

11. Berg E., Sutton G.H. Dynamic interaction of seismic and volcanic activity of the Nazca plate edges // Phys. of the Earth and Plan. Inter. 1974. N 9.
12. Clague D.A., Dalrymple G.B. The Hawaiian – Emperor volcanic chain. Part I. Geologic Evolution // Volcanism in Hawaii. Chapter I. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 1350. Washington. 1987. P. 5-54.
13. Gresta S., Marzocchi W., Mulargia F. Is there a correlation between larger local earthquakes and the end eruptions at mount Etna volcano, Sicili? // Geophys. J. Int. 1994. 116. N 1. P. 230-232.
14. Kenneth L., Tanaka E. M., Shoemaker G. et all. Migration of volcanism in the San Francisco volcanic field, Arizona // GSA Bulletin. February 1986. v. 97; N 2. P. 129-141.
15. Lonsdale P. Geography and history of the Louisville hot spot chain in the southwest Pacific // J. Geophys. Res. 1988. v. 93. N 34. P. 3078-3104.
16. Sauers J. The westward migration of geophysical events in the Aleutians, Springs, 1986 // Cycles. 1986. 37. N 9. P. 203-204.
17. Simkin T. & Siebert L. Volcanoes of the world (catalogue). Published in association with the Smithsonian Institution. 1993. 350 с.
18. Smithsonian Institution – Global Volcanism Program. Worldwide Holocene Volcano and Eruption Information (<http://www.volcano.si.edu>)

УДК 550.34:551.242

МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ В АЛЕУТСКО-КАМЧАТСКОМ РЕГИОНЕ

Г.П. Авдейко^{1,2}, А.А. Палуева¹, О.В. Кувикас^{1,2}

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: gavdeiko@kscnet.ru*

² *Камчатский Государственный университет им. В.Беринга, Петропавловск-Камчатский*

Введение

Изучение механизма взаимодействия литосферных плит имеет большое значение как для прогноза места и времени сильных землетрясений, так и для понимания строения зон субдукции геологического прошлого и выработки критериев их палеотектонических реконструкций. Камчатка и западная часть Алеутской дуги являются весьма удобным регионом для этих целей, так как здесь наблюдается ортогональная субдукция Тихоокеанской плиты (ТОП) под Евразийскую (ЕАП) и трансформное взаимодействие ТОП и Северо-Американской литосферных плит (САП) с Командорской микроплитой между ними.

В статье рассмотрена модель сегментации (формирования клавиш-блоков по [6]) в надвигаемой (нависающей) ЕАП при ортогональной субдукции и модель трансформного взаимодействия между ТОП и САП.

Материал и методика анализа

Основную информацию о взаимодействии литосферных плит поставляют землетрясения, особенно сильные землетрясения, сопровождаемые афтершоками. В работе использован региональный каталог Камчатского филиала Геофизической службы РАН за период 1962-2005 гг., размещенный в Internet. Важное значение имеют данные о местоположении очагов землетрясений. В среднем точность определения координат эпицентров землетрясений составляет 10-15 км на удалении от сети сейсмических станций до 30 км, а точность определения глубины очага около 20 км на удалении – до 50 км. На практике обеспечивается более высокая точность взаиморасположения очагов землетрясений за счет постоянства сети наблюдений и методики обработки [13]. Для анализа структурной приуроченности очагов землетрясений мы использовали данные по всем землетрясениям с $K \geq 9$, а для более детальных построений выбирали те из них, точность определения глубины которых не хуже 10 км.

Помимо построения карт эпицентров землетрясений, поперечных и продольных сейсмических разрезов, мы использовали методику 3-мерного компьютерного моделирования по программе Maple-7. Эта методика позволяет вырезать отдельные объемные компьютерные блоки любого размера со всеми или отдельно выбранными очагами землетрясений и путем вращения в любом направлении выявлять сеймотектонические структуры. Хорошую информацию о сейсмоактивных структурах дает анализ афтершоков сильных землетрясений и роев землетрясений. По каждому из этих сейсмических событий были построены компьютерные вращаемые модели с учетом последовательности проявления землетрясений. В качестве примера на рис. 1 показано два положения роя землетрясений, произошедших в

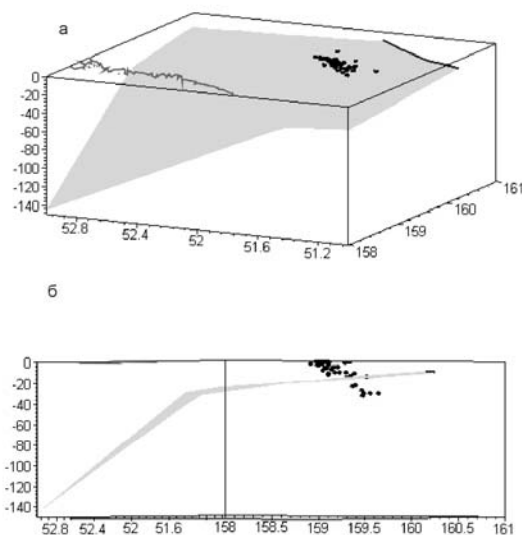


Рис. 1. Два положения модельной блок-диаграммы с очагами роя землетрясений февраля 1983 г.

