

УДК 550.34:551.242

## ОЛЮТОРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 2006 г. КАК РЕЗУЛЬТАТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ В КОРЯКСКО-КАМЧАТСКОМ РЕГИОНЕ

©2006 Г. П. Авдейко<sup>1,2</sup>, А. А. Палуева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;

<sup>2</sup>Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, 683032;

e-mail: gavdeiko@kscnet.ru

На основании анализа локализации сильных землетрясений, произошедших в Корякском автономном округе севернее Алеутско-Камчатского сочленения, и анализа тектонической истории Корякско-Камчатского региона в позднем кайнозое рассмотрены возможные причины Олюторского землетрясения 2006 г. Показано, что очаг этого землетрясения приурочен к зоне субдукции миоценового возраста. Непосредственными причинами могут быть остаточные напряжения сжатия миоценовой зоны субдукции, напряжения восстановления нарушенного субдукцией изостатического равновесия, а также напряжения, связанные с перестройкой мантийных течений, которые, в свою очередь, обусловлены взаимодействием Тихоокеанской и Северо-Американской литосферных плит.

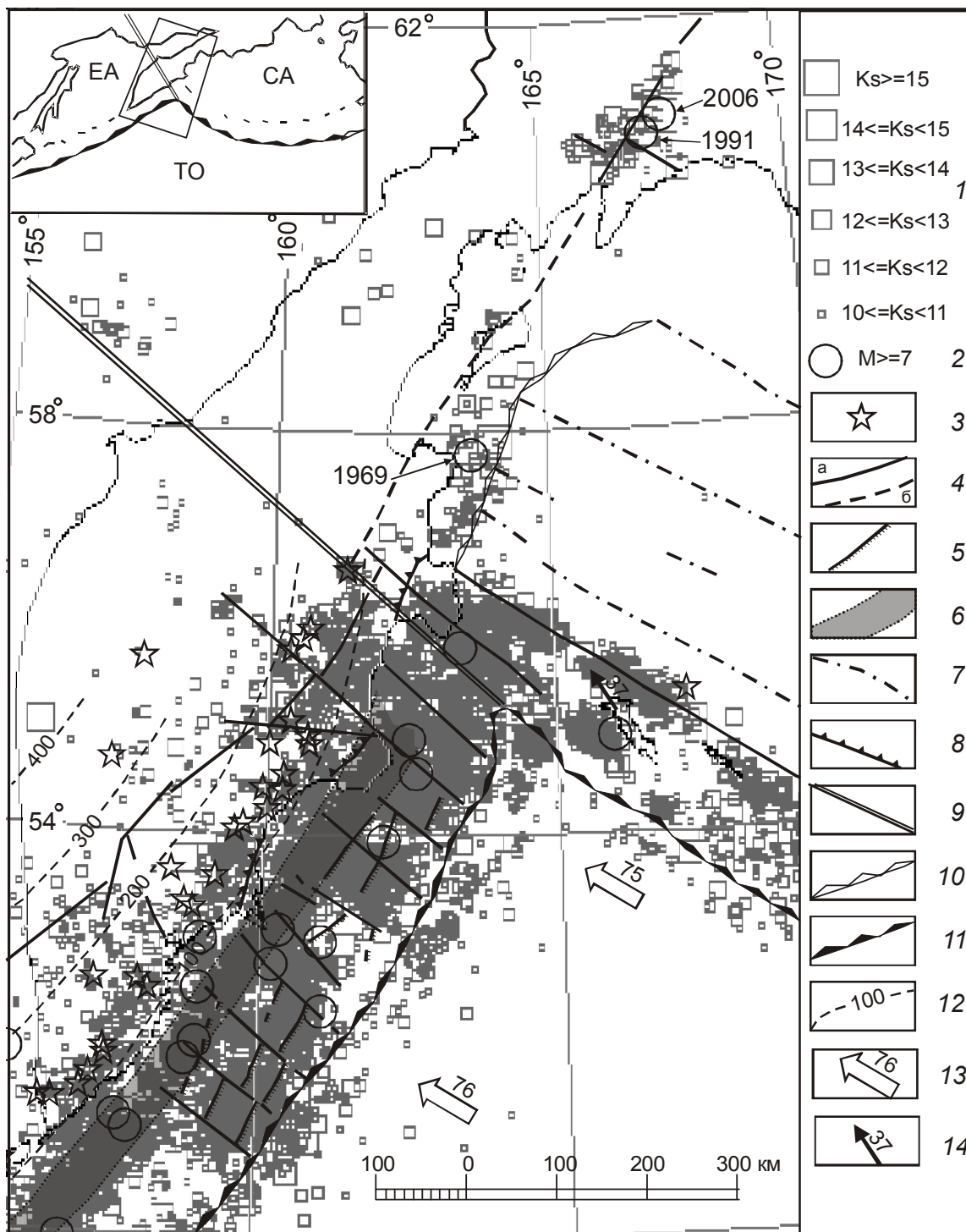
### ВВЕДЕНИЕ

Два сильных землетрясения, произошедшие в Олюторском районе Корякского автономного округа - Хаилинское в 1991 (M=7.0<sup>1</sup>) и Олюторское в 2006 (M=7.6) годах, являются необычными в связи с тем, что они не связаны непосредственно с современной зоной субдукции и удалены от северо-восточного края погружающейся под Камчатку Тихоокеанской плиты на расстояние около 600 км. Кроме того, на удалении около 180 км от этого же края Тихоокеанской плиты в 1969 г. произошло сильное Озерновское землетрясение, которое также не обнаруживает прямой связи с современной зоной субдукции (рис. 1). А.В. Ландер с соавторами (1993), анализируя геотектоническую позицию Хаилинского 1991 г. землетрясения, рассматривают его как следствие движений на северо-восточной границе литосферной плиты Берингия. Помимо этого в статье рассмотрены аргументы за и против трех альтернативных гипотез проявления сейсмичности в этом регионе, а именно: (1) «сейсмичность <...> является реликтом затухающего кайнозойского процесса субдукции <...> под Северную Камчатку»; (2)

«сейсмичность юга Корякского нагорья – остаточные явления раскрытия Командорской котловины»; (3) «развитие Центрально-Камчатской депрессии» (Ландер и др., 1993, с.78). Авторы отмечают, что в районе проявления Хаилинского землетрясения преобладают взбросовые подвижки, а на северо-востоке от него – подвижки, соответствующие правостороннему сдвигу. Взбросовые подвижки с правосторонней сдвиговой компонентой характерны для Олюторского землетрясения (Пинегина, Константинова, 2006).

Территория, расположенная севернее Алеутско-Камчатского сочленения, т.е. севернее границы погружающейся Тихоокеанской плиты, является сейсмоактивной, однако сейсмическая активность ее значительно слабее, чем к югу от этой границы (рис. 1). Землетрясения этой территории, на наш взгляд, более правильно связывать с существовавшей в миоцене и в настоящее время прекратившей свое существование зоной субдукции (Исаев и др., 1972; Трубицын и др., 1998; Федоров, Шапиро, 1998; Авдейко и др., 2001). Геодинамические напряжения и тектонические движения по этой зоне, по-видимому, не прекратились и в настоящее время. Озерновское землетрясение 1969 г. произошло на юге этой зоны, а оба землетрясения Олюторского района – на ее северном окончании. Олюторское землетрясение 2006 г. и появившиеся новые данные по

<sup>1</sup> Данные о магнитуде помещены на сайте Камчатского филиала Геофизической службы РАН <http://kbs.kscnet.ru>



**Рис. 1.** Схематическая карта эпицентров землетрясений и активных сейсмических структур Корякско-Камчатского региона. 1 – энергетические классы землетрясений; 2 – эпицентры сильных землетрясений магнитудой 7 и более; 3 – активные и потенциально активные вулканы; 4 – сейсмоактивные разломы: а – достоверные, б – предполагаемые; 5 – сейсмоактивные взбросы; б – зона максимальной сейсмической активности; 7 – неактивные трансформные разломы; 8 – надвиг Грешишкина; 9 – граница между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами (по Злобину, 2001); 10 – ось палеожелоба миоценовой зоны субдукции под Срединный хребет; 11 – оси современных желобов; 12 – изоглубины до поддвигаемой Тихоокеанской плиты (верхняя поверхность сейсмофокальной зоны); 13 – направление и скорость движения Тихоокеанской плиты (Gorbatov, Kostoglodov, 1997); 14 – направление и скорость движения Командорской микроплиты (Левин и др., 2002).

тектонической эволюции региона (Авдейко и др., 2002; Трубицын и др., 1998; Федотов, Шапиро, 1998) позволяют рассмотреть на новом материале природу землетрясений Корякии.

В статье будут рассмотрены некоторые аспекты тектонического развития, а также эволюция взаимодействия литосферных плит Корякско-Камчатского региона и возможные причины произошедших в Олюторском районе землетрясений.

### СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ КОРЯКСКО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

Современная сейсмическая активность Камчатки обусловлена субдукцией, т.е. поддвижением Тихоокеанской литосферной плиты под Евразийскую, и взаимодействием Тихоокеанской и Северо-Американской плит по трансформному разлому. Геометрия сейсмофокальной зоны достаточно подробно рассмотрена в ряде работ (Тараканов, 1981; Федотов и др., 1985; 1987). Сейсмофокальная зона имеет субгоризонтальную часть на глубинах 0 – 50 км, которая прослеживается полосой шириной около 180 км между глубоководным желобом и побережьем Камчатки (рис. 1). Глубже сейсмофокальная зона имеет вид слоя толщиной 40 – 50 км, падающего под Камчатку под постоянным углом 50° (Федотов и др., 1985).

На основе анализа последовательности землетрясений и локализации их очагов в Камчатской зоне субдукции нами (Авдейко и др., 2004)

проведено сеймотектоническое районирование. Методом построения карт очагов землетрясений, сейсмических разрезов и трехмерных вращаемых блок-диаграмм выделены сейсмоактивные разломы (сдвиги и взбросы) в пределах надвигаемого (нависающего) края Евразийской плиты (рис. 1). Субпараллельными сдвигами, ориентированными в направлении движения Тихоокеанской плиты, нависающий край Евразийской плиты разделяется на отдельные блоки (сегменты). В свою очередь, в каждом сегменте выделяются более мелкие сейсмоактивные блоки, ограниченные взбросами с падением плоскостей сместителя под углами 40 – 50° в направлении, противоположном направлению субдукции (рис. 1). В целом, структура сейсмической активности зоны субдукции соответствует клавишно-блоковой модели Л.И. Лобковского и Б.В. Баранова (1984). Характер тектонических напряжений по этой модели более подробно рассмотрен Л.И. Лобковским (1988).

Большинство очагов землетрясений с глубиной до 40 км приурочено к полосе шириной около 180 км между осью глубоководного желоба и восточным побережьем Камчатки (рис. 1). Максимум очагов землетрясений расположен над зоной резкого изгиба Тихоокеанской плиты, где угол подвига увеличивается с 10 – 12° до 50° (рис. 2), и совпадает в плане с линейным максимумом гравитационных аномалий в свободном воздухе (Павлов и др., 1972; Watts et al., 1978), в изостатической редукции (Гайнанов и др., 1972) и по данным спутниковой альтиметрии (Международный

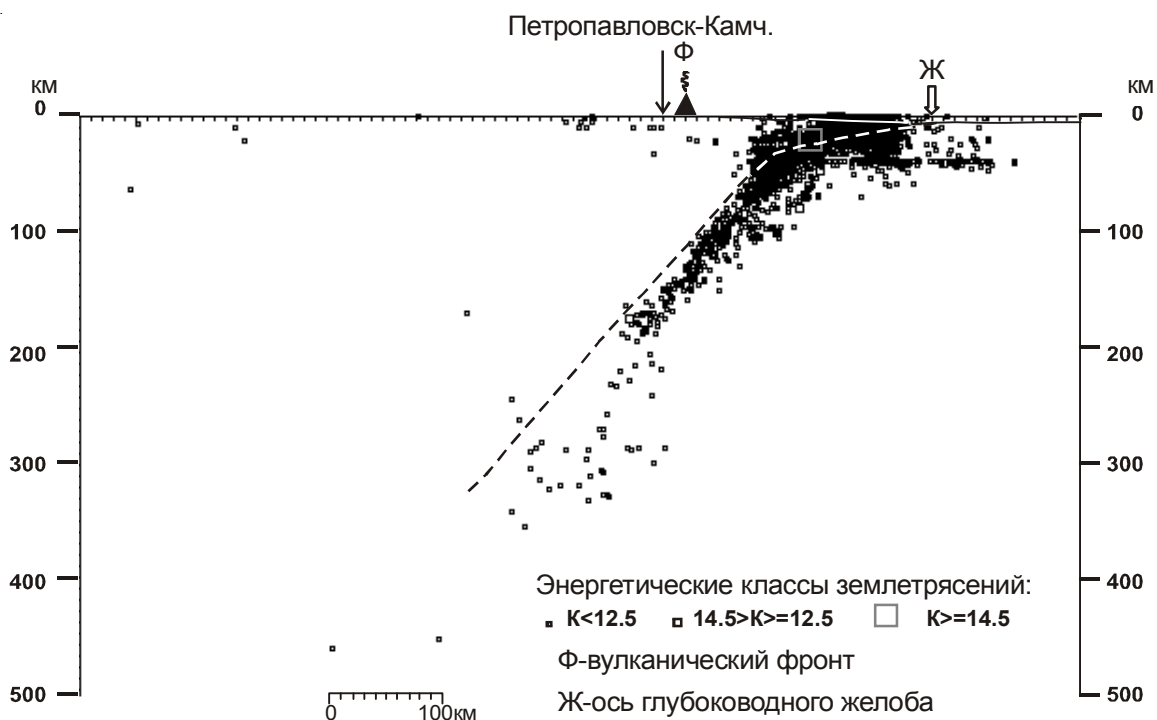


Рис. 2. Сейсмический разрез вкосте простираения Курило-Камчатской островной дуги (по Авдейко и др., 2004, рис. 1, разрез 17).

геолого-геофизический..., 2003). К этой же зоне приурочено большинство сильных землетрясений с магнитудой более 7 (рис. 1).

Вторая полоса землетрясений, в том числе и сильных, приурочена к зоне Алеутско-Камчатского сочленения. Эпицентры землетрясений тяготеют к Командорскому трансформному разлому, расположенному между осью Алеутского желоба и Командорскими островами, и трансформному разлому Беринга (рис. 1). На характере движений по этим разломам мы остановимся в последующих разделах.

Сейсмичность района, расположенного к северу от Алеутско-Камчатского сочленения, значительно слабее, чем к югу от этой зоны. Тем не менее, здесь зафиксировано три сильных землетрясения магнитудой 7 и более. Одно из них произошло в 1969 г. в районе полуострова Озерного ( $M=7.7$ ), а два других – Хаилинское 1991 г. ( $M=7.0$ ) и Олюторское 2006 г. ( $M=7.6$ ) произошли к северу от полуострова Говена, вблизи пос. Хаилино (рис. 1). Очаговые зоны землетрясений этого района локализованы в пределах двух участков. На южном участке, где произошло землетрясение 1969 г., очаговая зона протягивается от полуострова Камчатского мыса до о. Карагинского. Она занимает такое же положение относительно палеожелоба миоцен-плиоценовой зоны субдукции, как очаговые зоны землетрясений современной зоны субдукции относительно Курило-Камчатского глубоководного желоба (рис. 1). Вторая очаговая зона, где произошли сопровождаемые афтершоками землетрясения 1991 и 2006 годов, не обнаруживает непосредственной связи с зоной миоцен-плиоценовой субдукции. Для выявления природы этих землетрясений остановимся более подробно на их характеристике.

### ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ОЛЮТОРСКОГО РАЙОНА

До Хаилинского землетрясения 1991 г. район, расположенный к северу от о. Карагинского, считался практически асейсмичным. На карте общего сейсмического районирования (ОСР-78) этот район относился к 6-балльной зоне. На карте ОСР-97 этот район уже был отнесен к 9-балльной зоне с 1%-ной вероятностью превышения интенсивности в 9 баллов в течение 50 лет (т.е. 1 раз в 5000 лет). Однако, через 15 лет 20 апреля 2006 г. почти на том же месте произошло еще более мощное землетрясение магнитудой 7.6 и интенсивностью сотрясений более 9 баллов, с очаговой зоной афтершоков, вытянутой в северо-восточном направлении на 150-160 км (Викулин, Мелекесцев, 2006).

На рис. 3 показана последовательность проявления афтершоков 9-го и выше энергетического класса по классификации С.А. Федотова (1972), принятой при регистрации землетрясений Камчатской региональной сети, данные из каталога Геофизической службы РАН, помещенного в Internet. На прилагаемых рисунках эпицентры землетрясений выделенного на карте временного интервала показаны черными квадратами, а эпицентры всех предыдущих землетрясений – серым цветом. Это позволяет определить последовательность заполнения очаговой зоны. В течение часа после главного толчка ( $M=7.6$ ,  $K_s=15$ ), было зарегистрировано 5 афтершоков, причем один из них энергетического класса 12.1 (рис. 3а). В течение 6 часов произошло уже 24 афтершоковых землетрясения, а эпицентр самого мощного из них (энергетического класса 13.1) располагался непосредственно у поселка Тилички. Главный толчок и этот афтершок принесли серьезные разрушения в пос. Тилички и Корф (Пинегина, Константинова, 2006). В это время оконтурилась практически вся плейстосейстовая область, отчетливо проявилась северо-восточная ориентировка эпицентров землетрясений и наметилась поперечная ориентировка эпицентров на юге плейстосейстовой области. В течение суток (рис. 3в) и затем в течение 9 дней до 29 апреля 2006 г. (рис. 3г) происходило последовательное увеличение числа афтершоков в пределах очаговой зоны. Сохранился северо-восточный тренд эпицентров афтершоков, но более отчетливо стал проявляться поперечный северо-западный тренд на юге очаговой зоны (рис. 3г).

