

УДК 550.34:551.242

РОИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТСКОЙ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ МЕСТ ЗАРОЖДЕНИЯ ЦУНАМИ

© 2012 г. Г. П. Авдейко, А. А. Палуева

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пуйна, 9, e-mail: gavdeiko@kscnet.ru

Поступила в редакцию 31.05.2011 г.

Анализ пространственно-структурного положения роев землетрясений в Камчатской зоне субдукции за период детальных сейсмических наблюдений показал, что очаговые зоны роев землетрясений, так же как и эпицентры большинства землетрясений, генерирующих цунами, приурочены к подводным горам на хребте-барьере между Камчаткой и глубоководным желобом. “Облака” гипоцентров практически всех роев землетрясений на сейсмических разрезах, ориентированных вкрест простирания субдукционной системы, наклонены в сторону глубоководного желоба, что соответствует второму решению механизма цунамигенерирующих землетрясений, впервые отмеченному Л.М. Балакиной, и модельному эксперименту, проведенному Л.И. Лобковским с соавторами. Рассмотрен вероятный сценарий формирования взбросо-надвиговых блоков, подвижки по которым сопровождаются роями землетрясений и землетрясениями, генерирующими цунами. Дана оценка мест наиболее вероятного зарождения цунами.

ВВЕДЕНИЕ

Восточное побережье Камчатки и Курильские острова неоднократно подвергались разрушительному воздействию волн цунами. За исторический период (около 270 лет) было зарегистрировано 14 катастрофических цунами, три из которых – цунами октября 1737, апреля 1923 и ноября 1952 гг., были наиболее разрушительными [Каталог цунами ..., 1987]. Повторяемость цунами за последние 3000 лет по данным изучения следов палеоцунами на разных участках восточного побережья Камчатки колебалась от 25 до 50 раз в 1000 лет. За последние ~1000 лет вдоль побережья Южной Камчатки и Северных Курил происходило одно катастрофическое цунами в 200–250 лет [Пинегина, Буржуа, 2009]. В связи с этим важное значение приобретает оценка мест возможного зарождения цунами.

В соответствии с классической моделью субдукции гипоцентры сильных землетрясений, в том числе и землетрясений, генерирующих цунами, приурочены к плоскости взаимодействия между субдуцируемой и надвигаемой литосферными плитами [Isacks 1972; Isacks и др., 1968]. Исходя из анализа механизмов очагов сильных землетрясений, генерирующих цунами, и пространственного распределения их афтершоков в пределах Тихоокеанского сейсмического пояса, Л.М. Балакина [1972, 1979] пришла к выводу о том, что большинство землетрясений, сопровождаемых цунами, связано со взбросовыми подвижками по плоскостям, падающим в сторону океана, то есть в противоположном субдукции на-

правлении. С такой интерпретацией согласуются данные о приуроченности большинства мест зарождения цунами к глубоководным террасам на островодужных или континентальных склонах глубоководных желобов [Баранов, Лобковский, 1981; Nishenko, McCann, 1979] и результаты математического моделирования генерации цунами [Алексеев и др., 1978]. Вероятность существования таких взбросовых подвижек подтверждается физическим моделированием процесса субдукции [Лобковский и др., 1980].

Основываясь на этих данных, а также на клавишно-блоковой модели строения консолидированного литосферного выступа надвигаемой (нависающей) плиты [Лобковский, Баранов, 1984] и на концепции сейсмических брешей и сейсмических циклов [Федотов, 1965], Л.И. Лобковский выделил три типа подвижек по разломам при взаимодействии литосферных плит в зонах субдукции, с которыми может быть связано образование цунами [Лобковский, 1988; Лобковский и др., 2004]. Наиболее распространенный первый тип, названный им “смешанным”, характеризуется практически одновременными подвижками как по плоскости взаимодействия поддвигаемой и надвигаемой плит, так и по плоскости взброса или сброса консолидированного литосферного выступа надвигаемой плиты. Второй тип “упругой отдачи” характеризуется подвижками только по плоскости взаимодействия поддвигаемой и надвигаемой плит. В третьем “поршневом” типе разрядка напряжений происходит по субвертикальному взбросу в надвигаемой плите.

При проведении ретроспективного анализа сейсмических событий Камчатской зоны субдукции по выделенным ранее сегментам [Авдейко, Палуева, 2008, 2010] мы обратили внимание на приуроченность роев землетрясений к подводным горам и на повторное проявление роев в одних и тех же местах. Несмотря на низкую точность определения местоположения очагов землетрясений до середины XX века, эпицентры пяти из семи сильных землетрясений, сопровождаемых цунами [Каталог цунами ..., 1987], также оказались приуроченными к подводным горам, причем два из них — к тем же горам, на которых были зарегистрированы рои землетрясений. В данной статье мы проанализируем пространственное и морфоструктурное положение произошедших за период детальных наблюдений роев землетрясений и сравним их с положением мест зарождения цунами. Будет рассмотрен вероятный сценарий проявления роев землетрясений и генерации волн цунами и дана прогнозная оценка мест возможного зарождения цунами. При этом мы будем опираться на сеймотектоническое районирование и на модель сегментации и формирования надвиговых блоков [Авдейко, Палуева, 2011].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЕГО АНАЛИЗА

При оценке пространственного положения роев землетрясений в пределах Камчатской зоны субдукции мы использовали данные регионального каталога землетрясений Камчатки, составленного и пополняемого Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (http://data.emsd.iks.ru/dbquaketxt_min/index_r.htm#tops). Оценка энергии землетрясений в региональном каталоге проводится по шкале энергетических классов (K_s) С.А. Федотова [1972]. Для оценки пространственного положения эпицентров и очаговых зон роевых землетрясений мы, в основном, использовали данные по землетрясениям с $K_s \geq 9.0$, так как уверенно регистрируются землетрясения, начиная с $K_s = 8.5$ [Селиверстов, 2007]. Для анализа пространственного положения генерирующих цунами землетрясений были использованы данные каталогов [Каталог цунами ..., 1987; Новый каталог ..., 1977]. Их магнитудные оценки (M) по поверхностным волнам проведены в соответствии с [Новый каталог ..., 1977], а широко используемые в последнее время моментные магнитуды (M_w) взяты из каталога А.А. Гусева и Л.С. Шумиловой [2004].

Анализ пространственно-структурного положения роев землетрясений и мест возможного зарождения цунами проводился путем построения карт эпицентров землетрясений, сейсмических разрезов, а также с помощью построения компьютерной программой *Maple 7* вращаемых блок-диаграмм. Эта программа позволяет вырезать

объемные блоки на любой участок карты любого размера, содержащие находящиеся в них гипоцентры землетрясений, и путем вращения анализировать их положение в пространстве и приуроченность к определенным морфоструктурам.

Пространственно-структурная приуроченность эпицентров землетрясений и сейсмоактивных структур к соответствующим морфоструктурам континентального склона Восточной Камчатки была проведена на основе батиметрической карты Камчатско-Командорского региона [Селиверстов, 1998]. Эта карта составлена по результатам детальных исследований, проведенных в рейсах НИС “Вулканолог” в 1977–1991 гг., и является наиболее подробной из всех имеющихся для этого района. Кроме того, были использованы сейсмоакустические разрезы, приводимые в работах Н.И. Селиверстова [1998, 2009].

Для анализа приуроченности очагов землетрясений к отдельным морфоструктурам дна важна оценка точности определения координат их эпицентров и глубин очагов. В среднем, точность определения координат составляет 10–15 км, на удалении от сети сейсмических станций — до 30 км, а точность определения глубины очага — около 20 км, на удалении возможны ошибки до 50 км. Следует подчеркнуть, что на практике обеспечивается более высокая точность взаиморасположения очагов землетрясений за счет постоянства сети наблюдений и методики обработки [Федотов и др., 1985]. По более ранним, в основном сильным цунамигенерирующим землетрясениям, произошедшим в XVIII–XX веках, использовались данные [Новый каталог ..., 1977; Каталог цунами ..., 1987], точность определения координат эпицентров и глубин гипоцентров землетрясений значительно ниже.

МОРФОСТРУКТУРЫ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО СКЛОНА ЮГО-ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ

В связи с тем, что “цунами возникает только вследствие тех землетрясений, которые связаны с быстрым образованием на дне океана сбросов, обвалов и оползней” [Святловский, 1957, с. 3], важное значение приобретают данные о рельефе дна в местах зарождения цунами [Соловьев и др., 1959]. Детали строения подводного рельефа между побережьем Восточной Камчатки и Курило-Камчатским глубоководным желобом, т.е. местом приуроченности эпицентров почти всех цунамигенерирующих землетрясений, стали известны благодаря подробной батиметрической карте, составленной Н.И. Селиверстовым [1998]. На рис. 1 приведен упрощенный фрагмент этой карты.

