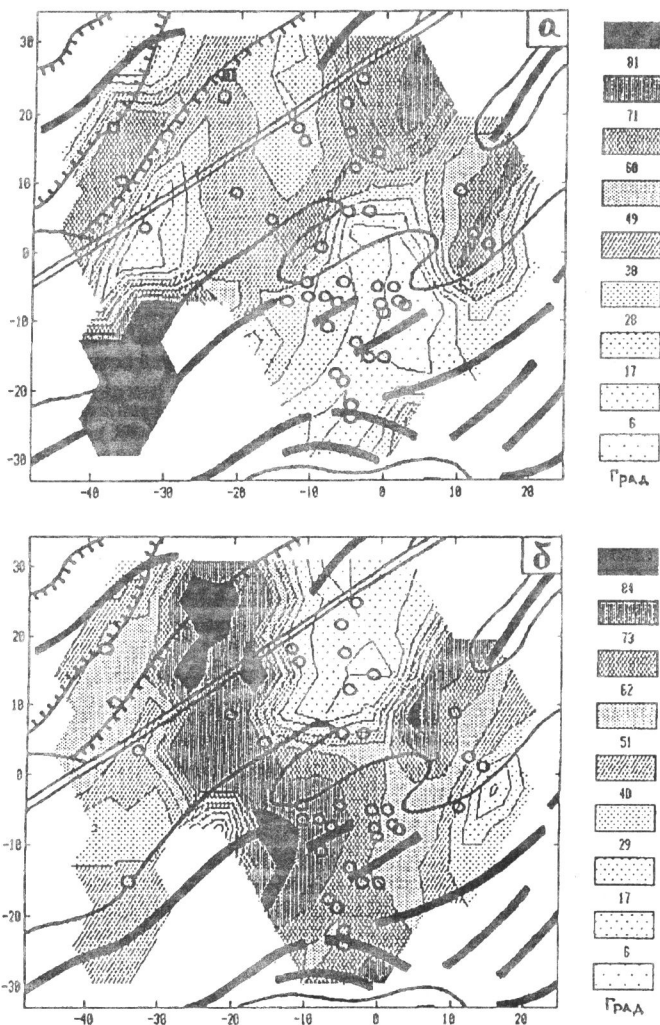
4. Во фронтальной полосе направление вектора максимальных горизонтальных деформаций (в данном случае – сжатия) практически совпадает с простиранием самой полосы афтершоков (рис. 10, а). Таким образом, в афтершоковом процессе основные смещения в данном месте происходили вдоль полосы. Но это направление соответствует и инструментальной оценке большой оси эллипса, аппроксимирующего главный разрыв. Сопоставляя последние три наблюдения, можно предположить, что в данной части облака 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.

ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

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 сеймотектоническую интерпретацию наблюдаемых очаговых характеристик и их различий.

Сейсмологические аспекты. В пространственных и деформационных параметрах афтершокового процесса явно просматриваются корреляции с инструментальными

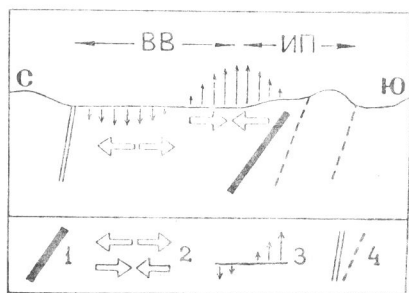


Р и с. 10. Карты направлений осей горизонтального сжатия и растяжения

а – отклонение осей сжатия от направления горизонтальной проекции большой оси трещины, возникшей при главном землетрясении (азимут 14°); *б* – отклонение осей растяжения от направления с азимутом 340°

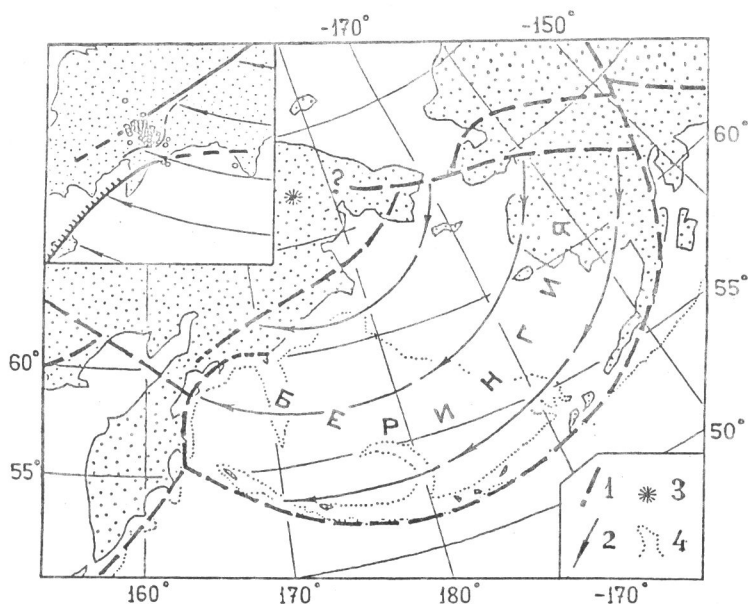
оценками формы трещины, активной в процессе главного толчка (см. рис. 4, 6, 7–10). По-видимому, появление этой трещины в дальнейшем определяло анизотропию прочностных свойств очаговой области. Предел прочности (трение) на ее внутренней поверхности оказался ниже, чем в окружающей среде и материал "потек" 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 $M \geq 5$) 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



