

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ: СЕЙСМООПАСНОСТЬ И ЦУНАМИОПАСНОСТЬ НА КАМЧАТКЕ*Авдейко Г.П.^{1,2}, Палуева А.А.¹**¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
gavdeiko@kscnet.ru**²Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский*

В статье, на основании ретроспективного анализа землетрясений, рассмотрены вопросы сейсмотектонического районирования, т.е. выделения сейсмоактивных тектонических структур, механизма их формирования, и дан анализ сейсмоопасности и цунамиопасности.

В работе использован каталог землетрясений Камчатки, составленный и пополняемый Камчатским филиалом Геофизической службы РАН по наблюдениям региональной сети сейсмических станций, начиная с 1962 г. Для оценки энергии землетрясений в каталоге применяется шкала энергетических классов (K_s) С.А.Федотова. Мы, в основном, использовали данные по землетрясениям с $K_s \geq 9$, так как уверенно регистрируются землетрясения, начиная с $K_s = 8.5$. За почти 45-летний период наблюдений в координатах 50° - 57° с.ш. 157° - 167° в.д. произошло более 23 000 землетрясений с $K_s \geq 9$. 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 до 50 км. На практике обеспечивается более высокая точность взаиморасположения очагов землетрясений за счет постоянства сети наблюдений и методики обработки [9]. Для анализа структурной приуроченности очагов землетрясений мы использовали данные по всем землетрясениям, а для более детальных построений выбирали те из них, точность определения глубины которых ≤ 10 км. По сильным землетрясениям, произошедшим в XX веке, использовались данные каталога [6]. При сопоставлении сейсмоактивных структур с морфоструктурами континентального склона Восточной Камчатки была использована батиметрическая карта Камчатско-Командорского региона [7]. 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.

Сейсмотектоническое районирование проводилось на основании анализа пространственного положения очагов землетрясений и последовательности сейсмических событий, в том числе и в анимационном режиме. С помощью пакета программ ArcView и авторских программ были построены карты эпицентров землетрясений на каждый год (1962-2006), а при выявлении скоплений эпицентров, выстраивающихся в определенном порядке, – по месяцам (более 400 карт). Для семи сильных землетрясений, сопровождаемых афтершоками, и пяти роев землетрясений были построены аналогичные карты по часам, дням и неделям в интервалах от полугода до года. Например, для Кроноцкого землетрясения 1997 г., $M = 7.9$ было построено 49 карт. Рассмотрение сейсмических событий в анимационном режиме позволило реконструировать движения по отдельным разломам. Для выявления особенностей распределения очагов по глубине строились карты очагов землетрясений на разные горизонты (0-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-50; 50-100; 100-200; 200-300; 300-400; более 400 км), а также поперечные и продольные сейсмические разрезы. Для выявления приуроченности землетрясений к конкретным тектоническим структурам использовалась методика построения трехмерных вращаемых диаграмм с помощью пакета программ Maple 7. Мы построили блок-диаграммы по годам (1962–2005 гг.). Более детальные блок-диаграммы на участки проявления афтершоков сильных землетрясений и роев землетрясений строились с учетом и без учета энергии землетрясений, а также с учетом последовательности афтершоков и роев землетрясений. При анализе движений по отдельным блокам мы использовали данные по механизмам очагов сильных землетрясений, определенных в Гарвардском университете (США), а также результаты работы [10], в которой обобщены данные 205 определений механизмов очагов землетрясений по Камчатской зоне субдукции.

Сейсмотектоническое районирование (рис. 1) проведено на основании пространственно-временных соотношений сейсмических событий с учетом классических представлений модели субдукции, концепции сейсмических брешей и сейсмических циклов [8], взбросового механизма очагов большого числа сильных землетрясений [2] и клавишно-блоковой модели [3, 4],