29 апреля 2006 г. произошел сильный афтершок ( $M=6.6$ ,  $K_s=13.7$ ) в районе бухты Сомнения, т.е. за пределами сформировавшейся ранее плейстосейстовой области (рис. 3д). В течение суток на этом же месте произошел такой же мощный афтершок (рис. 3е). В течение месяца после этих афтершоков стал проявляться преимущественно поперечный тренд ориентировки эпицентров последующих афтершоков (рис. 3ж). Слабые землетрясения в очаговой зоне проявляются вплоть до настоящего времени, т.е. до декабря 2006 г. На рис. 3з показаны данные до 9 августа 2006 г., имеющиеся на сайте Камчатского филиала Геофизической службы РАН.

Макросейсмическими наблюдениями (Пинегина, Константинова, 2006) выявлена разломная зона северо-восточного простирания протяженностью около 100 км, состоящая из отдельных кулис. Характер движения по разлому – правосторонний взбросо-сдвиг. Величина взбросовой подвижки в среднем 30 – 40 см, в 30 км северо-восточнее она достигла 280 см. Макси-

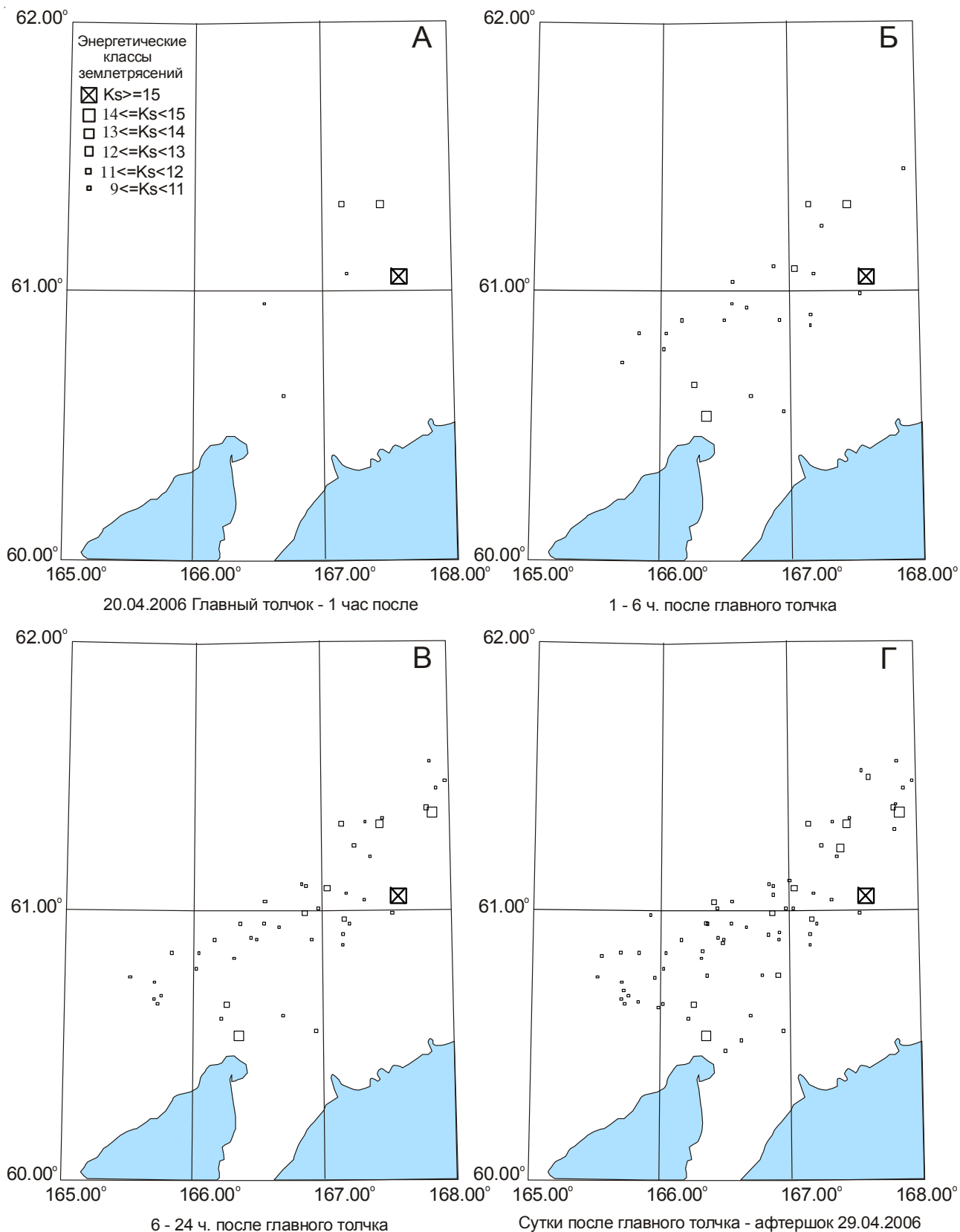
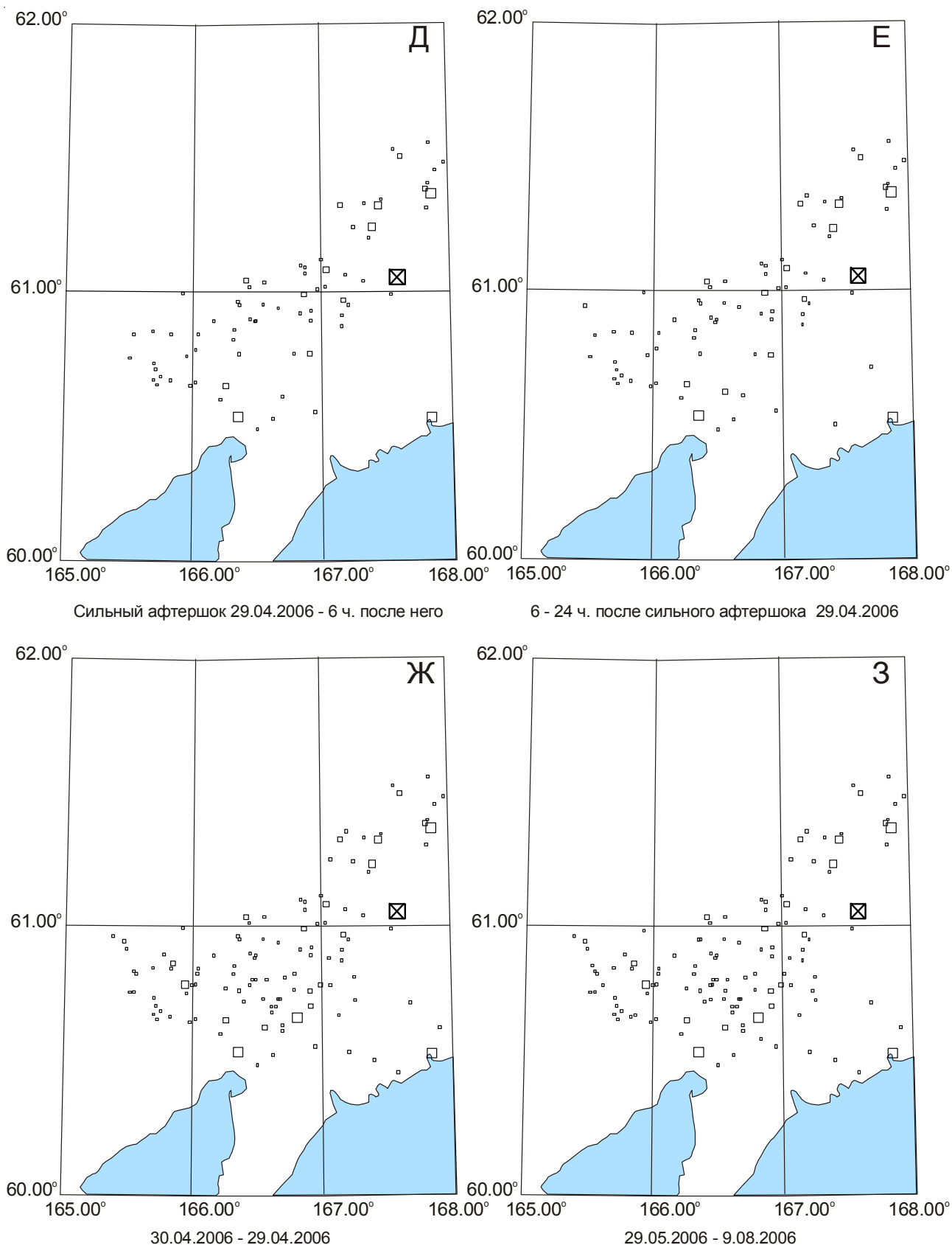


Рис. 3. Подрисуночная подпись на стр.59.

ОЛЮТОРСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 2006 г. КАК РЕЗУЛЬТАТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ



**Рис. 3.** Последовательность проявления афтершоков Олюторского землетрясения 2006 г. ( $M=7.6$ ). Данные регионального каталога землетрясений Камчатского филиала Геофизической службы РАН. Эпицентры землетрясений обозначенного на карте периода показаны черным цветом, все эпицентры предыдущих периодов – серым цветом.

мальная амплитуда пространственного сдвига наблюдалась в центральной части разлома и составила 160 см (Пинегина, Константинова, 2006). По определениям Геологической службы США (USGS) и Гарвардского центра, механизм очага главного толчка также соответствует правостороннему сдвигу.

Анализ локализации афтершоков на вращаемых блоках по программе *Maple 7* показал, что поле очагов образует сужающийся на глубину клин. Северо-западный наклон соответствует направлению, очевидно, не совсем «отмершей» зоны субдукции, а юго-восточный — наклону плоскости сместителя взбросов. Аналогичная картина наблюдается и для современной зоны субдукции под Камчатку южнее Алеутско-Камчатского сочленения (Авдейко и др., 2004).

Для анализа тектонической приуроченности и природы очагов землетрясений рассмотрим тектоническую эволюцию региона, начиная с эоцена.

#### ЭВОЛЮЦИЯ КОРЯКСКО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА В ПОЗДНЕМ КАЙНОЗОЕ

На Камчатке выделяются три разновозрастные системы автохтонных вулканических поясов (вулканических дуг), которые последовательно омолаживаются в сторону Тихого океана (Авдейко и др., 2001; 2002; 2006; Леглер, 1977). Это Западно-Камчатская вулканическая дуга, существовавшая в эоцене (Филатова, 1988), система вулканических дуг Курильских островов, Срединного хребта Камчатки и Корякского нагорья, существовавшая от конца олигоцена вплоть до голоцена, и современная Курило-Камчатская дуга, формирование которой началось в конце миоцена (рис. 4). Тектоническое развитие этих дуг довольно подробно рассмотрено нами ранее (Авдейко и др., 2001; 2002; 2006). Эти дуги являются автохтонными, сформированными над зонами субдукции. Более древние геологические образования в большинстве своем являются аллохтонными и входят в состав фундамента вулканических дуг (Авдейко и др., 2003). Здесь мы кратко рассмотрим лишь основные положения, важные, на наш взгляд, для выявления природы землетрясений, произошедших в Олюторском районе КАО в 2006 и 1991 гг.

Пространственное размещение вулканических формаций островодужного типа, а также сейсмологические, гравиметрические и сейсмотомографические данные позволяют трактовать тектоническую историю рассматриваемого региона как развитие разновозрастных островодужных и окраинноконтинентальных надсубдукционных систем, дискретно смещающихся и последовательно омолаживающихся в сторону Тихого оке-

ана. На рис. 4 показана модель их эволюции, начиная с конца олигоцена, в виде карты и разрезов для разных этапов развития. В палеогене на Западной Камчатке, по-видимому, существовала система вулканических дуг, от которой к настоящему моменту сохранились лишь отдельные фрагменты покровов вулкаников. Н.И. Филатова (1988) рассматривает их как окраинно-континентальный надсубдукционный вулканический пояс.

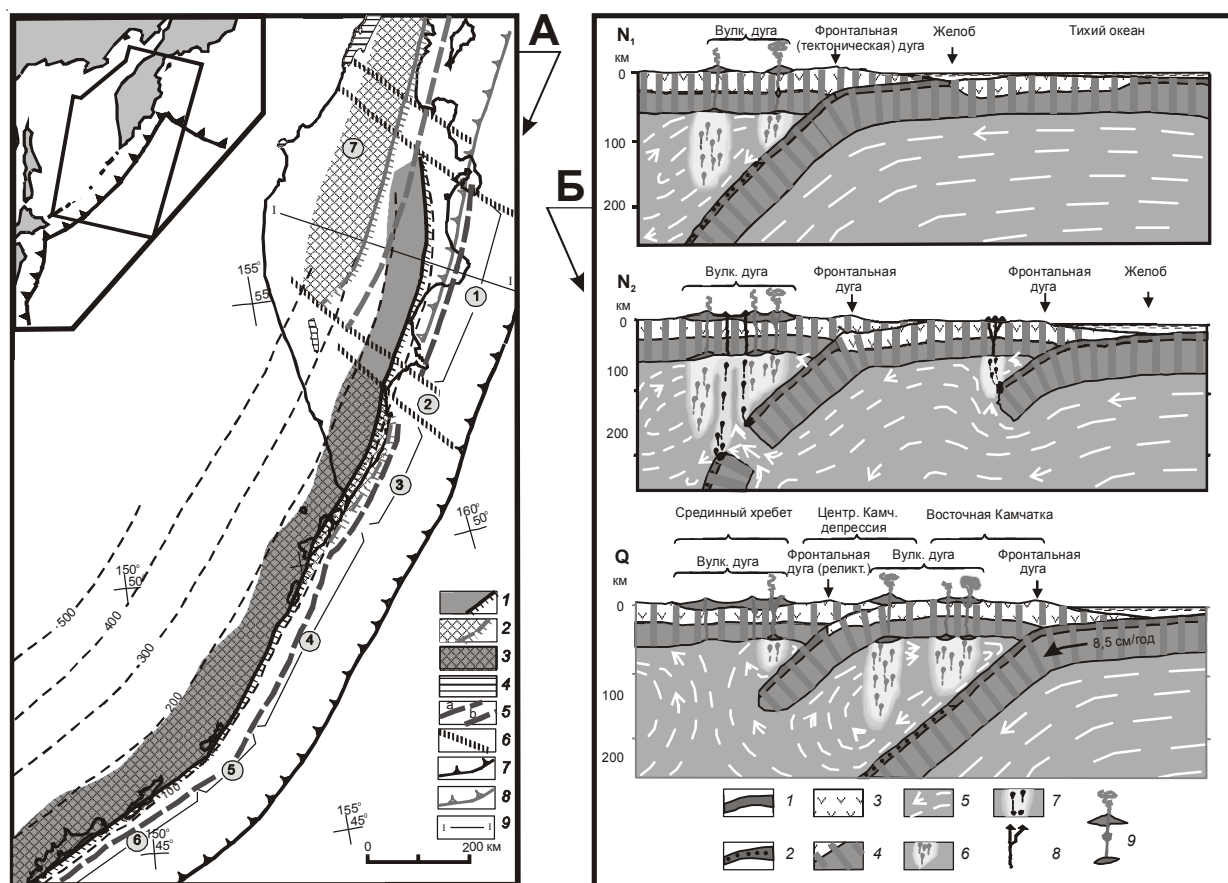
Начиная с конца олигоцена, в пределах Корякско-Камчатского региона и Курил существовала система из трех дуг — Срединно-Камчатской, Южно-Камчатско-Курильской, разделенных трансформными разломами, и Корякской, протянувшейся вплоть до Корякского нагорья. К югу от стыка с Алеутской дугой формирование системы было обусловлено субдукцией Тихоокеанской плиты, а к северу — субдукцией молодой системы малых плит Командорской котловины (Федоров, Шапиро, 1997). Эти дуги в современной структуре маркируются соответствующими формационными комплексами вулканических пород и положительной гравитационной аномалией фронтальной тектонической дуги (Авдейко и др., 2002).

В конце миоцена произошла блокировка зоны субдукции и ее перескок на современное положение. Основная причина перескока — аккреция Кроноцкой палеодуги, которая в современной структуре является террейном восточных полуостровов Камчатки (Константиновская, 1999; Объяснительная записка..., 2000). После перескока произошло постепенное прекращение субдукции под Срединный хребет и формирование Курило-Камчатской островной дуги с современной зоной субдукции.

В соответствии с рассмотренной эволюцией вулканических дуг нами (Авдейко и др., 2002) были выделены участки (сегменты), находящиеся на разных стадиях развития. Восточная Камчатка представляет собой начальный этап субдукции. Возраст наиболее древних вулканических пород, сформированных над этой зоной субдукции, соответствует концу миоцена (Вольнец и др., 1990).

В пределах Южной Камчатки и Курил примерно за 25 млн. лет (начиная с конца олигоцена) установился практически стационарный режим субдукции. Здесь выделяется аномальный участок Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций, которая располагается на месте системы трансформных разломов на южной границе перескока зоны субдукции в конце миоцена.