Р и с. 11. Схема распределения областей сжатия и растяжения в разрезе афтершоковой зоны Хаилинского землетрясения

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



Р и с. 12. Качественная схема современного движения плиты Берингии

1 — границы плит (проведены по сейсмическим поясам), 2 — линии вращения Берингии относительно расположенной к востоку от нее (Северо-Американской или Колымской?), 3 — полюс вращения с координатами 67°N, 176°E, 4 — изобата 2000 м

На врезке увеличен район Южной Кореякии и дополнительно нанесен контур Ивтыгинского поднятия и эпицентры афтершоков Хаилинского землетрясения

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" к поверхности главного разрыва не является неожиданной. Своеобразие рассматриваемой ситуации — в явной дискордантности трещины всем главным направлениям механизма землетрясения. В результате "вторичное течение" оказалось направлено под углом около 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 (см. рис. 8–10), т.е. на полученных картах полей деформаций не выявляется продолжение трещины, и тем более, типичной для многих землетрясений картины возбуждения крупного разлома. Напомним, что в видимой тектонической структуре очаговой зоны такой разлом также отсутствует.

Возникновение афтершоков, удаленных от главной трещины, в основном можно объяснить наведенными при смещении ее краев дополнительными статическими полями напряжений. Фактически на одной трещине в разное время действовало 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 в направлении максимальных горизонтальных статических напряжений, порожденных главным толчком. Аналогично субмеридиональная полоса афтершоков, расположенная севернее главной трещины, вытянута в направлении максимальных напряжений, порожденных "вторичным течением". В последнем случае обсуждаемая модель объясняет и знак деформаций – горизонтальное растяжение. Действительно, афтершоки, произошедшие 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 говорит о том, что в данном землетрясении активен был аллохтон.

При использовании тех или иных деформационных характеристик очага Хаилинского землетрясения для восстановления кинематики границы плит мы, конечно, должны 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, непосредственное отражает тектоническое напряженное состояние на локальном участке границы плит. Параметры главного толчка соответствуют северо-западному сжатию.

Основные выводы и предположения, вытекающие из сейсмологических данных:

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

- землетрясение не лежит на крупном активном разломе; образовавшийся в пределах земной коры разрыв протяженностью около 40 км является новой дислокацией;

- 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 приурочено к главному разрыву и аллохтонному блоку; при этом во фронтальной части последнего продолжала (как и в главном толчке) развиваться зона горизонтального сжатия, а в его тылу – зона растяжения.

Попытка тектонической интерпретации. Ни одна из изложенных выше альтернативных гипотез II–IV, связывающих сейсмичность южной Корякии с тектоническими процессами, происходившими в этом районе в недавнем геологическом прошлом, не может самостоятельно объяснить сейсмо-тектонические явления, наблюдаемые в очаге Хаилинского землетрясения. "Субдукционной" гипотезе II 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 III и IV неприемлемы, так как предсказывают в очаге преобладающее 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 II. Плоскость разрыва падает "под континент" и повторяет общее простираие структур западного обрамления Командорской котловины. Черты, предсказываемые гипотезами II и IV, 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 (южнее) современной зоне субдукции. Такое наблюдение оправдывает предполагаемую генетическую связь впадины с депрессией.

Перечисленные черты Хаилинского землетрясения показывают, что современные тектонические движения Южной Корякии, не являясь 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 этой последней точки зрения (гипотеза I).

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 границе, проходившей по восточному краю Северной Камчатки, заканчивается процесс активной субдукции, сама граница несколько продвигается к северу (пересекая Командорский шельф и край континента) примерно до линии современного Хатырско-Вывенского линеамента (судя по ареалу распространения вулканитов Олюторской области растяжения [26]). 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 Широша. 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 линеamentу. Ориентируясь на время развития "олюторских" структур, т.е. на время продвижения границы плит вглубь континента, возраст формирования северного участка границы можно условно принять нижнечетвертичным. Судя по крайне ограниченной информации о механизмах землетрясений (см. рис. 2), характер движений на этой границе постепенно меняется

от чистого правого сдвига в Анадырском заливе к взбросо-сдвигу ближе к юго-западному окончанию линеаментов.

Южный (Камчатский) участок границы, по-видимому, 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 приблизительно подобен неогеновой субдукции Командорской плиты под Камчатку. Но скорость перемещения Берингии относительно Камчатки, вероятно, существенно ниже, чем неогеновые скорости Командорской плиты. 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. По-видимому, структурно этот переходной короткий участок границы еще не вполне сформировался. Однако по характеру напряженного состояния и типу деформаций он непрерывно продолжает Камчатский участок границы.