Авачинском заливе в феврале 1983. Уточнение эпицентров границ сейсмоактивных структур, выраженных в рельефе, проведено с использованием батиметрической карты Камчатско-Командорского региона [8]. Карта составлена Н.И.Селиверстовым по результатам детальных исследований, проведенных в рейсах НИС «Вулканолог», и является наиболее подробной из всех, имеющихся для этого региона. Особенно отчетливо проявлены в рельефе взбросо-надвиговые блоки [1].

Сеймотектоническое районирование и иерархия сейсмоактивных структур

При проведении сеймотектонического районирования мы базировались на классических представлениях модели субдукции, на концепции сейсмических брешей и сейсмических циклов [11, 12], на взбросовом механизме очагов большинства сильных землетрясений [3] и на клавишно-блоковой модели [5, 6], синтезирующей указанные выше концепции и модели.

Проведенный нами анализ положения гипоцентров землетрясений и очаговых зон афтершоков сильных землетрясений с использованием 3-мерных моделей вращаемых блоков в целом показал соответствие с упоминаемой выше клавишно-блоковой моделью. По этой модели нависающий край литосферной плиты разбит продольными, относительно направления субдукции, разломами со сдвиговыми механизмами очагов землетрясений. Эти разломы являются границами отдельных сегментов (блоков-клавиш), сцепление (сила трения) между которыми меньше, чем между нависающей и поддвигаемой плитами. За счет этого каждый блок реагирует отдельно на сжимающие усилия на конвергентных границах плит. Их динамика и напряженно-деформированное состояние определяются, главным образом, взаимодействием с поддвигаемой плитой. Когда в каком-либо сегменте напряжение превышает предел прочности, он скачкообразно смещается в сторону океана, т.е. в обратном относительно субдукции направлении, вызывая сильное, часто катастрофическое землетрясение. Сорвавшийся сегмент или надвиговый блок сегмента продолжает какое-то время перемещаться в сторону океана, сопровождаясь более слабыми землетрясениями – афтершоками, которые фактически оконтуривают движущийся сегмент (блок). После остановки сегмент начинает пассивно перемещаться на поддвигаемой плите до следующего превышения предела прочности и, соответственно, следующего сильного землетрясения. В случае катастрофических землетрясений в процесс отскока в сторону океана могут быть вовлечены и соседние сегменты, еще не достигшие предела прочности [5]. С позиций клавишно-блоковой модели находят простое объяснение и наличие сейсмических брешей, и автономный характер их заполнения, и цикличность проявления сильных землетрясений.

Строение сейсмофокальных зон – это ключ к пониманию механизма взаимодействия континентальной и океанической литосферных плит. Геометрия сейсмофокальной зоны Камчатки как единой структуры достаточно подробно рассмотрена в ряде работ [9, 10, 13]. В них отмечается, что эта зона имеет горизонтальную часть на глубинах 0-50 км, которая про-

слеживается полосой шириной около 200 км между глубоководным желобом и побережьем Камчатки, с максимумом сейсмичности на глубинах до 40 км. Глубже она имеет вид слоя толщиной 40-50 км, падающего под Камчатку под постоянным углом в 50° . Строение субгоризонтальной ветви сейсмофокальной зоны отчетливо проявлено на погоризонтных картах очагов землетрясений (рис. 2). Максимальное число очагов землетрясений приурочено к полосе шириной 30-35 км, располагающейся над зоной изгиба подвигаемой ТОП [1]. Полоса сгущения землетрясений примерно совпадает в плане с линейным максимумом положительных гравитационных аномалий в свободном воздухе [14] и в структурном отношении соответствует фронтальной (тектонической) дуге [2]. К этой же полосе приурочены все сильные землетрясения магнитудой более 7.0, произошедшие за период инструментальных наблюдений, начиная с 1962 г.