Срединно-Камчатская вулканическая дуга после перескока ее на современное положение представляет этап завершения субдукции и, соответственно, завершения надсубдукционного вулканизма. Перескок зоны субдукции произошел южнее Алеутско-Камчатского сочленения,



**Рис. 4.** Концептуальная модель эволюции вулканических дуг (Авдейко и др., 2006), представленная в виде карты (А) и временных разрезов (Б). А: 1 - современная вулканическая дуга и ее вулканический фронт; 2 - миоценовые вулканические дуги Срединного хребта и Курил; 3 - зона наложения современной вулканической дуги на миоценовую дугу (стационарный режим субдукции); 4 - фрагменты палеогеновых вулканических дуг; 5 - современное положение фронтальной (тектонической) дуги (а) и реконструируемое — для миоцена Срединно-Камчатской дуги (б); 6 - трансформные разломы, по которым произошел перескок зоны субдукции; 7 - ось Курило-Камчатского глубоководного желоба; 8 - ось глубоководного желоба Срединно-Камчатской дуги; 9 - положение модельных разрезов на рис. 4Б. Цифры в кружках: 1 - Восточно-Камчатский сегмент; 2 - Мало-Петропавловская зона поперечных дислокаций; 3 - Южно-Камчатский сегмент; 4-6 - Северо-Курильский, Центральнo-Курильский и Южно-Курильский сегменты, соответственно; 7 - Срединно-Камчатская вулканическая дуга. Б: 1 - океаническая кора; 2 - эцлогит, 3 - континентальная кора; 4 - литосфера; 5 - астеносфера с линиями течения; 6 - зона типичного островодужного магмообразования; 7 - зона выплавления магм с внутриплитными геохимическими характеристиками; 8 - пути подъема «внутриплитных» магм в литосфере; 9 - магматические очаги и пути подъема островодужных магм в литосфере.

а к северу от него субдукция, по-видимому, постепенно прекратилась.

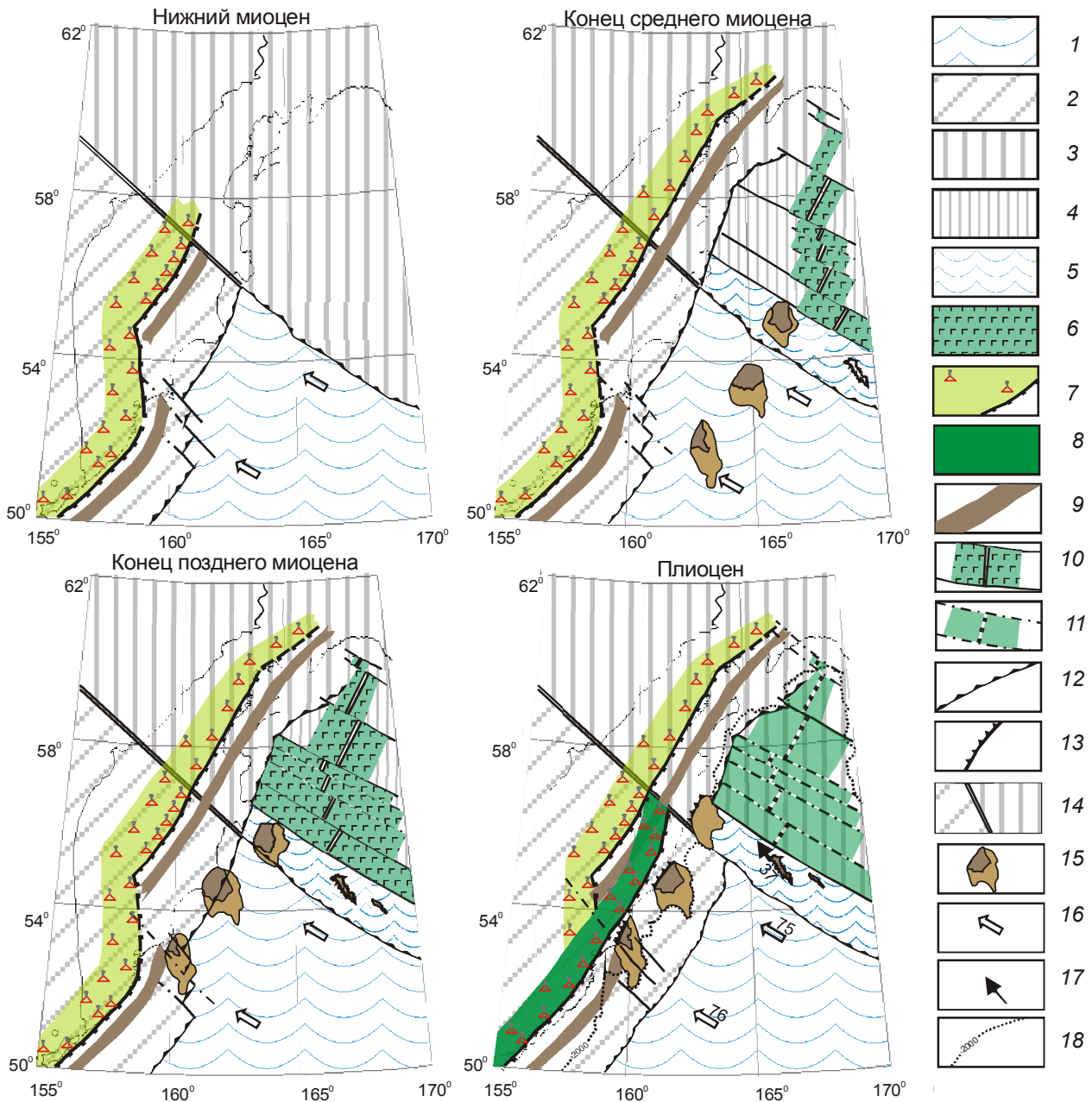
Рассмотрим более подробно особенности проявления субдукции и надсубдукционного вулканизма в Срединном хребте и в Корьякском нагорье севернее зоны Алеутско-Камчатского сочленения, т.к. это, на наш взгляд, может дать ключ к пониманию природы сильных землетрясений 1991 и 2006 годов.

Надсубдукционный тип вулканизма, проявленного в этом регионе в позднем кайнозое, обоснован в ряде публикаций (Кепежинская, Федоров, 1986; Пузанков, Валов, 1994; Федоров, Шапиро, 1998) и не вызывает сомнений. Модель

субдукции, обусловленная наличием зоны спрединга в Командорской котловине, была предложена Б.В. Барановым с соавторами (Baranov et al., 1991). На основе идентификации полосовых магнитных аномалий (Валяшко и др., 1993) П.И. Федоров и М.Н. Шапиро (1998) разработали схематическую кинематическую модель взаимодействия литосферных плит и эволюции Командорской зоны спрединга. Эта модель, дополненная данными, касающимися эволюции зоны субдукции и надсубдукционного вулканизма, показана на рис. 5.

По этой модели, в нижнем миоцене (рис. 5а) была проявлена только субдукция Тихоокеанской





**Рис. 5.** Схема тектонического развития области взаимодействия Тихоокеанской, Северо-Американской и Евразийской плит. 1 - Тихоокеанская плита (ТП); 2 - Евразийская плита (ЕА); 3 - Северо-Американская плита (СА); 4 - реликт СА плиты в Командорской зоне спрединга; 5 - Командорская микроплита; 6 - новообразованная литосфера Командорской зоны спрединга; 7 - вулканические дуги Срединного хребта Камчатки, Ю. Камчатки и Курил; 8 - Курило-Камчатская вулканическая дуга; 9 - фронтальные тектонические дуги; 10 - Командорская зона спрединга с трансформными разломами; 11 - отмершая зона субдукции; 12 - оси глубоководных желобов; 13 - надвиги, образовавшиеся после блокировки зоны субдукции; 14 - граница между Северо-Американской и Евразийской литосферными плитами; 15 - блоки полуостровов Восточной Камчатки; 16 - направление и скорость движения Тихоокеанской плиты; 17 - направление и скорость движения Командорской микроплиты; 18 - изобата 2000 м.

литосферной плиты под Евразийскую южнее зоны Алеутско-Камчатского сочленения. Пояс надсубдукционного вулканизма (Срединно-Камчатская и Южно-Камчатско-Курильская вулканические дуги) несколько отклонялся к северу от края Тихоокеанской плиты.

Командорская зона спрединга и последующая зона субдукции заложилась в конце среднего миоцена (рис. 5б). Эта зона субдукции явилась продолжением зоны субдукции Тихоокеанской плиты, а обусловленная ею вулканическая дуга — продолжением Срединно-Камчатской дуги в северо-восточном направлении. Скорость спрединга и, соответственно, субдукции уменьшались в направлении от контакта с Тихоокеанской плитой в северо-восточном направлении. Этот характер движений сохранялся вплоть до конца миоцена (рис. 5в).