Попытка грубо оценить положение современного полюса вращения Берингии относительно расположенных западнее территорий качественно представлена на рис. 12. 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 соответствует полюс, расположенный приблизительно в центральной части Чукотки. Одно из возможных положений полюса (67°N , 176°E) и изображено на рис. 12. Помимо выполнения предыдущего условия данные координаты полюса приводят к достаточно простой картине на юго-восточной границе Берингии: если Алеутская дуга неподвижна относительно Северной Камчатки, то 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 Западной Аляске.

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.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-05-8870).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Краткое описание методики реконструкции полей сейсмогенных деформаций

1. Для каждого землетрясения (индекс k , вектор координат гипоцентра — r_k) по наблюдениям знаков вступлений обычным образом [27] 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

$$P_k(m) = L(m) / \int L(m) dm.$$

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

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

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

2. Амплитуда деформаций в эпицентре землетрясения предполагается не зависящей от его магнитуды M_k . Но соответствующие деформации m , описываемые вероятностным распределением $P_k(m)$, приписываются объему, окружающему k -гипоцентр r_k с характерным радиусом R_k

$$\lg R_k = M_k / 2 + \text{const.}$$

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_k для разных землетрясений суммарная деформация в произвольной точке r вычисляется как

$$M(r) = \sum_k D((r - r_k) / R_k) \langle m \rangle_k,$$

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"

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

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

$$\alpha = \text{Arccos}(M(r_1), M(r_2)). \quad (\text{A})$$

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

1. Гунбина Л.В., Ефремова Л.В., Бобков А.О., Рудик М.И. Корякское землетрясение 13 октября 1988 года / СВКНИИ ДВО АН СССР, Препр. Магадан.: 1991. 16 с.
2. Землетрясения в СССР в 1962 г., . . . , 1989 г. М.: Наука, 1965–1992.
3. Землетрясения в СССР в 1990 г. М.: Наука. В печати.
4. Зобин В.М., Бахтияров В.Ф., Борисенко В.Н. и др. Корякское землетрясение 8 марта 1991 г. // Землетрясения в Северной Евразии в 1991 году. М.: Наука. В печати.
5. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977.
6. Сейсмологический бюллетень Дальнего Востока, 1982 г., . . . 1989 г. ДВО АН СССР, Южно-Сахалинск.: 1985–1992.
7. Taggart J.N. Alaska & Aleutian Islands Catalog 1786–1981, (USGS).
8. Bull. Intern. Seismol. Centre. 1964 г. . . . 1985 г.
9. Earthquake Data Report, US Department of the Interior Geological Survey. 1989–1992.
10. Global Hypocentres Data Base CD-ROM 1989. NEIC/USGS. II Denver, CO.
11. Ландер А.В. О современных границах плит на Северо-Востоке Азии. // Тектоника и минерагения Северо-Востока СССР. Тез. докладов школы-семинара. Магадан.: 1990. С. 129–130.
12. Ставский Ф.П., Чехович В.Д., Кононов М.В., Зоненшайн Л.П. Тектоника плит и палинспастические реконструкции Анадырско-Корякского региона // Геотектоника. 1988. № 6. С. 32–42.
13. Чехович В.Д., Богданов Н.А., Кравченко-Бережной И.Р. и др. Геология западной части Беринговоморья. М.: Наука, 1990. 159 с.
14. Соколов С.Д. Аккреционная тектоника Корякско-Чукотского сегмента Тихоокеанского пояса. М.: Наука, 1992. 181 с.
15. Шанцер А.Е., Шапиро М.Н. Позднекайнозойская геодинамика Северной Камчатки. В печати.
16. Шапиро М.Н., Ермаков В.А., Шанцер А.Е. и др. Очерки тектонического развития Камчатки. М.: Наука, 1987. 248 с.
17. 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.
18. 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. Vol. 199, N 2–4, 1991. P. 237–269.
19. Кебезинкас П.К. Позднекайнозойские вулканические серии обрамления Командорской котловины: канд. геол.-мин. наук: 04.00.08 М.: 1987. 21 с.
20. Dziewonski A.M., Ekstrom G., Woodhouse J.H., Zwart G. Centroid–moment tensor solutions for October–December 1986 // Phys. Earth and Planet. Inter. Vol. 48, 1987. P. 5–17.
21. Dziewonski A.M., Ekstrom G., Woodhouse J.H., Zwart G. Centroid–moment tensor solutions for October–December 1988 // Phys. Earth and Planet. Inter. Vol. 57, 1989. P. 179–191.
22. Dziewonski A.M., Ekstrom G., Salganik M.P., Zwart G. Centroid–moment tensor solutions for January–March 1991 // Phys. Earth and Planet. Inter. Vol. 70, 1992. P. 7–15.
23. Earthquake Data Report, US Department of the Interior Geological Survey. 1991.
24. 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).
25. Букчин Б.Г. Предварительная оценка параметров очага Рачинского землетрясения 29 апреля 1991 г. // Изв. АН. Физика Земли, № 5, 1992. С. 5–13.
26. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1 000 000. Министерство Геологии СССР, 1983.
27. 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).