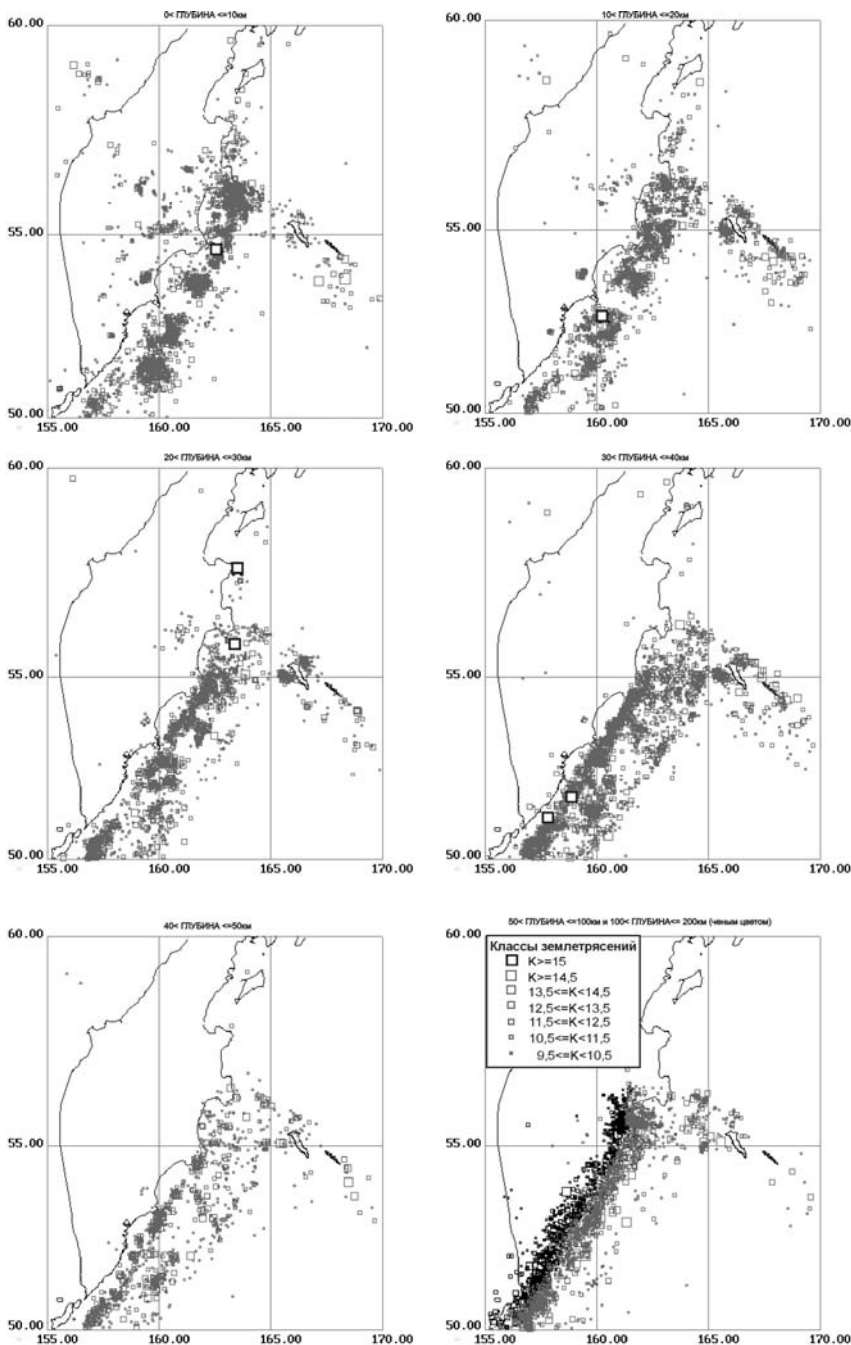


Рис. 2. Погоризонтные карты очагов землетрясений Камчатки и западного окончания Алеутской дуги.

Между полосой сгущения землетрясений и осью глубоководного желоба отчетливо проявлено пятнистое расположение очагов землетрясений на всех горизонтах до глубины 50 км (рис. 2), подчеркивающее сегментацию нависающего края ЕАП. Вторая прерывистая полоса увеличения количества и магнитуд землетрясений располагается между первой полосой и глубоководным желобом. Она отчетливо видна на горизонтах 10-20 и 20-30 км (рис. 2) и пространственно совпадает с подводными возвышенностями, выделенными на батиметрической карте Н.И.Селиверстова[8]. К этой же полосе приурочено два цунамигенерирующих землетрясения 1923 и 1952 г. Практически с северо-западной стороны всех возвышенностей наблюдаются надвиговые подвижки, зарегистрированные сильными землетрясениями и роями землетрясений июня 1968, января-февраля 1980, февраля 1983, сентября-октября 1990, июня - июля 1996, марта 1999 г., один из которых показан на рис. 1.

Совместный анализ последовательности сейсмических событий, поперечных и продольных сейсмических разрезов, карт очагов землетрясений на разные горизонты и вращаемых блок-диаграмм позволил нам выявить сейсмоактивные разломы, которые ограничивают сейсмоактивные структуры и построить карту сеймотектонического районирования (рис. 3). Разломы, субперпендикулярные к простиранию дуги, т.е. соответствующие направлению движения ТОП, подразделяют нависающий край ЕАП на отдельные сегменты, названия которых даны в подрисуночных подписях (рис. 3).