В конце плиоцена, около 10 млн. лет назад (Авдейко и др., 2002, 2006), в результате аккреции полуостровов Восточной Камчатки, произошел перескок зоны субдукции на современное положение (рис. 5г). Вслед за этим постепенно прекратилась и субдукция под северную часть Камчатки, так как Командорская зона спрединга, по-видимому, была образована за счет взаимодействия с Тихоокеанской плитой. Математическая модель наведенной конвекции и спрединга Командорской котловины была разработана В.П. Трубицыным с соавторами (1998). Возможно, что напряжения, связанные с Командорской зоной субдукции, сохранились до настоящего времени и являются одной из причин землетрясений, проявленных в Олюторском районе. О том, что эта зона субдукции не совсем отмерла, свидетельствует и сильное землетрясение 1969 г. ( $M=7,7$ ) с очаговой зоной афтершоков, которая занимает такое же положение по отношению к погребенному палеожелобу, как очаговые зоны сильных землетрясений Камчатки относительно современного Курило-Камчатского желоба.

## ГЕОДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Геодинамика взаимодействия Тихоокеанской, Евразийской и Северо-Американской литосферных плит показана на прилагаемых карте и блок-диаграмме (рис. 6). Тихоокеанская плита поддвигается под Камчатку со скоростью 75 – 68 мм/год (Kostoglodov et al., 1997). Она контактирует с Северо-Американской плитой, вернее с Командорской микроплитой по трансформному разлому, наклоненному на север, под Командорские острова (псевдосубдукция). Наклон связан с тем, что в более западных районах Алеутской дуги наблюдается косая субдукция Тихоокеанской плиты под Северо-Американ-

скую. О наличии такого наклона свидетельствует положение гипоцентров афтершоков, произошедших в первые шесть часов после землетрясения 1971 г. ( $M=7,8$ ). На рис. 6 показано положение Тихоокеанской плиты под Северо-Американской и Евразийской плитами. При такой псевдосубдукции Командорская микроплита, отколовшаяся от Северо-Американской плиты, как бы едет на Тихоокеанской плите. Движение Командорской микроплиты зафиксировано данными Камчатской JPS сети. Скорость ее движения после сильного землетрясения 1997 г. составила 37 мм/год, а направление движения несколько отклоняется на север (Левин и др., 2002). Азимут движения Тихоокеанской плиты  $S320^\circ$  (Kostoglodov et al., 1997), а Командорской микроплиты —  $S325^\circ$ . Это объясняется тормозящим эффектом Северо-Американской плиты (Avdeiko et al.<sup>2</sup>). Тормозящий эффект, в свою очередь, вызывает растягивающие напряжения поперек движения Тихоокеанской плиты и приводит к ее разрывам, как показано на рис. 6. Этим обусловлена и высокая интенсивность проявления вулканизма Ключевской группы вулканов, и магнезиальный характер изливающихся лав, и появление внутриплитных геохимических характеристик некоторых лав (Авдейко и др., 2006).

Как было сказано выше, В.П. Трубицын и др. (1998) рассчитали математическую модель, по которой трансформное взаимодействие Тихоокеанской и Северо-Американской плит привело к появлению наведенной конвекции в мантии под литосферой Командорской впадины. В настоящее время, в связи с перескоком зоны субдукции Тихоокеанской плиты и остановкой или резким замедлением субдукции микроплит Командорской котловины, по-видимому, происходит перестройка конвекции. При этом силы, вызывающие наведенную конвекцию при взаимодействии плит в условиях «псевдосубдукции», будут более интенсивными, чем при взаимодействии по обычному трансформному разлому, как это принято в расчетах В.П. Трубицына и др. (1998).

Таким образом, если причиной формирования Командорской зоны спрединга и последующей субдукции явилась наведенная конвекция по модели В.П. Трубицына и др. (1998), то в ближайшем будущем можно ожидать заложение новой зоны спрединга и формирование новой или подновление старой зоны субдукции. Скорее всего,

<sup>1</sup>Avdeiko G.P., Savelyev D.P., Palueva A.A., Popruzhenko S.V. Evolution of the Kurile-Kamchatkan volcanic arcs and geodynamics of the Kamchatka-Aleutian junction. AGU's special monograph // Volcanism and tectonics of the Kamchatka peninsula and adjacent arcs. Paper #2006VK000472. Принята в печать.

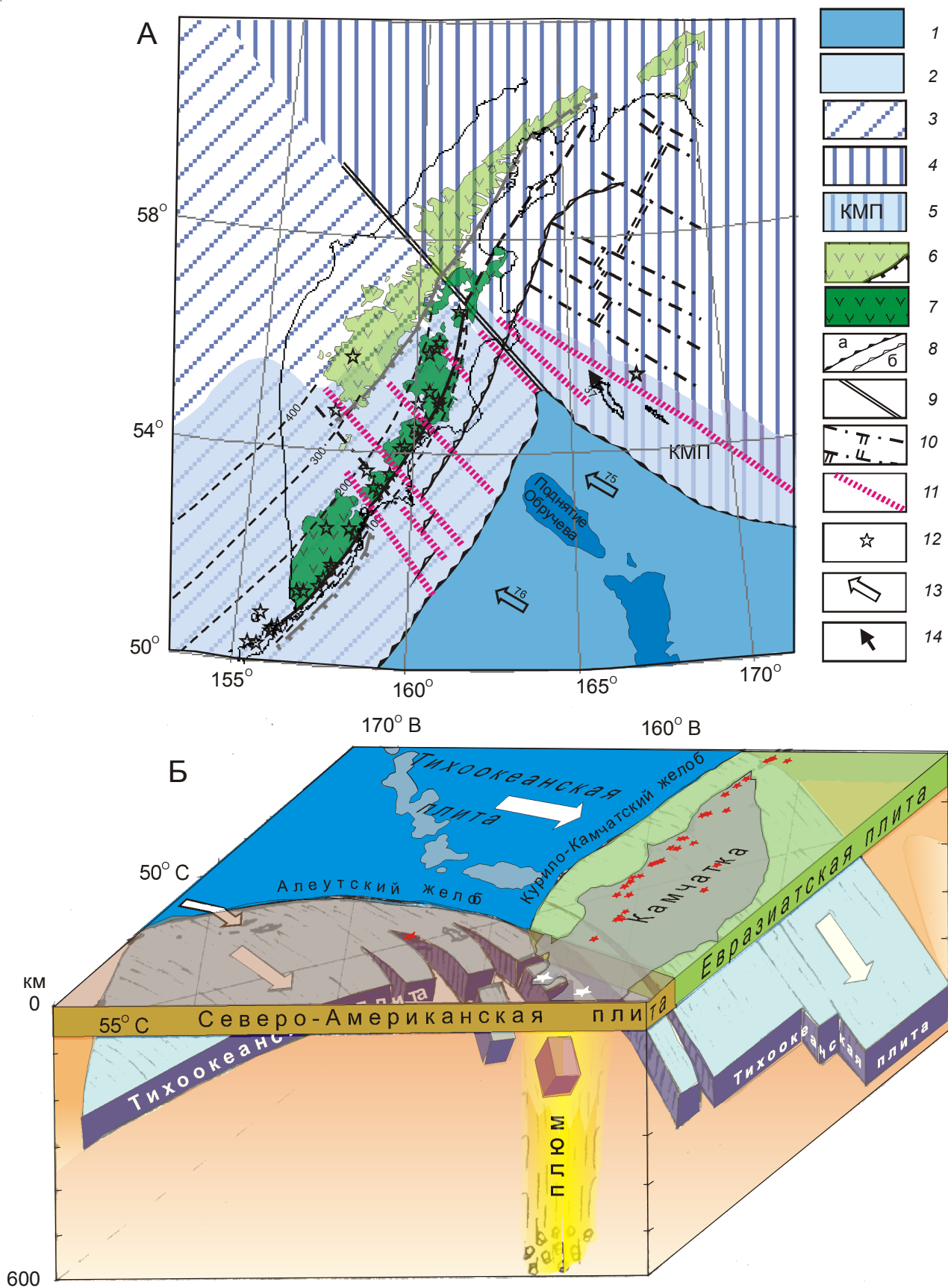


Рис. 6.

это будет подновление старой зоны субдукции, т.к. она не была заблокирована, как на участке южнее Камчатско-Алеутского сочленения. Формирование же новой зоны субдукции при молодом, позднекайнозойском возрасте Командорской литосферы маловероятно из-за ее нейтральной или даже положительной плавучести.

### ВЕРОЯТНЫЕ ПРИЧИНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ОЛЮТОРСКОГО РАЙОНА

1. Олюторское землетрясение 2006 г., так же как и Хаилинское землетрясение 1991 г., и Озерновское землетрясение 1969 г., произошло в пределах предыдущей зоны субдукции, которая прекратила свое существование в связи с ее блокировкой за счет аккреции Восточных полуостровов Камчатки – Шипунского, Кроноцкого и полуострова Камчатский мыс. Субдукция была заблокирована южнее Алеутско-Камчатского сочленения, где в конце миоцена, около 10 млн. лет назад, произошло заложение новой, современной зоны субдукции. Севернее указанного сочленения субдукция прекратилась из-за затухания Командорской зоны спрединга, т.к. она существовала за счет наведенной конвекции. Напряжения сжатия в зоне субдукции, по-видимому, сохранились до настоящего времени, так как остановка движения была не такой резкой, как в случае с перескоком зоны субдукции. Энергия сжатия, по-видимому, оказалась недостаточной для субдукции и реализовалась до глубины 60 км.