Отличительной особенностью строения континентального склона Восточной Камчатки является наличие крупных впадин Авачинского,

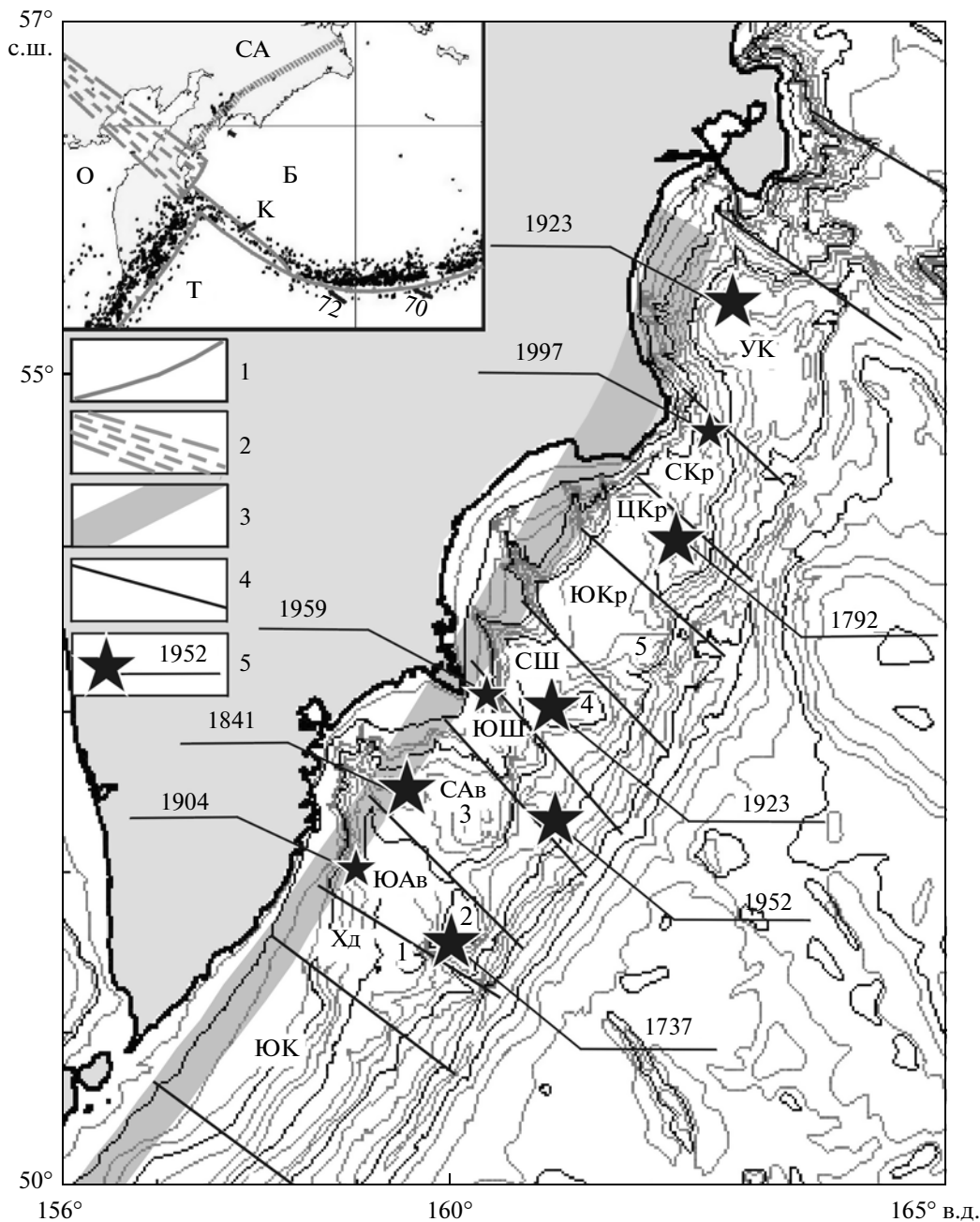


Рис. 1. Положение эпицентров цунамигенерирующих землетрясений в сейсмоактивных сегментах Камчатской зоны субдукции.

Сейсмоактивные сегменты по Г.П. Авдейко и А.А. Палуевой [2010]; батиметрическая основа по Н.И. Селиверстову [1998].

На врезке: 1 – границы литосферных плит; 2 – рассредоточенная граница между Охотской (О) и Северо-Американской (СА) плитами; Б – Берингийский блок СА плиты; Т – Тихоокеанская плита; К – Командорская микроплита. На карте: 3 – фронтальная тектоническая дуга (зона резкого изгиба Тихоокеанской плиты); 4 – разломы – границы между сейсмоактивными сегментами; 5 – эпицентры цунамигенерирующих землетрясений. Сегменты: ЮК – Южно-Камчатский, Хд – Ходуткинский, ЮАв – Южно-Авачинский, САв – Северо-Авачинский, ЮШ – Южно-Шипунский, СШ – Северо-Шипунский, ЮКр – Южно-Кроноцкий, ЦКр – Центрально-Кроноцкий, СКр – Северо-Кроноцкий, УК – Усть-Камчатский. Цифрами на карте отмечены отдельные подводные горы.

Кроноцкого и Камчатского заливов, отделенных от Курило-Камчатского глубоководного желоба подводными хребтами-барьерами, которые “на-

чинаются и заканчиваются у подводных продолжений полуостровов Восточной Камчатки или крупных поперечных горст-антиклинальных

морфоструктур континентального склона” [Селиверстов, 2009, с. 15]. Единый хребет-барьер протягивается субпараллельно глубоководному желобу от широты 51° на юге Камчатки до сочленения с Алеутской дугой (56° с.ш.). Хребет-барьер в пределах Авачинского залива назван хребтом Шатского в честь выдающегося советского геолога Н.С. Шатского [Селиверстов, 1998]. В хребте Шатского выделяются отдельные горы, превышение которых над дном со стороны Камчатки достигает 1200 м. Как правило, горы расположены внутри выделенных ранее сегментов [Авдейко, Палуева, 2008, 2010], а разделяющие сегменты разломы приурочены к седловинам (см. рис. 1).

На схематизированных сейсмоакустических разрезах вкрест Курило-Камчатского желоба [Селиверстов, 1998, рис. 7, разрезы 1-16] видно, что, наряду с основным хребтом-барьером, на каждом разрезе имеются еще одна-две тектонические террасы, располагающиеся между хребтом-барьером и глубоководным желобом. С тыловой части хребта-барьера, то есть со стороны Камчатки, отчетливо проявлены прогибы, выполненные осадками. На сейсмическом разрезе МОВ ОГТ ГТР-1, выполненном ПГО “Севморгеология”, отчетливо видно, что амплитуда превышения хребта-барьера над дном по акустическому фундаменту больше, чем по поверхности дна. Это, очевидно, связано с нивелированием рельефа за счет осадков после образования хребта-барьера. По взаиморасположению рельефа дна и рельефа акустического фундамента можно предположить, что хребет-барьер образован в результате взброса или надвига с падением плоскости сместителя на юго-восток, то есть в сторону, противоположную направлению поддвига Тихоокеанской плиты.

ПРОСТРАНСТВЕННО-СТРУКТУРНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ГИПОЦЕНТРОВ РОЕВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

За период детальных наблюдений до 2009 г. в Камчатской зоне субдукции зарегистрировано 20 роев землетрясений, пространственно приуроченных к хребту-барьеру (рис. 2, 3). Рассмотрим положение этих роев в направлении с юго-запада на северо-восток. На юго-западном окончании хребта Шатского наблюдалось четыре роя землетрясений и одно сильное землетрясение 1996 г., сопровождавшееся афтершоками (см. рис. 3). Рой апреля 1962 г. (17 землетрясений за 6 дней с $K_s = 9.2-12.3$) и рой января 1976 г. (104 землетрясения за 24 дня с $K_s = 9.0-13.4$) были приурочены к подводной горе 1, отмеченной на рис. 1 и 3, в Ходуткинском сегменте; рой февраля 1983 г. (50 землетрясений за 13 дней с $K_s = 9.0-12.8$) – к подводной горе 2 в Южно-Авачинском сегменте; а рой мая 1976 г. (16 землетрясений за 20 дней с $K_s = 9.2-11.6$) – к граничному разлому между Ходут-

кинским и Южно-Авачинским сегментами. Очаговая зона афтершоков сильного землетрясения, произошедшего в июне 1996 г. ($M = 7.3$, $M_w = 6.7$), охватила обе горы в Ходуткинском и Южно-Авачинском сегментах (см. рис. 3). “Облака” гипоцентров всех перечисленных роев и афтершоков землетрясения 1996 г. на поперечных сейсмических разрезах вкрест простирания Камчатской зоны субдукции наклонены на юго-восток, т. е. в противоположную относительно направления субдукции сторону (рис. 4в, д, ж). Несмотря на то, что точность определения глубины гипоцентров землетрясений оставляет желать лучшего, на всех разрезах виден наклон “облаков” гипоцентров, особенно заметный в пределах Охотской плиты.