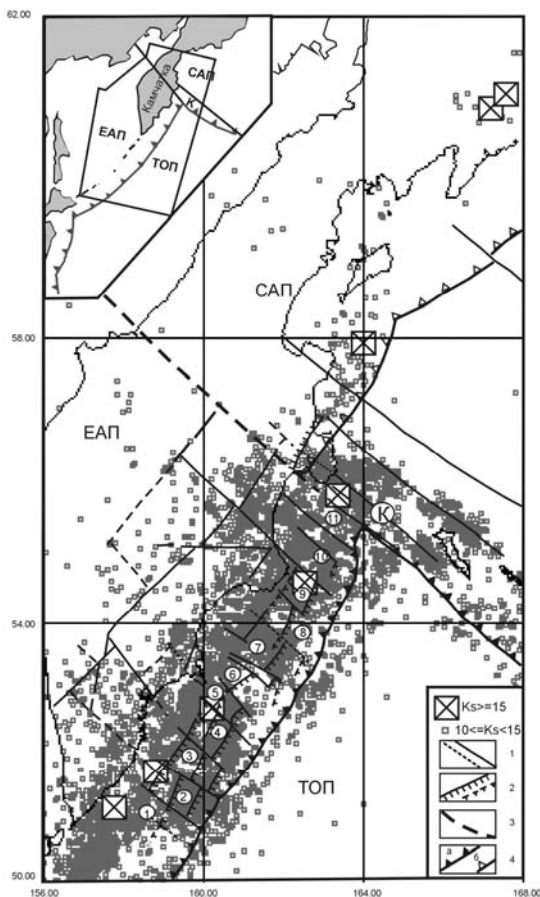


Рис. 3. Карта сеймотектонического районирования Камчатки и западного окончания Алеутской дуги.

1 – сейсмоактивные разломы (преимущественно сдвиги), 2 – сейсмоактивные взбросы и надвиги, 3 – предполагаемая граница между Евразийской и Северо-Американской литосферными плитами, 4 – оси глубоководных желобов (а) и палеожелобов (б). Цифры в кружочках: 1 – Южно-Камчатский, 2 – Ходуткинский, 3 – Южно-Авачинский, 4 – Северо-Авачинский, 5 – Южно-Шипунский, 6 – Северо-Шипунский, 7 – Южно-Кроноцкий, 8 – Центрально-Кроноцкий, 9 – Северо-Кроноцкий, 10 – Кроноцко-Усть-Камчатский, 11 – Усть-Камчатский сейсмоактивные сегменты.

Участки взаимодействия ТОП и ЕАП, так же как и сама плоскость субдукции, являются сейсмоактивными структурами 1-го порядка. Неровности на поверхности поддвигаемой плиты – подводные горы, уступы разломов представляют собой участки с более высоким коэффициентом трения, чем соседние участки, и, по-видимому, являются причиной сегментации. В таких участках предел прочности на скол и разрыв достигается позже, чем в соседних участках, покрытых океаническими илами с меньшим коэффициентом трения. Об этом свидетельствует эмпирически установленный факт приуроченности эпицентров сильных землетрясений, сопровождаемых афтершоками, к краевым частям очаговых зон афтершоков. Таким образом, сейсмоактивные сегменты и разделяющие их сейсмоактивные разломы являются структурами 2-го порядка. Эти структуры локализованы только в пределах нависающей, в данном случае Евразийской плиты.