В структурном плане все указанные выше сильные землетрясения были локализованы в пределах фронтальной тектонической дуги, которая располагается над зоной перегиба субдуцируемой плиты. В современной зоне субдукции аналогичная структура характеризуется максимальной сейсмичностью как по числу землетрясений, так и по магнитудам. Тектонические напряжения, обусловленные субдукцией, по-видимому, сохранились в субгоризонтальной ветви сейсмофокальной зоны, а наклонная ветвь практически «отмерла» в результате погружения литосферной плиты в мантию.

Этому способствовал переход базальта 2-го слоя океанической коры в эклогит и, соответственно, увеличение ее отрицательной плавучести.

2. Для всех современных зон субдукции характерно наличие положительной и отрицательной гравитационных аномалий в изостатической редукции (Harabaglia, Doglioni, 1983). Положительная аномалия приурочена к фронтальной тектонической дуге, а отрицательная – к глубоководному желобу. Прекращение субдукции приводит к восстановлению изостатического равновесия. Южнее Алеутско-Камчатского сочленения произошло формирование Центральной Камчатской депрессии после перескока зоны субдукции около 10 млн. лет назад. Депрессия располагается на месте фронтальной тектонической дуги предыдущей зоны субдукции под Срединный хребет Камчатки (Авдейко и др., 2001). При восстановлении изостатического равновесия основные движения произошли по системе разломов, отделяющих депрессию от хребтов Восточной Камчатки.

Севернее Алеутско-Камчатского сочленения прекращение субдукции было, по-видимому, не таким резким, как в южной части, и в настоящее время идет еще восстановление изостатического равновесия. При этом на участке фронтальной тектонической палеодуги идет опускание, а на участке палеожелоба – поднятие. Напряжения на границе поднятия-опускания, обусловленные восстановлением изостатического равновесия, и напряжения сжатия непосредственно в зоне палеосубдукции, по-видимому, приводят к взбрососдвиговым подвижкам, зафиксированным как по механизмам очагов землетрясений, так и визуальными наблюдениями (Пинегина, Константинова, 2006). При такой трактовке геодинамических напряжений северо-западная граница выделяемой А.В. Ландером и др. (1993) плиты «Берингия» является субдукционной и находит объяснение правосторонней сдвиговой компонента.

3. Другой возможной, но не альтернативной причиной геодинамических напряжений может быть взаимодействие Тихоокеанской литосферной плиты с Северо-Американской плитой или с

**Рис. 6.** Схематическая карта и блок-диаграмма взаимодействия Тихоокеанской, Евразийской и Северо-Американской литосферных плит. А: 1 - Тихоокеанская плита; 2 - Тихоокеанская плита под Северо-Американской и Евразийской плитами; 3 - Евразийская плита; 4 - Северо-Американская плита; 5 - Командорская микроплита; 6 - вулканическая дуга Срединного хребта и ее вулканический фронт; 7 - Восточно-Камчатская вулканическая дуга и ее вулканический фронт; 8 - оси глубоководных желобов (а) и палеожелобов (б); 9 - слабоактивная граница между Евразийской и Северо-Американской плитами; 10 - осевая зона Командорского палеоспрединга с отмершими трансформными разломами; 11 - сейсмоактивные поперечные разломы; 12 - Активные и потенциально активные вулканы; 13 - направление и скорость движения JPS пункта на о. Беринга. Б: На блок-диаграмме (вид с северо-запада) черные звездочки – активные вулканы, белые звездочки – потухшие вулканы Начикинский и Хайлюля.

плитой «Берингия» через Командорскую микроплиту. Непосредственное взаимодействие с учетом вовлечения в движение Командорской микроплиты, очевидно, должно приводить к напряжениям, способствующим вращению плиты «Берингия» по часовой стрелке, т.е. левостороннему сдвигу, а по определению механизма очагов землетрясения 2006 г. и по визуальным наблюдениям (Пинегина, Константинова, 2006), здесь зафиксирован правосторонний сдвиг, вернее взбросо-сдвиг. Тем не менее, эти напряжения, в соответствии с моделью В.П. Трубицына и др. (1997), могли вызвать перестройку конвективных течений под литосферой Командорской котловины и напряжений сжатия в районе проявления землетрясений. В этом случае возможно возникновение новой зоны субдукции или возобновление движений по старой зоне субдукции. Последнее представляется более вероятным, так как зона субдукции здесь не была заблокирована, как это имело место к югу от Алеутско-Камчатского сочленения.

4. Анализируя причины землетрясений Олюторского района, нельзя сбрасывать со счета и глобальные напряжения в литосфере. Камчатской сеть JPS станций за 4-летний период наблюдений зарегистрированы заметные смещения станций (Левин и др., 2002). Движения на

станциях южнее Алеутско-Камчатского сочленения соответствуют модели субдукции, а на станциях Каменское (KMS) и Тилички (TIL) выявлено движение в южном направлении. Станция Каменское движется со скоростью около 20 мм/год, а Тилички – около 9 мм/год (рис. 7). Следует подчеркнуть, что все движения определены в предположении неподвижности JPS пункта Петропавловск-Камчатский (PETP). По-видимому, источник напряжения, вызывающего движения в южном направлении, находится севернее пос. Каменское. Это может быть вызвавший поднятие неглубокий мантийный плюм, зафиксированный в районе Пенжинской губы по поперечным сейсмическим волнам (Levin et al., 2002). По продольным сейсмическим волнам в этом районе также выявлена (Gorbatov et al., 2000) низкоскоростная область на глубинах до 400 км, а глубже – высокоскоростная область, которую А. Горбатов с соавторами связывает с субдуцируемой около 48 млн. лет назад плитой Кула. Возможно, поднятие Корякского нагорья и проявленный здесь четвертичный вулканизм внутриплитного типа (Кепежинская, Федоров, 1986) обусловлены влиянием неглубокого мантийного плюма.

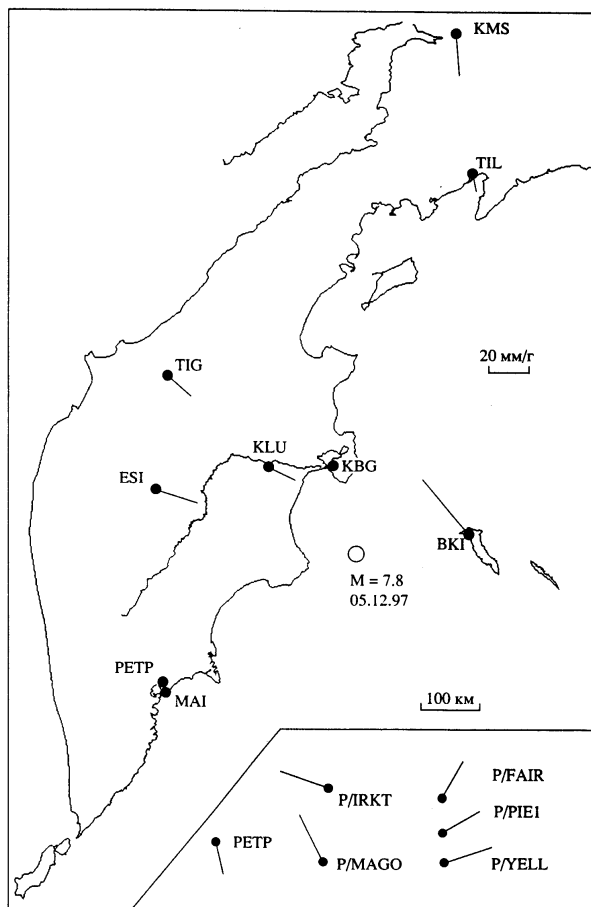
## ВЫВОДЫ

1. Землетрясения Олюторского района 1991 и 2006 гг. пространственно приурочены к зоне субдукции под Срединный хребет Камчатки, заметные движения по которой прекратились около 10 млн. лет назад. Непосредственной причиной землетрясений могут быть остаточные напряжения сжатия и напряжения восстановления напряженного субдукцией изостатического равновесия.

2. Второй дополнительной, а может быть и самостоятельной причиной землетрясений может быть перестройка конвективных течений под Командорской котловиной. Наведенная конвекция, по модели В.П. Трубицына и др. (1998), может вызвать напряжения сжатия и возобновление движений по зоне субдукции.

3. Непосредственной причиной напряжений, вызвавших рассматриваемые землетрясения, могут быть и глубинные напряжения литосферы этого района, вызванные мантийным плюмом.