На юго-восточном склоне подводной горы 4 в пределах Северо-Авачинского сегмента зарегистрировано 5 роев землетрясений, контуры очаговых зон которых примерно совпадают (см. рис. 3). Это рой декабря 1965 г. (всего 25 землетрясений, из них 23 за 6 дней с $K_s = 9.1-12.6$), рой января 1980 г. (157 землетрясений с $K_s = 9.0-13.7$, из них 81 землетрясение 23 января), рой августа 1994 г. (95 землетрясений за 22 дня), рой мая 2002 г. (36 землетрясений за 24 дня) и рой марта 2003 г. (105 землетрясений за 16 дней с $K_s = 9.0-13.3$). Интересно, что временной интервал между этими роями составляет около 15 лет, а слабый рой 2002 г. предшествовал мощному рою 2003 г. Северо-восточная граница этих роев совпадает с разломом на границе Северо-Авачинского и Южно-Шипунского сегментов. Так же, как и в роях землетрясений, приуроченных к Ходуткинскому и Южно-Авачинскому сегментам, в Северо-Авачинском сегменте “облака” роев наклонены на юго-восток (см. рис. 4г, е). Особенно отчетливо это проявлено по гипоцентрам роя землетрясений 1980 г., для которого на рис. 5 приведены два положения вращаемой по программе Maple 7 блок-диаграммы. Что касается гипоцентров, приуроченных к Тихоокеанской плите (см. рис. 4г, 5г), то, по-видимому, часть из них относится к подошве Охотской плиты и к плоскости непосредственного взаимодействия плит. Рой апреля 1975 г. (60 землетрясений за 26 дней, из них 51 землетрясение с $K_s = 9.0-13.7$ за первые 11 дней) также был приурочен к Северо-Авачинскому сегменту, располагаясь юго-западнее поля пяти роев и частично перекрывая его (см. рис. 3). “Облако” гипоцентров этого роя точно также отчетливо наклонено на юго-восток (см. рис. 4б).

Очаговая зона роя марта 1999 г. (58 землетрясений с $K_s = 9.0-14.3$) приурочена к разлому между Южно-Авачинским и Северо-Авачинским сегментами. Рой начался 8 марта с землетрясения с $K_s = 13.1$ и 42 землетрясения этого роя произошли 8 марта. Сильное землетрясение с $K_s = 14.3$, пятое землетрясение этого роя зарегистрировано в пределах Южно-Авачинского сегмента. Текто-

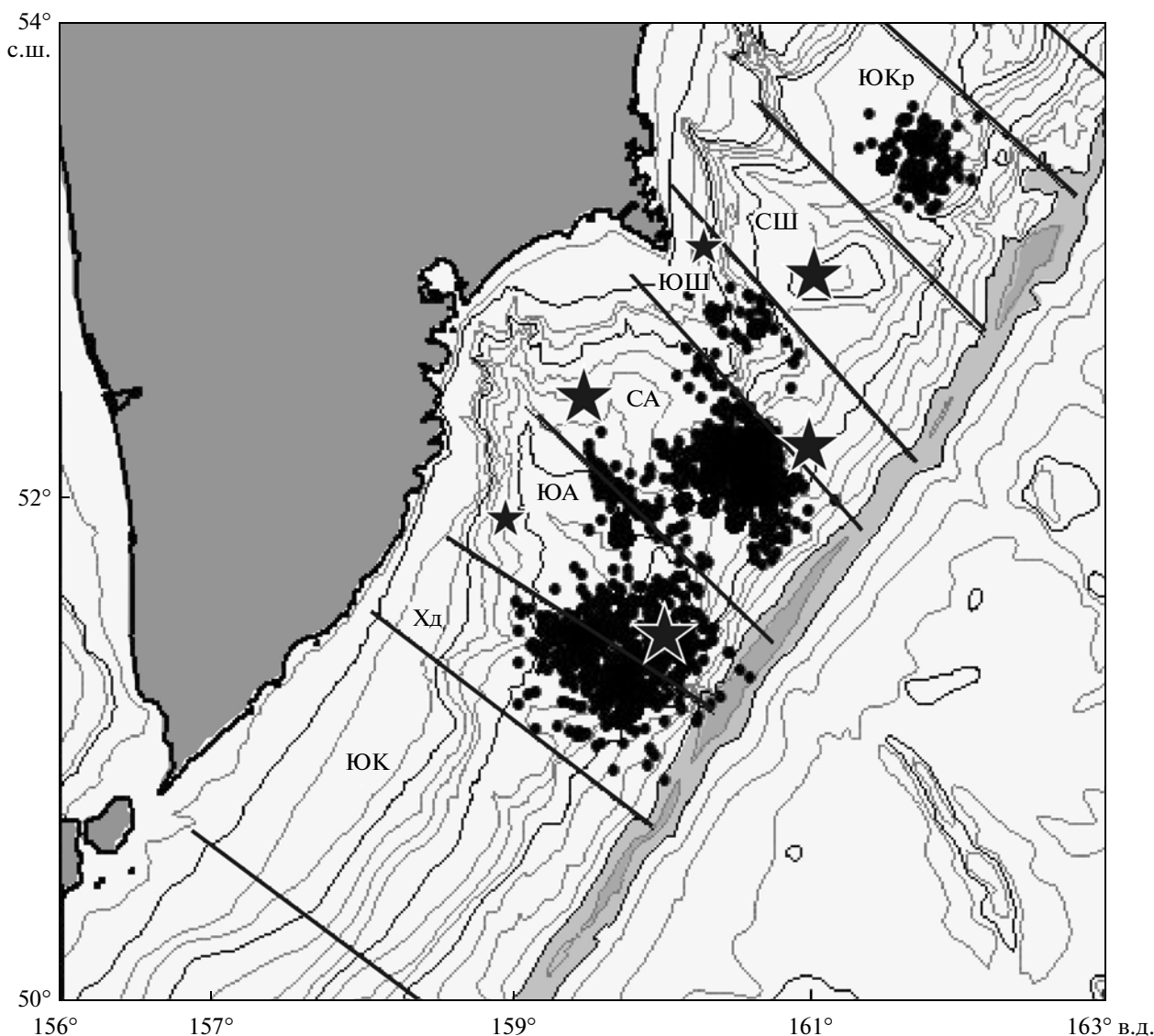


Рис. 2. Эпицентры роев землетрясений (точки), произошедших за период 1962–2003 гг. Положение землетрясений, генерирующих цунами (звездочки), соответствует рис. 1.

нические движения, сопровождаемые землетрясениями этого роя, вероятно, происходили не только по сдвиговой границе между сегментами, но и в пределах сегмента, о чем свидетельствует наклон “облака” гипоцентров землетрясений этого роя, такого же, как и у рассмотренных выше роев.

Слабый рой 1990 г. (40 землетрясений) проявился двумя этапами в пределах Южно-Шипунского сегмента. Первый этап из 29 землетрясений с $K_s = 9.0–12.5$ начался в сентябре, второй – 19 декабря с довольно сильного землетрясения с $K_s = 13.5$ и продолжался до 28 декабря. В этом рое намечалась лишь слабая тенденция наклона “облака” роя в юго-восточном направлении. Рой 5–31 октября 2001 г. был приурочен к границе между

Северо-Авачинским и Южно-Шипунским сегментами (117 землетрясений с $K_s = 9.0–12.2$).

Три роя землетрясений зарегистрированы в пределах Южно-Кроноцкого сегмента (см. рис. 3). Самый сильный из них произошел в июне 1973 г. (70 землетрясений за 13 дней, $K_s = 9.0–13.5$) двумя короткими этапами. Первый начался 11 июня землетрясением с $K_s = 13.1$ и продолжался 2 дня, второй начался 15 июня землетрясением с $K_s = 13.5$. Здесь также отмечен наклон “облака” гипоцентров роя в юго-восточном направлении (см. рис. 4а). Два других роя были сравнительно слабыми: рой марта 1986 г. (17 землетрясений за 8 дней, $K_s = 9.3–11.3$) и мая 1989 г. (14 землетрясений, из них 10 землетрясений 22 мая, $K_s = 9.3–11.6$).