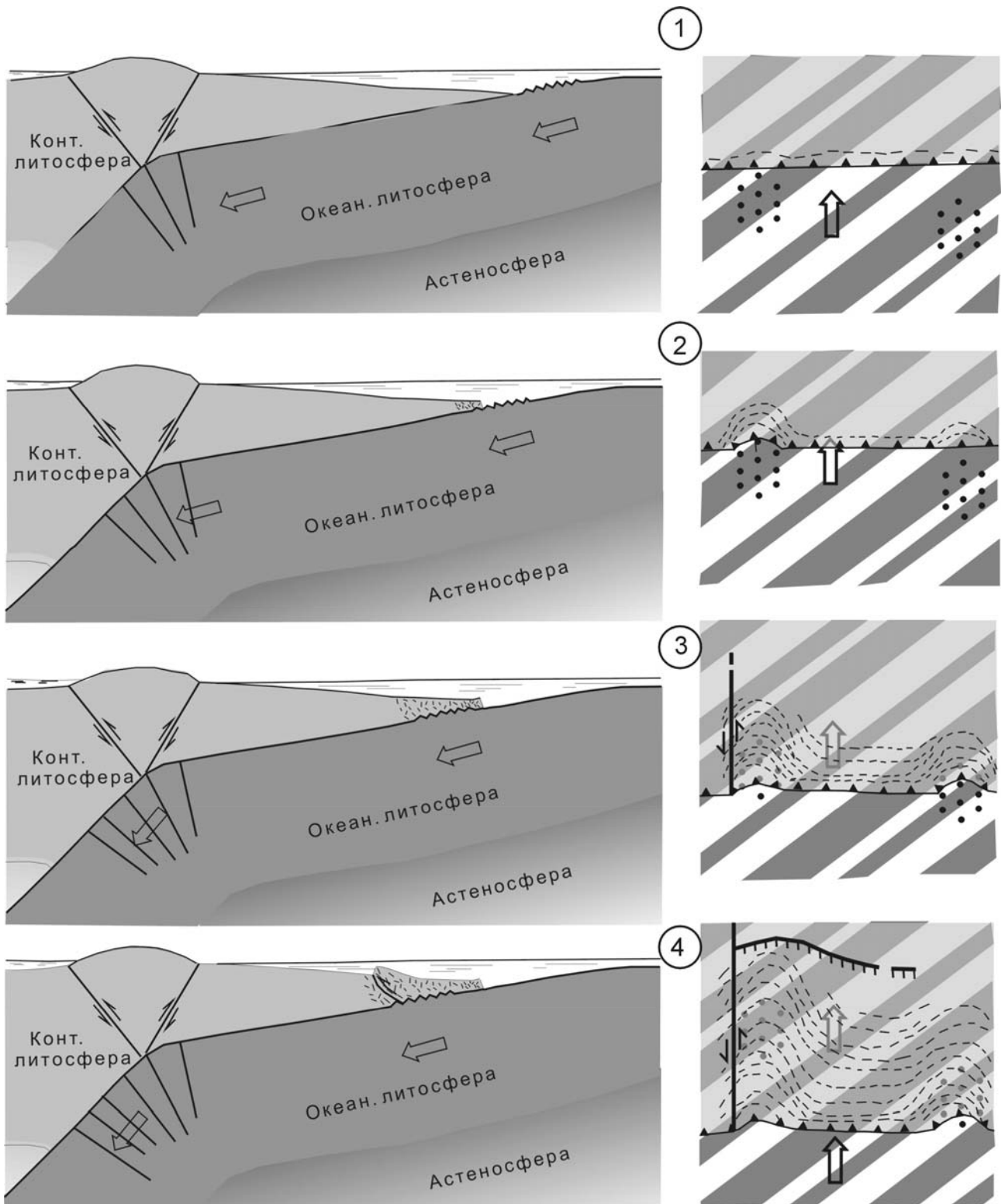
В пределах каждого сегмента выделяются 2-3 взбросо-надвиговых блока с падением плоскости сместителя на юго-восток, т.е. в противоположную относительно направления субдукции сторону. Местоположение надвиговых блоков соответствует возвышенностям или террасам на континентальном склоне глубоководного желоба. Взбросо-надвиговые блоки в пределах сегментов являются структурами 3-го порядка. В рельефе дна континентального склона Камчатки они маркируются подводными террасами и возвышенностями, которые отчетливо видны на батиметрических картах. Взбросовые подвижки отмечены при экспериментальном моделировании зон субдукции [7]. Они также обусловлены наличием на поверхности ТОП участков с повышенным коэффициентом трения, когда предел прочности на сжатие и разрыв достигается в нависающей плите раньше, чем в плоскости непосредственного взаимодействия ТОП и ЕАП. Как было сказано выше, в каждом сегменте выделяются 2-3 надвиговых блока. Чем ближе к оси глубоководного желоба расположен надвиг, тем меньше мощность ЕАП и тем меньше энергии требуется для достижения предела прочности, при прочих равных условиях, и, соответственно, меньше энергия возбуждаемого землетрясения.

Модель взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит

Предлагаемый механизм формирования сегментов и надвиговых блоков (рис. 4) в зоне ортогонального сочленения ТОП и ЕАП базируется на рассмотренных выше данных и на основных положениях модели субдукции. Источником энергии тектонических движений, сопровождаемых землетрясениями, является энергия движения ТОП. Накопление сейсмической энергии в зоне субдукции зависит от силы сцепления между поддвигаемой ТОП и нависающей (надвигаемой) ЕАП, которая, в свою очередь, зависит от коэффициента трения и массы нависающей плиты или блока. При расчлененном рельефе поддвигаемой ТОП коэффициент трения будет значительно выше, чем при равнинном рельефе с глинистыми океаническими осадками на поверхности. В последнем случае взаимодействие может выражаться в относительно равномерном движении, сопровождаемом слабыми и средними землетрясе-

ниями, и даже через криповое движение при очень низком коэффициенте трения (рис. 4-1). На начальном этапе взаимодействия участок расчлененного рельефа с высоким коэффициентом трения сминает край нависающей плиты (рис. 4-2). Дальнейшее продвижение подвигаемой плиты приводит к накоплению энергии, трещиноватости и затем сдвигу в нависающей плите на границе сильного и слабого сцепления (рис. 4-3).