В любом случае наличие существовавшей ранее зоны субдукции и приуроченность к ней



**Рис. 7.** Схема смещений станций Камчатской JPS сети с 1 июля 1996 г. по 1 июля 2000 г. (Левин и др., 2002). Залитые кружочки – местоположение JPS станций, отходящие от них линии – направления и скорости смещения. Станции: KMS – Каменское, TIL – Тилички, TIG – Тигиль, KBG – Крутоберегово, KLU – Ключи, ESI – Эссо, BKI – Никольское, PETP – Петропавловск-Камчатский, MAI – Петропавловск-Маяк.

землетрясений, на наш взгляд, не вызывает сомнений.

Авторы признательны сотрудникам Камчатского филиала Геофизической службы РАН за оперативное предоставление материалов по землетрясениям и Т.К.Пинегиной за обсуждение природы и последствий Олюторского землетрясения. Авторы благодарны рецензентам, сделавшим ценные замечания, исправления которых позволили улучшить статью.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Мировой океан», подпрограмма «Исследование природы Мирового океана», договор 43.634.11.0004/3 и ДВО РАН (проект 06-3-А-08-326).

#### Список литературы

- Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.* Современная тектоническая структура Курило-Камчатского региона и условия магмообразования // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 9-33.
- Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.* Тектоническое развитие и вулкано-тектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы // Геотектоника. 2002. №4. С.64-80.
- Авдейко Г. П., Палуева А.А., Лепиньч С. В.* Сейсмоактивные тектонические структуры зоны субдукции под Восточную Камчатку // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2004. № 3. С. 18-35.
- Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А.* Геодинамические условия вулканизма и магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы // Петрология. 2006. Том 14. № 3. С. 248 – 266.
- Авдейко Г.П., Савельев Д.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.* Принцип актуализма: критерии для палеотектонических реконструкций на примере Курило-Камчатского региона // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. № 1. С. 32-59.
- Валяшко Г.М., Чернявский Г.Е., Селиверстов Н.И., Иваненко А.Н.* Задуговой спрединг в Командорской котловине // Докл. РАН. 1993. Т. 328. № 2. С. 212-215.
- Викунин А.В., Мелекесцев И.В.* Уроки Хаилинского 1991,  $M=7.0$  и Олюторского 2006,  $M=7.8$  землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. Вып. 7. № 1. С. 36-49.
- Вольнец О.Н., Успенский В.С., Аношин Г.Н. и др.* Эволюция геодинамического режима магмообразования на Восточной Камчатке в позднем кайнозое (по геохимическим дан-ным) // Вулканология и сейсмология. 1990. №5. С.14-27.
- Гайнанов А.Г., Исаев Е.Н., Строев П.А., Ушаков С.А.* Изостазия и глубинная структура коры в зоне перехода от северо-восточной части Азиатского материка к Тихому океану // Результаты исследований по международным геофизическим проектам. Земная кора островных дуг и дальневосточных морей. Верхняя мантия. 1972. № 3. С. 5-26.
- Злобин Т.К.* Тектонические границы Охотской литосферной плиты // Тектоника. Глубинные строения и геодинамика востока Азии: III Косыгинские чтения. Хабаровск: ИТиГ. 2001. С.142-159.
- 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.
- Кекежинская П.К., Федоров П.И.* Состав и структурное положение позднекайнозойских вулканитов Камчатского перешейка и Олюторской зоны Корякского нагорья // Изв. Вузов. Геология и разведка. 1986. № 8. С. 13-21.
- Константиновская Е.А.* Геодинамика коллизии островная дуга – континент на западной окраине Тихого океана // Геотектоника. 1999. № 5. С.15-34.
- Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин Д.В., Кирюшин А.В.* Тектоническая позиция и очаговые параметры корякского (Хаилинского) землетрясения 8 марта 1991 г. в контексте проблемы существования современной плиты Беринги // Математическое моделирование сейсмотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений. 1993. Вып. 1. С.74-88.
- Левин В.Е., Гордеев Е.И., Бахтияров В.Ф., Касахара М.* Предварительные результаты GPS мониторинга на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 3-11.
- Леглер В.А.* Развитие Камчатки в кайнозое с точки зрения теории тектоники литосферных плит (источники энергии тектонических процессов и динамика плит) // Тектоника литосферных плит. М.:Ин-т океанологии АН СССР, 1977. С.137-169.
- Лобковский Л.И.* Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 256 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.843-847.

- Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана / Отв.ред. Удинцев Г.Б. МОК (Юнеско), РАН, ФГУП ПКО «Картография», ГУНиО, Москва - Санкт-Петербург, 2003. 192 с.
- Объяснительная записка к тектонической карте Охотоморского региона масштаба 1:2500000 / Ред. Н.А.Богданов, В.Е Хаин, М.: ИЛРАН, 2000. 193 с.
- Павлов Ю.А., Сычев П.М., Туезов И.К. и др. Аномальные гравитационные поля дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана // Результаты исследований по международным геофизическим проектам. Земная кора островных дуг и дальневосточных морей. Верхняя мантия. 1972. № 3. С. 27-42.
- Пинегина Т.К., Константинова Т.Г. Макросейсмическое обследование последствий Олюторского землетрясения 21 апреля 2006 года // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. Вып. 7. № 1. С. 169-173.
- Пузанков Ю.М., Валов М.Г. Происхождение базальт-андезитовых ассоциаций Камчатского перешейка по петрохимическим и геохимическим данным // Тихоокеанская геология. 1984. № 1. С. 107-112.
- Тараканов Р.З. Фокальные зоны и их роль в развитии островодужных систем // Геология дальневосточных окраин Азии. Владивосток. 1981. С. 53-66.
- Трубицын В.П., Шапиро М.Н., Рыков В.В. Численное моделирование доплиоценовых мантийных течений в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Физика Земли. 1998. №4. С.10-19.
- Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. Ин-та физики Земли АН СССР. 1965. № 36(203). С. 66-93.
- 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.
- Федоров П.И., Шапиро М.Н. Неогеновые вулканы перешейка Камчатки и геодинамика Алеутско-Камчатского сочленения // Геотектоника. 1998. № 2. С. 60-76.
- Филамова Н.И. Периокеанические вулканические пояса. М.: Недра, 1988. 253 с.
- Baranov B.V., Seliverstov N.I., Murav'ev A.V., Muzurov E.L. The Komandorsky basin as a product of spreading behind a transform plate boundary // Tectonophysics. 1991. V. 199. № 2-4. P. 237-270.
- Christova C. Depth distribution of stress in the Kamchatka Wadati-Benioff zone inferred by inversion of earthquake focal mechanism // Journ. of Geodynamics. 2001. № 31. P. 355-372.
- Gorbatov A., Kostoglodov V. Maximum depth of seismicity and thermal parameter of the subducting slab: general empirical relation and its application // Tectonophysics. 1997. V. 277. P. 165-187.
- Gorbatov A., Vidiyantoro S., Fukao Y., Gordeev E. Signature of remnant slabs in the North Pacific from P-wave tomography // Geophys. J. Int. 2000. V. 142. P. 27-36.
- Green T.H. Island arc and continental-building magmatism – a review of petrogenic models based on experimental petrology and geochemistry // Tectonophysics. 1980. V. 63. № 4. P. 367-385.
- Harabaglia P., Doglioni C. Topography and gravity across subduction zones // Geophysical Research Letters. 1998. Vol. 25. №. 5. P. 703-706.
- Levin V., Shapiro N., Park J., Ritzwoller M. Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka // Nature. 2002. V. 418. P. 763-766.
- Watts A.B. Gravity field of the Northwest Pacific Ocean basin and its margin: Aleutian island-arc trench system: Geological Society of America Map and Chart Series, MC-10. 1975.
- Watts A.B., Kogan M.G., Bodine J.H. Gravity field of the Northwest Pacific Ocean basin and its margin: Kuril island arc-trench system: Geological Society of America Map and Chart Series, MC-27. 1978.

## THE OLOTORSK 2006 EARTHQUAKE AS A RESULT OF LITHOSPHERIC PLATE INTERACTION IN THE KORYAK-KAMCHATKA REGION

G. P. Avdeiko<sup>1,2</sup>, A. A. Palueva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of volcanology and seismology. Far East Division, Russian Academy of Science

<sup>2</sup>V. Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683032, Russia

Possible causes of the Olutorsk earthquake in 2006 year are discussed in this paper on the basis of the tectonic history of the Koryak-Kamchatka region in the Late Cenozoic locations of other strong earthquakes. The hypocenter of the Olutorsk earthquake is limited to the Miocene subduction zone. We suggest three possible reasons for the Olutorsk earthquake: a residual compression of the Miocene subduction zone, exertion of the restored isostatic equilibrium and rebuilding of mantle convection due to interaction of the Pacific and the North American lithospheric plates.