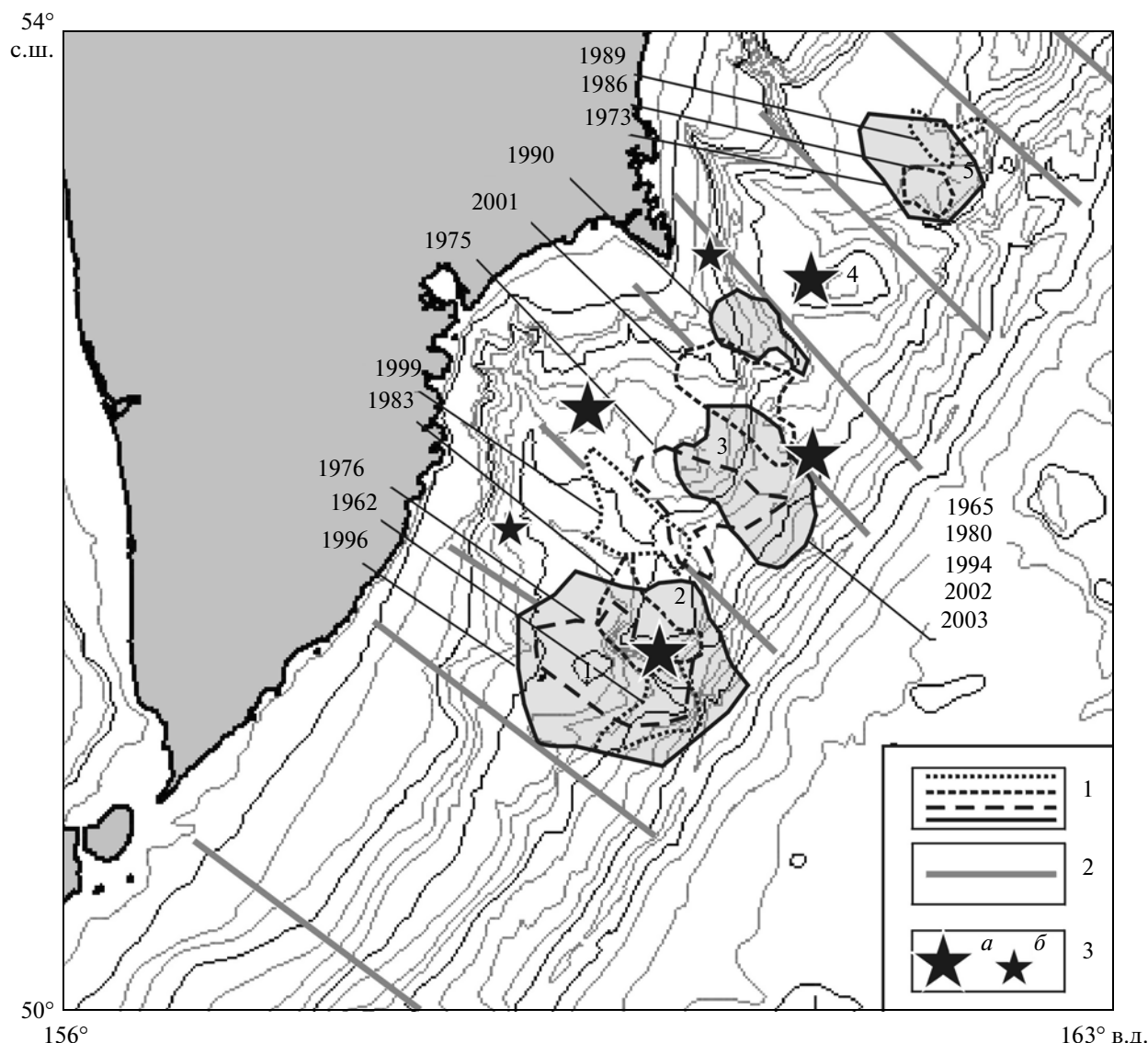


Рис. 3. Местоположение очаговых зон роев землетрясений и эпицентров цунамигенерирующих землетрясений. 1 – границы очаговых зон роев землетрясений, годы проявления роев указаны на карте; 2 – границы сейсмоактивных сегментов; 3 – эпицентры цунамигенерирующих землетрясений с подъемом воды: *a* – более 6 м, *б* – менее 6 м.

Итак, все рои землетрясений, зарегистрированные за период детальных инструментальных наблюдений, приурочены к хребту-барьеру между побережьем Камчатки и глубоководным желобом. Шестнадцать из них локализованы в пределах гор внутри сегментов, три приурочены к граничным разломам между сегментами и один – к поперечному хребту, отходящему от Шипунского полуострова (см. рис. 2 и 3). Практически для всех роев наблюдается тенденция наклона “облаков” гипоцентров землетрясений в сторону, противоположную движению Тихоокеанской плиты. Положение и наклон “облаков” роев землетрясений соответствует взбросо-надвиговым разломам на консолидированном выступе надвигаемой (нави-

сающей) плиты, которые подтверждены физическим моделированием [Лобковский и др., 1980]. На приводимой блок-диаграмме (см. рис. 4з) показаны как взбросо-надвиги в надвигаемой плите, так и сдвиги между сегментами, и плоскость взаимодействия между литосферными плитами.

ПРОСТРАНСТВЕННО-СТРУКТУРНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, СОПРОВОЖДАЕМЫХ ЦУНАМИ

Несмотря на низкую точность определения координат эпицентров землетрясений, приуроченность цунамигенерирующих землетрясений к хребту-барьеру и к фронтальной тектонической

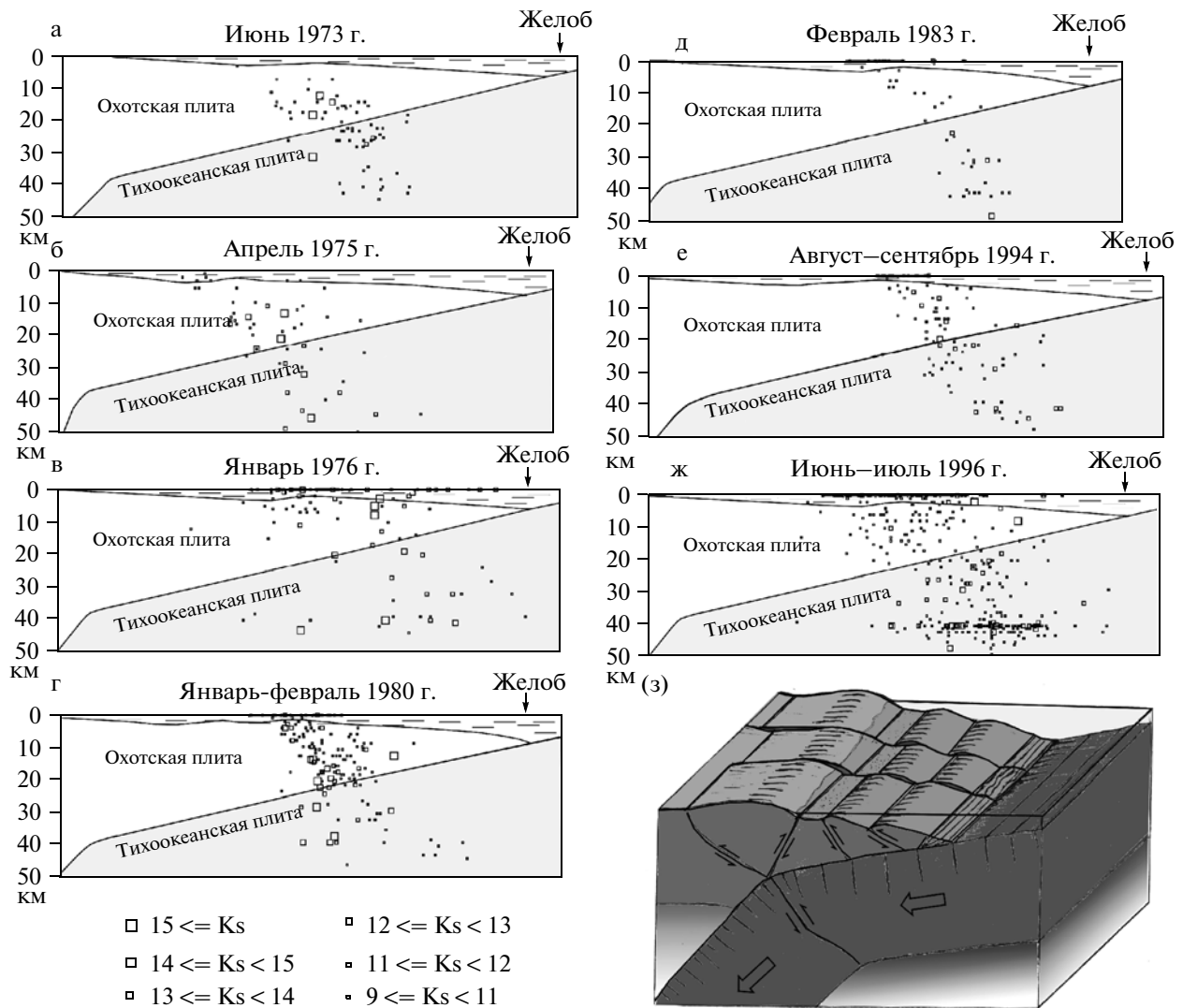


Рис. 4. Сейсмические разрезы некоторых роев землетрясений вкrest простираения Камчатской зоны субдукции (а–ж) и принципиальная блок-диаграмма разломов (з) в зоне субдукции. Разломы по Л.И. Лобковскому [1988].