При дальнейшем продвижении подвигаемой плиты в нависающей плите возникают напряжения скола, переходящие затем во взбросо-надвиг (рис. 4-4). Образование таких



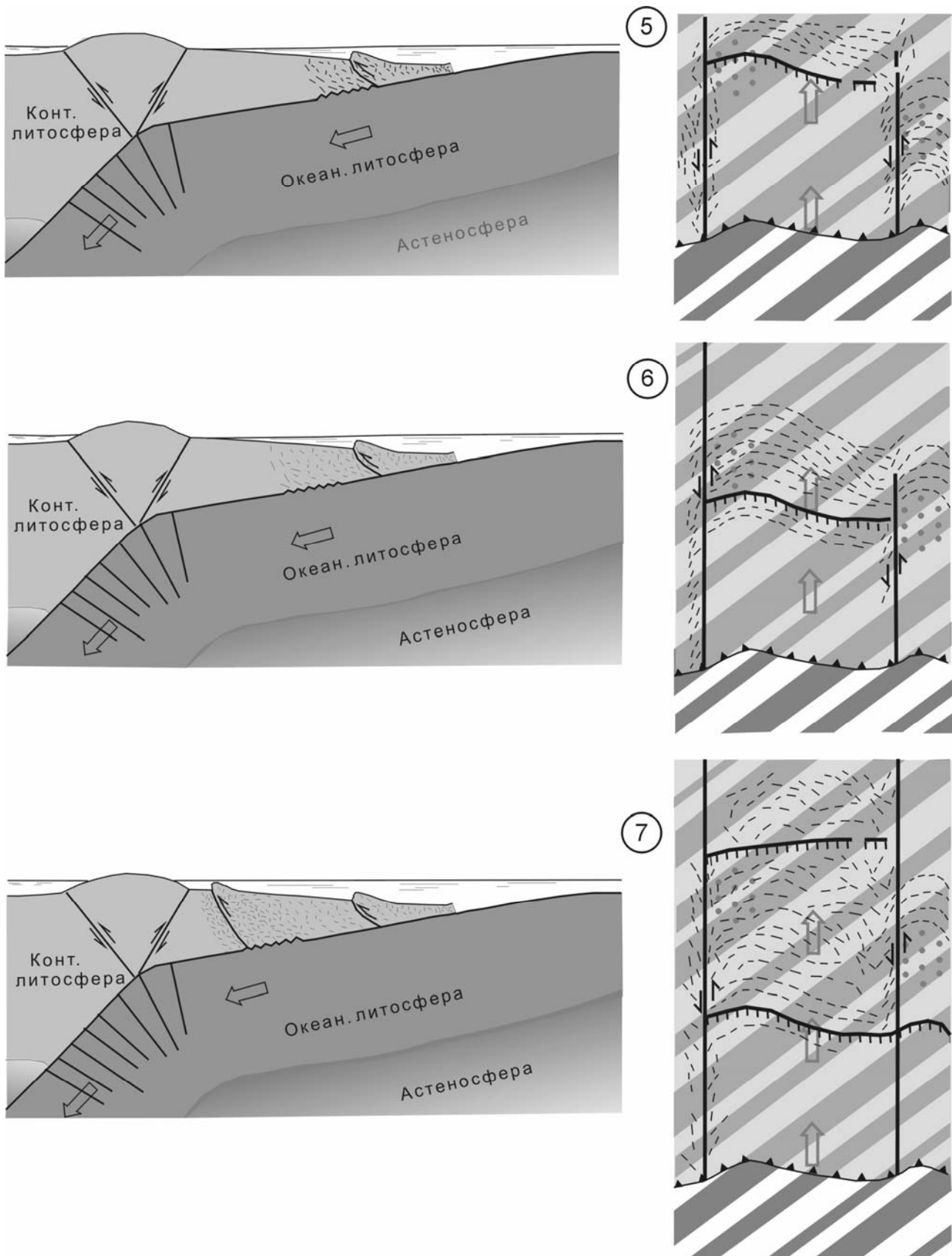


Рис. 4. Модельные разрезы и соответствующие им плановые зарисовки формирования сейсмоактивных сегментов и надвиговых блоков при ортогональном взаимодействии Тихоокеанской и Евразийской плит. На Тихоокеанской плите условно показаны полосовые магнитные аномалии. Пояснения в тексте.

взбросов подтверждено экспериментальными данными [7] и натурными наблюдениями [3]. При поддвигании соседнего участка с высоким коэффициентом трения (рис. 4-5) накаплива-

ются напряжения сдвига, переходящие в разрыв на границе слабого и сильного сцепления, как и на рис. 4-3, и в результате формируется сегмент со сдвиговыми подвижками, в данном случае правосторонними. При другом расположении участков с высоким коэффициентом трения и несколько ином характере ортогонального взаимодействия могут формироваться и левосторонние сдвиги.

После образования сегментов накопление сейсмической энергии происходит, в основном, в надвиговых блоках, т.к. сцепление между сейсмоактивными сегментами по уже сформировавшимся сдвигам значительно ниже. Происходит формирование 2-го, а иногда и 3-го надвиговых блоков (рис. 4-6, 4-7). Сейсмическая энергия возрастает с удалением от глубоководного желоба за счет увеличения массы нависающей плиты. Этим обусловлена приуроченность сильных землетрясений к зоне перегиба, где мощность и масса нависающего блока максимальны. Надвиговые блоки, расположенные ближе к глубоководному желобу, представляют опасность с точки зрения генерации волн цунами (пример землетрясений 1923 и 1952 г.) В соответствии с моделью Л.И. Лобковского [5], в них после накопления энергии и срыва происходит быстрое сползание надвиговых блоков, т.е. движение в направлении, противоположном направлению субдукции. Это движение сопровождается афтершоками.

Если рассмотренная модель взаимодействия литосферных плит верна, то для долгосрочного прогноза времени и места сильных землетрясений необходимо проводить ретроспективный анализ последовательности сейсмических событий отдельно в каждом сегменте, по возможности, с учетом рельефа поддвигаемой плиты и вероятного коэффициента трения. Проведенный нами предварительный анализ показал, что в настоящее время наибольшую опасность представляет надвиговой блок Северо-Шипунского сегмента (сегмент 6 на рис. 3), который представляет собой сейсмическую брешь после цунамигенерирующего землетрясения 1923 г. Вместе с тем, сейсмическая брешь Южно-Камчатского сегмента (сегмент 1 на рис. 3), по нашему мнению, не представляет опасности, т.к. там отсутствуют возвышенности, свидетельствующие о наличии надвиговых блоков. По-видимому, это область с малым коэффициентом трения, а в зоне перегиба этого сегмента сильные происходили в 1737 и 1993 гг., так что постсейсмическая стадия находится в самом начале. Судя по датам сильных землетрясений, продолжительность сейсмического цикла здесь превышает 200 лет.

Несколько иной характер носит трансформное взаимодействие движущейся ТОП с относительно неподвижной САП. Трансформный разлом между этими плитами является не субвертикальным, а имеет наклон в сторону САП, что обусловлено субдукцией на более восточных участках Алеутской дуги. Наклонный характер этого разлома подтверждается положением гипоцентров афтершоков сильного землетрясения 1971 г. с $M=7,8$ на границе этих плит в течение первых 12 часов. Тормозящий эффект относительно неподвижной САП на движущуюся ТОП привел к откалыванию Командорской микроплиты от САП по разлому

Беринга (рис. 2). Командорская микроплита «едет» на Тихоокеанской плите, испытывая правосторонний поворот. Движение Командорской микроплиты со скоростью около 37 мм/год зафиксировано сетью JPS-станций [4] после землетрясения 1997 г. с $M=7,8$. Этот же тормозящий эффект приводит к растяжению ТОП, перпендикулярному к направлению ее движения с образованием мантийных окон (mantle windows). Одно из таких мантийных окон, по видимому, располагается под Ключевской группой вулканов, в связи с чем здесь наблюдается аномально высокая вулканическая активность и повышенная магнезиальность лав. Характер взаимодействия плит в Алеутско-Камчатском регионе показан на блок-диаграмме (рис. 5). В результате тормозящего эффекта САП на ТОП происходит отделение Командорской микроплиты от САП, а в ТОП происходит растяжение вплоть до разрывов и формирования мантийных окон. Некоторые литосферные блоки отделяются от края ТОП, погружаются в мантию и при разогревании могут образовать небольшой мантийный плюм.