дуге над зоной резкого изгиба Тихоокеанской плиты (см. рис. 1), вероятно, соответствует действительности, так как эти данные получены по разности скоростей продольных и поперечных сейсмических волн. Вряд ли случайна приуроченность эпицентров цунамигенерирующих землетрясений к подводным горам на хребте-барьере или вблизи их (см. рис. 1) и к очаговым зонам роев землетрясений (см. рис. 3). Так, эпицентр землетрясения 1737 г. ($M = 8.3$, $M_w = 9.2$, максимальная высота подъема воды 30 м) в соответствии с координатами [Каталог цунами ..., 1987] располагался внутри очаговых зон пяти роев землетрясений, приуроченных к подводным горам Ходуткинского и Южно-Авачинского сегментов. Координаты этого землетрясения по [Новый каталог ..., 1977] соответствуют положению во фронтальной тектонической дуге. Эпицентр самого разруши-

тельного цунамигенерирующего землетрясения 1952 г. ($M = 8.5$, $M_w = 9.0$, подъем воды 10–15 м.) располагался в юго-восточной части очаговых зон семи роев Северо-Авачинского сегмента. В 1923 г. было два землетрясения, которые сопровождалось цунами. Эпицентр цунамигенерирующего землетрясения, произошедшего 4 февраля 1923 г. ($M = 8.5$, $M_w = 8.5$, подъем воды 6–8 м.) был приурочен к подводной горе Северо-Шипунского сегмента. В настоящее время эта гора является практически асейсмичной и, вероятно, здесь идет накопление сейсмической энергии для следующего, возможно, цунамигенерирующего землетрясения. Землетрясение, произошедшее в апреле 1923 г. ($M = 7.3$, $M_w = 8.2$, подъем воды 20–30 м.) в Камчатском заливе было заметно слабее землетрясения февраля 1923 г., но по интенсивности цунами и его разрушительной силе значительно его

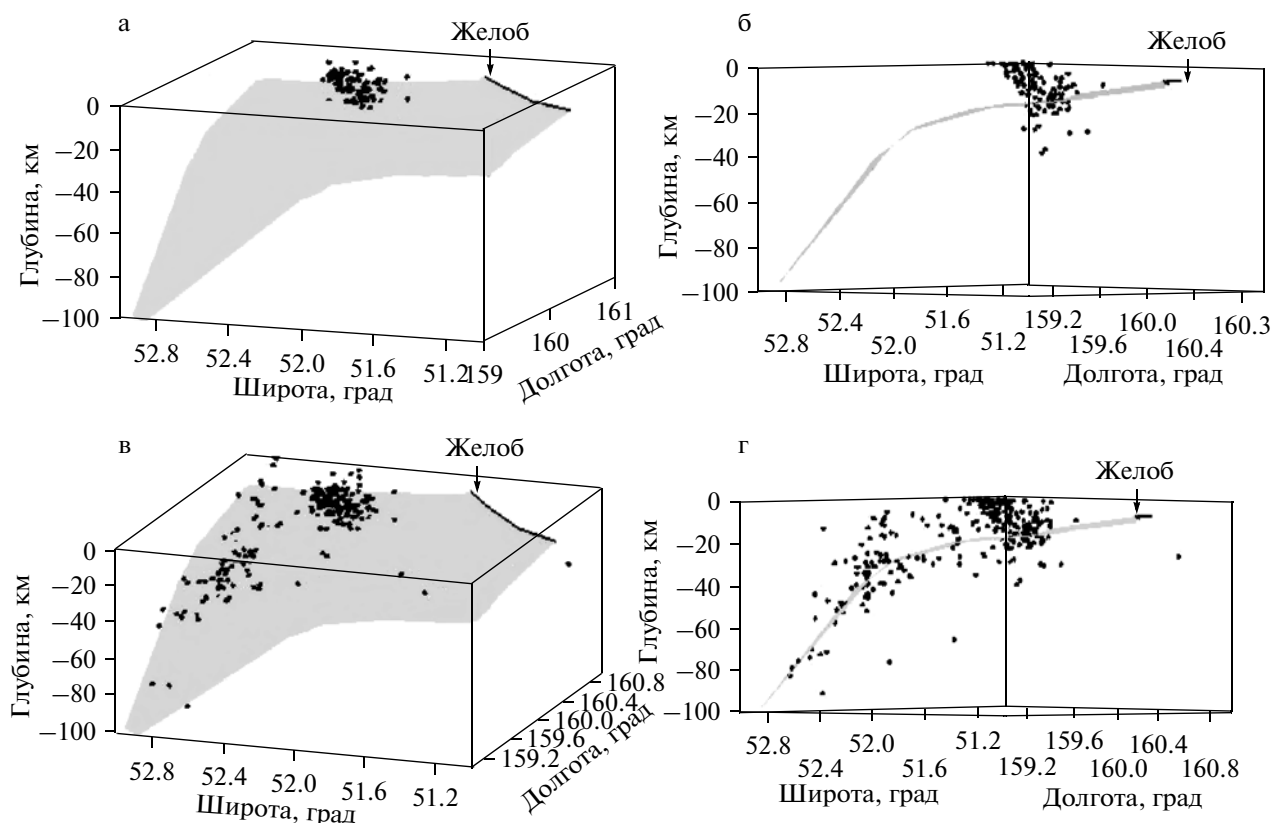


Рис. 5. Местоположения гипоцентров роя землетрясений, произошедших в январе–феврале 1980 г. (а, б) и землетрясений за весь 1980 г. (в, г) в 3-мерном вращаемом объеме по программе Maple 7.

Положения а и в соответствуют оксонометрической проекции, а положения б и г – сейсмическому разрезу вкостростирирования субдукционной системы. Серым цветом выделена реконструированная поверхность поддвигаемой Тихоокеанской плиты.

превосходило. По сообщению А.А. Трошина и Г.А. Дягилева [Святловский, 1957] этому землетрясению предшествовал рой землетрясений, который прекратился в первых числах апреля.

Особый интерес представляет подводный хребет в пределах Южно-Кроноцкого сегмента, где в течение короткого временного интервала, в 1790 и 1792 гг. было зарегистрировано два сильных землетрясения ($M = 7.5$ и 8.4 , соответственно). Второе, более сильное, землетрясение сопровождалось цунами. Участок, в котором располагались эти землетрясения, представлял собой зону сейсмического “молчания” внутри очаговой зоны Кроноцкого землетрясения 1997 г. По-видимому, этот участок характеризуется очень сильным сейсмическим сцеплением между взаимодействующими плитами и/или в плоскости взбросо-надвига, за счет чего “спусковой крючок” землетрясения 1997 г. не сработал [Авдейко, Палуева, 2010]. Видимо, в Северо-Кроноцком сегменте в результате землетрясения 1997 г. произошла неполная разрядка сейсмической энергии и здесь, так же как и в Северо-Шипунском сегменте идет накопление сейсмической энергии.

Представляется вероятным, что и рой землетрясений и, по крайней мере, некоторые землетрясения, сопровождаемые цунами, обусловлены тектоническими подвижками по плоскостям взбросо-надвигов, в соответствии со второй плоскостью разрывов механизмов очагов землетрясений [Балакина, 1979] и с результатами физического моделирования [Лобковский и др., 1980]. Они соответствуют смешанному типу подвижек по Л.И. Лобковскому [1988]. По предложенной модели [Авдейко и др., 2007; Авдейко, Палуева, 2011], формирование взбросов и взбросо-надвиговых блоков обусловлено сильным сейсмическим сцеплением между поддвигаемой Тихоокеанской и надвигаемой (нависающей) Охотской литосферными плитами. В рельефе дна взбросо-надвиговые блоки проявлены в виде хребтов-барьеров и подводных гор на этих хребтах. При срыве сильного сейсмического сцепления между Тихоокеанской и Охотской плитами, либо в пределах Охотской плиты происходит резкое движение надвигового блока с изменением рельефа дна и, соответственно, формированием цунами. При слабом сцеплении блоков с уже сформированными разрывами в надвиго-

вых блоках происходят более частые слабые подвижки, сопровождаемые роями землетрясений.

Эпицентры некоторых землетрясений, сопровождаемых цунами, приурочены также к фронтальной тектонической дуге над зоной изгиба Тихоокеанской плиты (см. рис. 4з). Наиболее сильное из них – землетрясение 1841 г. ($M = 8.4$, $M_w = 9.0$) сопровождалось цунами с подъемом воды до 15 м. Землетрясения 1904 г. ($M = 7.7$, $M_w = 7.5$) и 1959 г. ($M = 7.6$, $M_w = 8.0$) сопровождалось цунами меньшей интенсивности. Подвижки, связанные с этими землетрясениями, видимо, соответствуют “поршневому” типу Л.И. Лобковского [1988].

СЦЕНАРИЙ ГЕНЕРАЦИИ ВОЛН ЦУНАМИ

Вероятный сценарий проявления роев землетрясений и возможной их связи цунамигенерирующими землетрясениями рассмотрен, исходя из данных об их пространственно-структурном положении, и на основе модели формирования сегментации и взбросо-надвиговых блоков [Авдейко и др., 2008, 2011]. По этой модели и сегментация литосферного клинообразного выступа Охотской плиты, и формирование взбросо-надвиговых блоков в пределах сегментов происходит в результате неравномерного сейсмического сцепления между поддвигаемой Тихоокеанской плитой и нависающим литосферным выступом Охотской плиты. Слабое сейсмическое сцепление, по-видимому, наблюдается тогда, когда поверхность подвигаемой плиты покрыта мощным слоем осадков, которые являются своеобразной смазкой [Лобковский, Сорохтин, 1979]. В этом случае разрядка сейсмической энергии происходит за счет слабых землетрясений, а сильные землетрясения наблюдаются в зоне изгиба Тихоокеанской плиты и в Охотской плите над зоной изгиба Тихоокеанской плиты. Примером такого участка может служить Южно-Камчатский сегмент [Авдейко, Палуева, 2010].

Сильное сейсмическое сцепление, вероятно, наблюдается тогда, когда поверхность подвигаемой плиты сложена плотными породами и имеет расчлененный рельеф за счет подводных гор, разломов и др. Рассмотрим возможный сценарий сейсмических событий при сильном сцеплении между взаимодействующими плитами на модельных разрезах (рис. 6). На разрезе 6а показано положение, при котором поверхность субдуцируемой Тихоокеанской плиты в плоскости ее взаимодействия с литосферным выступом Охотской плиты покрыта осадками. Разломы в зоне изгиба Тихоокеанской плиты показаны по Л.И. Лобковскому [1988]. На рис. 6б видно, что участок расчлененного рельефа Тихоокеанской плиты начал поддвигаться под Охотскую плиту. Консолидированный край литосферного выступа Охотской

плиты испытывает упругую деформацию и отодвигается в направлении движения Тихоокеанской плиты.

При достаточно сильном сцеплении между подвигаемой и нависающей плитами упругая деформация литосферного выступа нависающей плиты за счет непрерывного движения подвигаемой плиты нарастает. Может возникнуть ситуация, при которой предел упругости сравнительно тонкого литосферного выступа будет достигнут, возникнет хрупкое дробление и формирование взброса или надвига (см. рис. 6в), что соответствует результатам физического моделирования [Лобковский и др., 1980], второму решению механизма очагов землетрясений в зоне субдукции [Балакина, 1979] и “облакам” роев землетрясений на сейсмических разрезах, приводимых на рис. 4. Следствием этого может явиться резкое изменение рельефа дна океана и генерация волн цунами. По уже сформировавшемуся разлому сейсмическое сцепление будет значительно слабее, чем при наличии формирования взброса-надвига и подвижки по нему будет сопровождаться роями землетрясений значительно меньшей магнитуды без резкого изменения рельефа дна (см. рис. 6г). Этим объясняется повторение роев землетрясений в одних и тех же местах и приуроченность их к подводным горам, которые представляют собой верхнюю часть взбросо-надвиговых блоков.

Продолжающийся при этом подъем надвигового блока может привести к тому, что его масса станет достаточной для того, чтобы при очередном землетрясении в зоне поддвига и/или в зоне взбросо-надвига произошел его сброс и откат в противоположном субдукции направлении (см. рис. 6д). Вероятность этого становится выше, когда участок сильного сцепления между подвигаемой литосферной плитой и литосферным выступом нависающей плиты продвинется дальше и сейсмическое сцепление в подошве взбросо-надвигового блока становится слабее, как это показано на разрезе 6д. Такой откат также может сопровождаться резким изменением (понижением) рельефа дна океана и, соответственно, образованием волн цунами. Он соответствует типу “упругой отдачи” по Л.И. Лобковскому [1988].

Дальнейшее продвижение участка сильного сцепления, по-видимому, может привести к формированию второго взбросо-надвига (см. рис. 6е) аналогично сценарию формирования первого взбросо-надвигового блока.

Несомненно, сильные землетрясения могут вызвать движения в соседних надвиговых блоках как в пределах одного сегмента, так и в соседних сегментах и вызвать цунами большей интенсивности. Образование волн цунами только при движении по основной плоскости субдукции в поло-

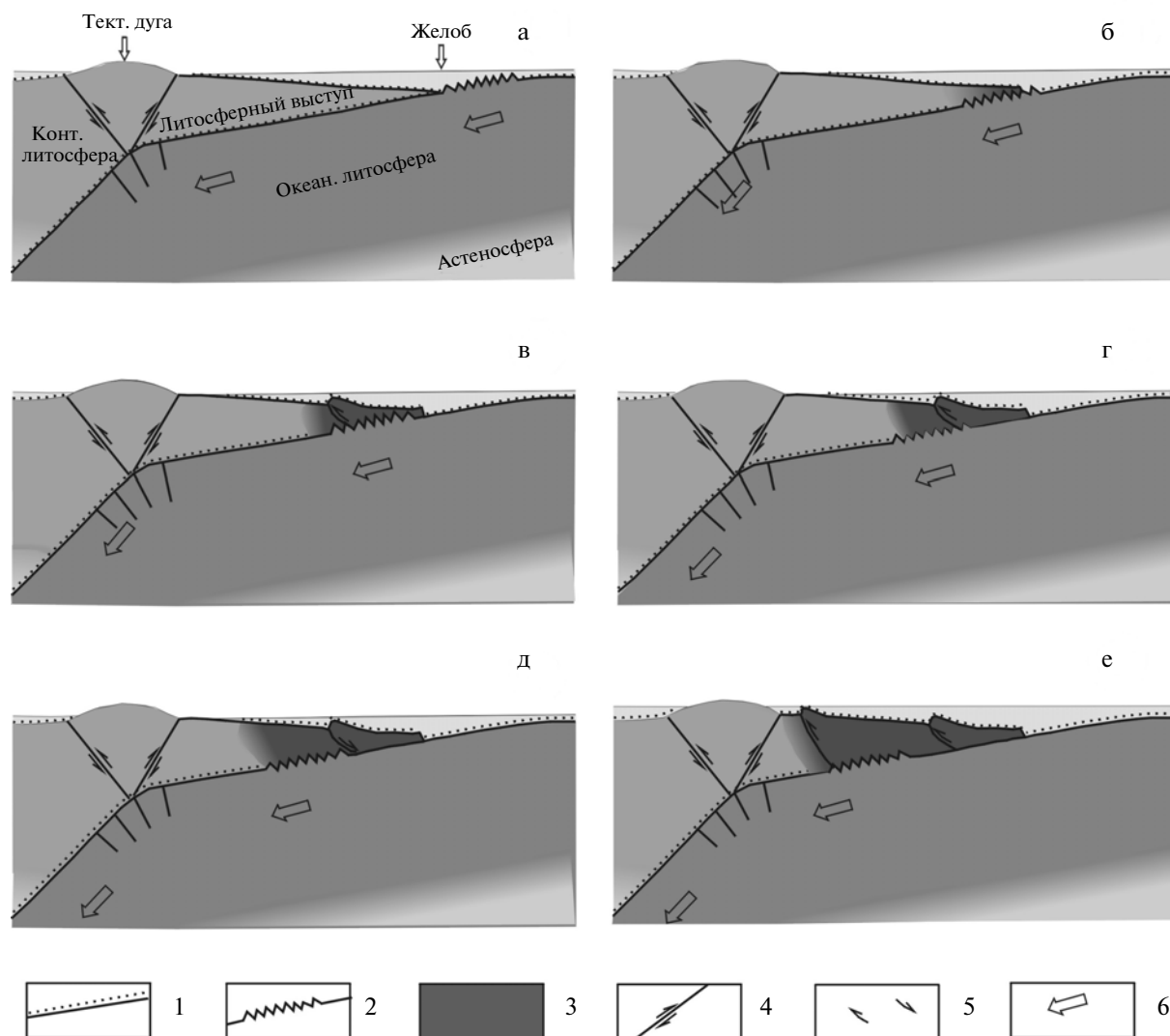


Рис. 6. Концептуальная модель формирования надвиговых блоков и движений по ним, сопровождаемых роевыми и цунамигенерирующими землетрясениями.