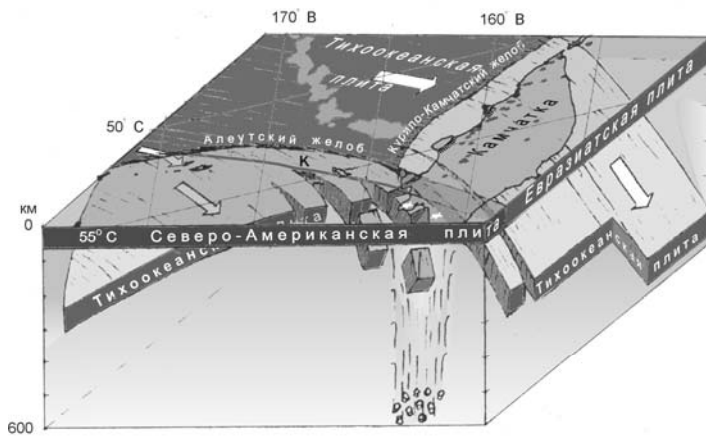


Рис. 5. Трехмерная модель геодинамики Алеутско-Камчатского сочленения, вид с северо-запада. Пояснение в тексте.

Заключение

На основе сейсмологических и морфоструктурных данных проведено сеймотектоническое районирование зоны взаимодействия ТОП, ЕАП и САП с выделением сейсмоактивных сегментов и надвиговых блоков. Предложена концептуальная модель сегментации и формирования надвиговых блоков. Ретроспективный анализ последовательности сейсмических событий в каждом из выделенных сегментов и надвиговых блоков позволит более точно прогнозировать место и время следующих сильных землетрясений.

Проведенный нами предварительный анализ показывает, что в настоящее время наибольшую опасность представляет Северо-Шипунский сегмент, где сейсмическая брешь оказалась не заполненной ни после Шипунского землетрясения 1992 г., ни после Кроноцкого землетрясения 1997 г. Здесь возможно возобновление движений по надвиговому блоку и цунамигенерирующее землетрясение, аналогичное землетрясению 1923 г.

Представляется целесообразным продолжить изучение механизма взаимодействия в зоне тройного сочленения плит, где отмечается наведенное движение Командорской микроплиты, отколовшейся от Северо-Американской плиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Мировой океан» подпрограмма «Исследование природы Мирового океана», договор 43.634.11.0004/3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А. Тектоническое развитие и вулканотектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы // Геотектоника. 2002. № 4. С. 64-80.
3. Балакина Л.М. Землетрясения Тихого океана (пространственное расположение и процессы в очагах) // Геотектоника. 1983. № 5. С. 20-37.
4. Левин В.Е., Гордеев Е.И., Бахтиаров В.Ф. и др. Предварительные результаты GPS мониторинга на Камчатке и Командорских островах. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 3-11.
5. Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 251 с.
6. Лобковский Л.И., Баранов Б.В. Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // ДАН СССР. 1984. Т. 275. № 4. С. 7-17.
7. Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г., Шеменда А.И. Моделирование деформаций островных дуг, приводящих к образованию тектонических террас и возникновению цунамигенных землетрясений // ДАН СССР. 1980. Т. 255. № 1. С. 74-77.
8. Селиверстов Н.И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.
9. Селиверстов Н.И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.
10. Селиверстов Н.И. Структура сейсмофокальной зоны Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1 (9). С. 10-26.
11. Федотов С.А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Труды Ин-та физики Земли АН СССР. 1965. № 36. С. 66-93.

12. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмологическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121-150.
13. 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.
14. 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.

УДК 551.242.3

**СМАГИНСКИЙ ПАЛЕОГАЙОТ В АККРЕЦИОННОЙ СТРУКТУРЕ
ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ**

О.Л. Савельева, Д.П. Савельев

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пуйна, 9, e-mail: savelyev@kscnet.ru

Фундамент современной Курило-Камчатской островодужной системы включает мел-палеогеновые образования различного генезиса – окраинно-континентального, островодужного, океанического. В аккреционной структуре Восточной Камчатки можно выделить несколько комплексов, отдельные части которых являются фрагментами палеоокеанической коры: смагинский комплекс альб-сеноманского возраста, моховской комплекс кампанского возраста, доэоценовый ганальский комплекс и нижняя часть ветловского палеоцен-эоценового комплекса [9, 14]. Признаками океанического происхождения комплексов являются: (1) присутствие осадочных пород, накопившихся вдали от окраин континентов, – кремней, известняков, железомарганцевых образований; и (2) наличие базальтов типа MORB и OIB с характерными геохимическими чертами – высокой титанистостью, отсутствием тантала-ниобиевого минимума и др. Среди этих палеоокеанических комплексов можно выделить образования, сформированные над горячими точками в пределах океанической плиты. Для них характерно присутствие в офиолитовой ассоциации щелочных базальтов типа OIB. Геоморфологически данные образования представляли собой океанические плато, острова или подводные горы, поверхность которых находилась выше критической глубины карбонатонакопления, поэтому одним из признаков, по которым их можно выделить, является наличие среди осадочных пород известняков. Таким требованиям удовлетворяют меловые образования, изученные нами на п-ове Камчатский Мыс.

Геологическое строение южной части п-ова Камчатский Мыс отличается от строения