1 – осадки на поверхностях субдуцируемой и надвигаемой (нависающей) плит; 2 – участки расчлененного рельефа (сильного сейсмического сцепления) на поверхности субдуцируемой плиты; 3 – участки, подвергающиеся повышенной упругой деформации в литосферном выступе нависающей плиты; 4 – разломы и направления движения по ним; 5 – направления подвижек взбросо-надвиговых блоков; 6 – направление движения субдуцируемой плиты.

се между глубоководным желобом и фронтальной тектонической дугой даже при сильном землетрясении, по нашему мнению, менее вероятно, так как при этом не происходит резкое изменение рельефа дна. Рассмотренный сценарий формирования взбросо-надвиговых блоков в зоне поддвига, сопровождаемого цунамигенерирующими землетрясениями и роями землетрясений, хотя и базируется на фактическом материале, является концептуальным и нуждается в количественной оценке. Здесь мы не рассматриваем механизм проявления землетрясений, сопровождаемых цунами в зоне резкого изгиба Тихоокеанской плиты

и взбросов над ней, то есть в пределах фронтальной тектонической дуги, так как для этого нет достаточных данных. Если приводимые в работе [Каталог цунами ..., 1987] координаты верны, то такому положению соответствуют упоминавшиеся ранее землетрясения 1841, 1904 и 1959 гг. (см. рис. 1), которые сопровождались цунами разной интенсивности. Судя по инструментальному эпицентру, такому тектоническому положению, вероятно, соответствует цунамигенерирующее землетрясение, произошедшее в ноябре 2006 г. на центральных Курилах [Пинегина и др., 2006]. Об опасности проявления здесь цунамигенерирующей

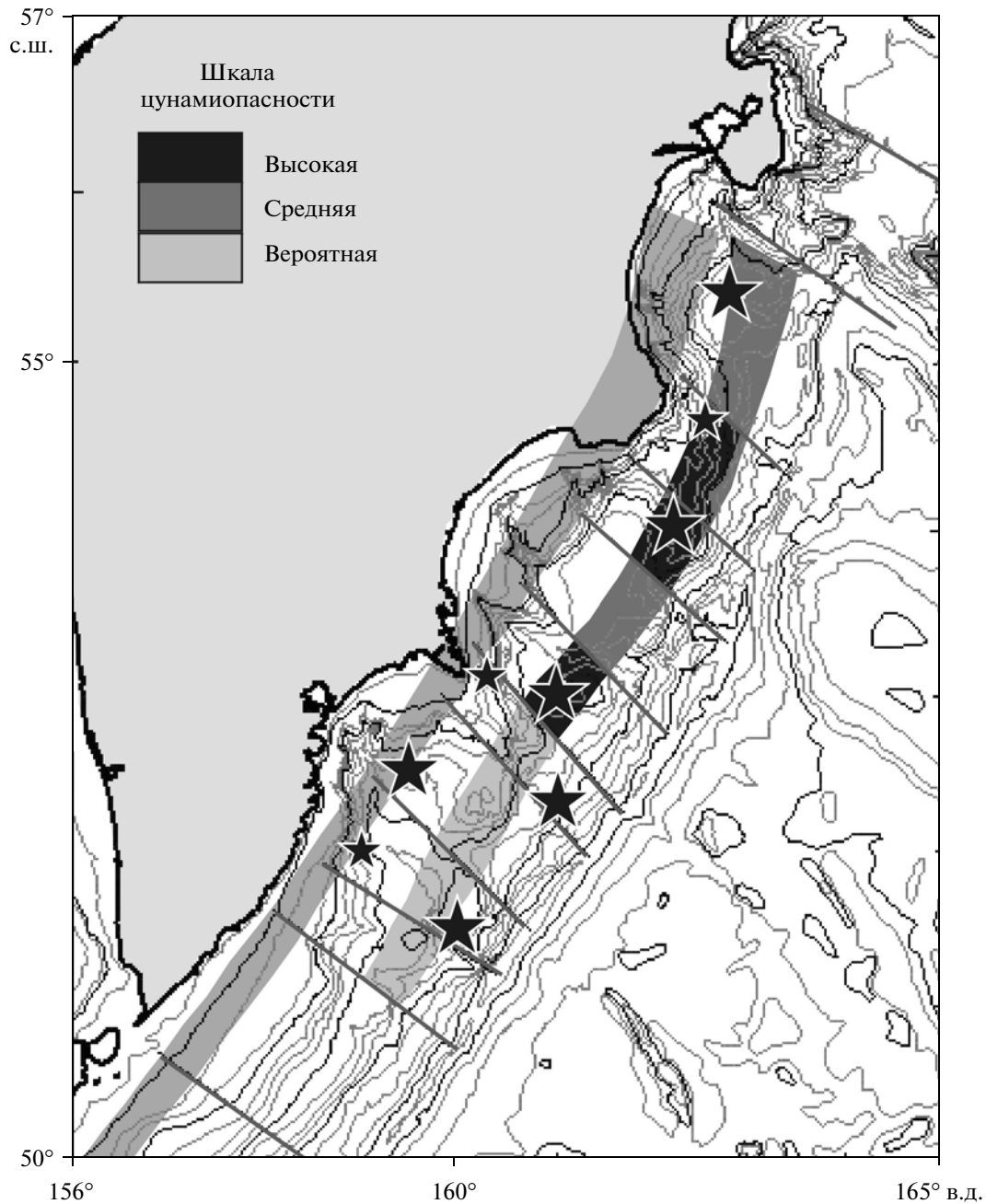


Рис. 7. Схематическая карта мест возможного зарождения цунами разной вероятности. Произошедшие землетрясения, генерирующие цунами, соответствуют показанным на рис. 1.

шего землетрясения было высказано предположение на основании проведенных здесь морских геофизических исследований [Лаверов и др., 2006]. Такому тектоническому положению, по-видимому, соответствуют места зарождения катастрофических цунами в Алеутской дуге в 1964 г. [Plafker, 1965] и в дуге Сунда в 2004 г. [Fisher et al., 2007].

ОЦЕНКА МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ЗАРОЖДЕНИЯ ЦУНАМИ

Рассмотренные данные о местоположении землетрясений, генерирующих цунами, и роев землетрясений позволили дать предварительную оценку мест возможного зарождения цунами (рис. 7). Хребет-барьер на всем своем протяжении представляет опасность зарождения цунами.

Наибольшую опасность, по-видимому, представляет подводная гора, где располагался эпицентр цунамигенерирующего землетрясения 1923 г., и зона “сейсмического молчания”, практически не затронутая афтершоками Кроноцкого землетрясения 1997 г. Результаты проведенного ретроспективного анализа сейсмичности по сегментам [Авдейко, Палуева, 2010] показали, что после цунамигенерирующего землетрясения Северо-Шипунский сегмент с подводной горой 4 (см. рис. 1 и 3) представляет собой сейсмическую брешь. За период детальных наблюдений с 1962 г. подводная гора являлась практически асейсмичной, а слабые землетрясения происходили лишь в зоне изгиба Тихоокеанской плиты, то есть в пределах фронтальной тектонической дуги.

Средний участок Центрально-Кроноцкого сегмента, соответствующий второму надвиговому блоку, в период проявления афтершоков землетрясений 1997 г. остался практически асейсмичным [Авдейко, Палуева, 2010]. Он располагается в пределах подводного хребта-барьера и здесь, если верить приведенным в каталогах координатам, в 1792 г. произошло сильное землетрясение ($M = 8.4$, $M_w = 8.8$), сопровождавшееся цунами. Вероятно, это участок сильного сейсмического сцепления, представляющий опасность сильно, возможно, цунамигенерирующего, землетрясения, и здесь произошла неполная разрядка сейсмической энергии после землетрясения 1997 г.

Второй полосой мест возможного зарождения цунами в Камчатской зоне субдукции является тектоническая дуга, где произошло три землетрясения, сопровождавшиеся цунами, механизм которых, как было сказано выше, соответствует движениям “поршневого типа” [Лобковский, 1988].

О времени проявления сильных землетрясений в рассмотренных местах вероятной генерации цунами трудно сказать что-либо определенное, так как период инструментальных наблюдений для этого недостаточен. Последнее катастрофическое цунами было в 1952 г., а такие события, по данным изучения палеоцунами, проявляются один раз в 250–300 лет [Пинегина, Буржуа, 2009].

ВЫВОДЫ И ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

1. Рои землетрясений и эпицентры большинства землетрясений, генерирующих цунами в Камчатской зоне субдукции, приурочены к одним и тем же морфоструктурным поднятиям на континентальном склоне Восточной Камчатки, которые, по-видимому, представляют собой взбросо-надвиговые блоки на консолидированном литосферном выступе Охотской плиты.

2. Наиболее сильные подвижки и, соответственно, сильные цунами, вероятно, происходят

за счет сильного сейсмического сцепления между субдуцируемой Тихоокеанской и надвигаемой Охотской литосферными плитами в начальный этап (этапы) формирования взбросового разрыва. Подвижки по уже сформированному разрыву при относительно слабом сейсмическом сцеплении могут сопровождаться роями землетрясений.

3. Генерация цунами может происходить как при взбросовых подвижках, так и при сбросовом откате взбросо-надвигового блока, представляющего собой во время отката подвижный оползень [Лобковский, 1988].

4. Вся полоса хребта-барьера и зона фронтальной тектонической дуги представляет собой опасность образования цунами при сильных землетрясениях. В настоящее время наибольшую цунамиопасность представляет подводная гора к востоку от Шипунского полуострова, где в 1923 г. произошло цунамигенерирующее землетрясение (сейсмическая брешь), а также участок “сейсмического молчания” в очаговой зоне Кроноцкого землетрясения 1997 г.

5. Проведенный анализ пространственно-тектонического положения роевых и цунамигенерирующих землетрясений показал, что важное значение для прогноза мест зарождения цунами имеет рельеф дна. Наличие расчлененного подводного рельефа между осью желоба и восточным побережьем Камчатки может служить показателем возможного зарождения здесь цунами при сильных землетрясениях. Относительное превышение подводных поднятий и гор, вероятно, может служить показателем энергии готовящегося землетрясения.

Авторы признательны сотрудникам Камчатского филиала ГС РАН за предоставление качественных материалов по сейсмичности Камчатской зоны субдукции, Т.К. Пинегиной и А.В. Ландеру за предварительное обсуждение рукописи статьи и критические замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов ДВО № ДВО–09–Ш–А–08–419 и РФФИ – 09–05–98591–р_восток_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдейко Г.П., Палуева А.А. Сейсмотектоническое районирование: сейсмоопасность и цунамиопасность на Камчатке // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности на Дальнем Востоке России // Труды региональной научно-технической конференции 11–17 ноября 2007 г. Т. 2. Петропавловск-Камчатский, 2008. С. 9–13.

Авдейко Г.П., Палуева А.А. Сейсмотектоническое районирование и геодинамика Камчатской зоны субдукции // Вулканология и сейсмология. 2011. № 1. С. 3–18.

Авдейко Г.П., Палуева А.А. Сегментация Камчатской зоны субдукции и оценка сейсмической активности

- сегментов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 1 (15). С. 231–251.
- Алексеев А.С., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б. и др.* Численное исследование генерации и распространения цунами при реальной топографии дна. Линейная модель // Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С. 4–17.
- Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева Н.А. и др.* Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. 210 с.
- Балакина Л.М.* Ориентация разрывов и подвижек в очагах сильных землетрясений северной и северо-западной части Тихого океана // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 4. С. 43–52.
- Баранов Б.В., Лобковский Л.И.* О местоположении и механизме цунамигенных землетрясений Курильской островной дуги // Докл. АН СССР. 1981. Т. 261. № 3. С. 575–579.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34–42.
- Каталог цунами на Камчатке / Под ред. Заикина Ю.А., Лучининой А.А. Обнинск: Изд-во ВНИИГМИ-МЦД, 1987. 50 с.
- Лаверов Н.П., Лапто С.С., Лобковский Л.И. и др.* Центральное-Курильская “брешь”: строение и сейсмический потенциал // ДАН. 2006. Т. 408. № 6. С. 818–821.
- Лобковский Л.И.* Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 251 с.
- Лобковский Л.И., Баранов Б.В.* Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // Докл. АН СССР. 1984. Т. 275. № 4. С. 7–17.
- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 612 с.
- Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г.* Затыгивание океанических осадков в зоны поддвига плит // Геофизика океана. Т. 2. Геодинамика. М.: Наука, 1979. С. 211–216.
- Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г., Шеменда А.И.* Моделирование деформаций островных дуг, приводящих к образованию тектонических террас и возникновению цунамигенных землетрясений // Докл. АН СССР. 1980. Т. 255. № 1. С. 74–77.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древних времен до 1975 г. / Отв. ред. Кондорская Н.В., Шабалин Н.В. М.: Наука, 1977. 536 с.
- Пинегина Т.К.* Цунами на тихоокеанском побережье Камчатки за последние 7000 лет: диагностика, датировка, частота // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 330–341.
- Пинегина Т.К., Буржуа Дж.* Основные результаты изучения палеоцунами на Камчатке, Северных и Центральных Курилах // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России / Тезисы докладов. II региональная научно-техническая конференция. 11–17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский, 2009. С. 139.
- Пинегина Т.К., Буржуа Дж., Разжигаетова Н.Г. и др.* Цунами 15 ноября 2006 г. на Центральных Курильских островах и повторяемость подобных событий в прошлом (по палеосейсмологическим данным) // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности на Дальнем Востоке России // Труды региональной научно-технической конференции 11–17 ноября 2007 г. Т. 1. Петропавловск-Камчатский, 2008. С. 200–209.
- Саваренский Е.Ф., Тищенко В.Г., Святловский А.Е. и др.* Цунами 4–5 ноября 1952 г. // Бюллетень Совета по сейсмологии. 1958. № 4. С. 3–61.
- Святловский А.Е.* Цунами. Разрушительные волны, возникающие при подводных землетрясениях в морях и океанах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 55 с.
- Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.
- Селиверстов Н.И.* Структура сейсмофокальной зоны Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1 (9). С. 10–26. (http://www.kscnet.ru/kraesc/2007/2007_9/art10.pdf)
- Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2009. 191 с.
- Соловьев С.Л., Шабалин Н.В.* Цунами и интенсивность Курило-Камчатских землетрясений // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1959. № 8. С. 1195–1199.
- Федотов С.А.* Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. 1965. № 36. С. 66–93.
- Федотов С.А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмологическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышова Г.В., Шумилина Л.С.* Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 83–90.
- Fisher D., Mosher D., Austin J.A. Jr. et al.* Active deformation across the Sumatran forearc over the December 2004, M_w 9.2 rupture // Geology. 2007. V. 35. P. 99–102.
- Isacks B.L., Molnar P.H.* Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal mechanism solution of mantle earthquakes // Rev. Geoph. Space Phys. 1971. V. 9. P. 103–174.
- Isacks B.L., Oliver J., Sykes L.R.* Seismology and new global tectonics // J. Geoph. Res. 1968. V. 73. P. 5855–5899.
- Nishenko S., McCann W.* Large thrust earthquakes and tsunamis: implications for the development of forearc basin // J. Geoph. Res. 1979. V. 84. N 2. P. 573–584.
- Plafker G.* Tectonic deformation associated with the 1964 Alaska earthquake // Science. 1965. V. 148. P. 1675–1687.

Earthquake Swarms in the Kamchatka Subduction Zone and Estimation of Possible Tsunami Generation Locations

G. P. Avdeiko and A. A. Palueva

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

e-mail: gavdeiko@kscnet.ru

Abstract—An analysis of the space–time locations of earthquake swarms in the Kamchatka subduction zone showed that the source zones of these earthquake swarms, as well as of the epicenters of most tsunami-generating earthquakes, are confined to the seamounts in the barrier ridge between Kamchatka and the deep-sea trench. The “dot clouds” of hypocenters of practically all earthquake swarms dip toward the trench on seismic sections that are oriented across the subduction zone trend; this fits the auxiliary focal solution of tsunami-generating earthquakes as was first noticed by L.M. Balakina and is in agreement with the model experiment carried out by L.I. Lobkovskii et al.. We discuss a likely scenario for the generation of reverse–thrust blocks whose movements are accompanied by earthquake swarms and by tsunami-generating earthquakes. We estimate the locations of the most probable tsunami generation.