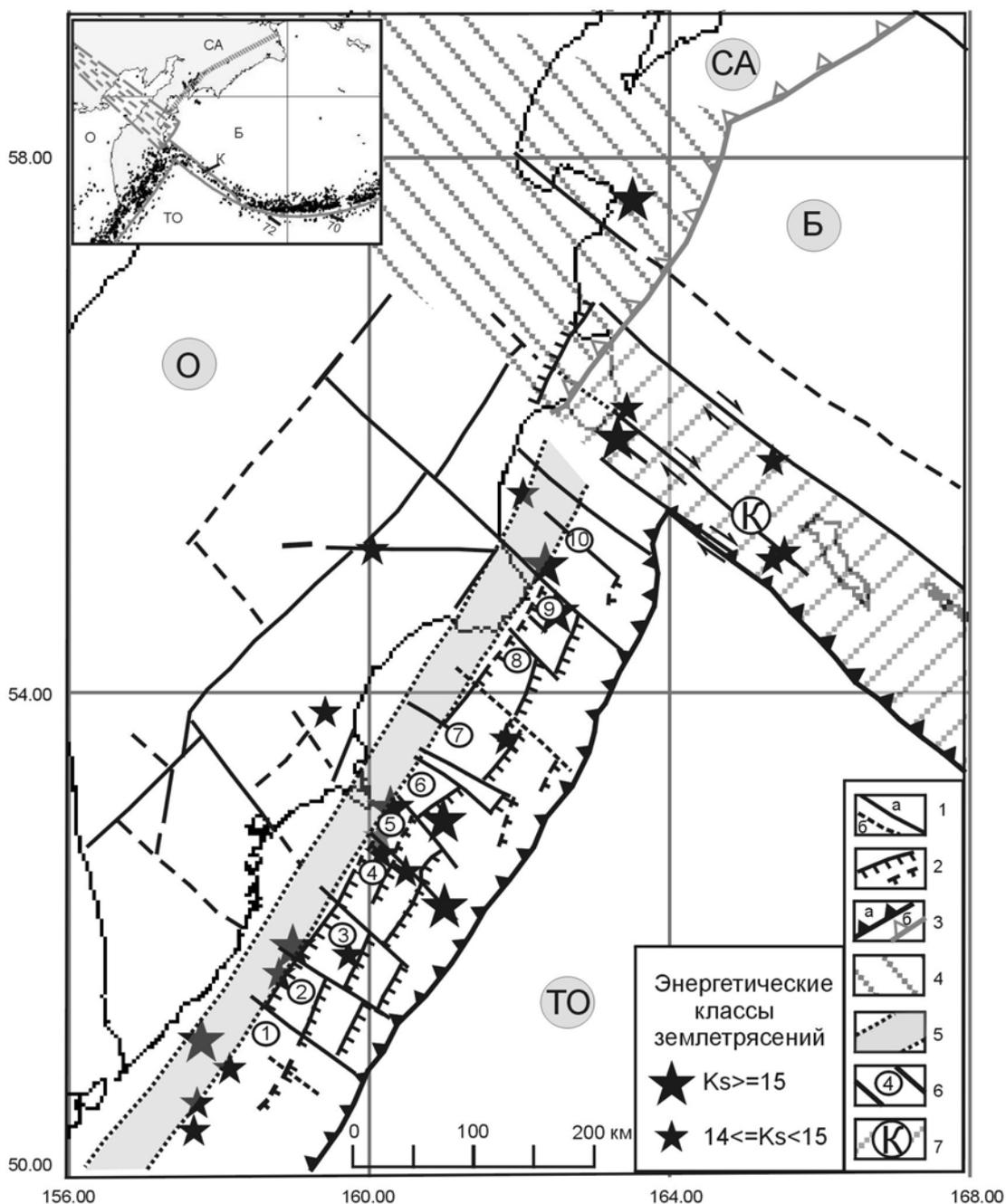


Рис. 1. Сейсмотектоническое районирование Камчатской субдукционной системы.

1 – отчетливо проявленные (а) и слабо проявленные (б) сейсмоактивные сбросы и сдвиги; 2 – проявленные (а) и предполагаемые (б) сейсмоактивные взбросы; 3 – оси глубоководных желобов (а) и палеожелобов (б); 4 – рассеянная (дисперсная) граница между Охотской и Северо-Американской плитами; 5 – зона резкого изгиба Тихоокеанской плиты; 6 – сейсмоактивные сегменты и их номера: 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 – Усть-Камчатский; 7 – Командорская микроплита. В серых кружочках: Б – Берингия, О – Охотская, СА – Северо-Американская и ТО – Тихоокеанская плиты.

синтезирующей указанные выше концепции и модели. В пределах сейсмофокальной зоны (СФЗ) Камчатки выделяется субгоризонтальная ветвь СФЗ на глубинах до 50 км, которая протягивается полосой шириной около 200 км между глубоководным желобом и восточным побережьем Камчатки, и наклонная ветвь, которая имеет вид пластины толщиной 40-50 км, падающей под Камчатку с постоянным углом около 50° [1, 9]. Большинство очагов всех землетрясений, произошедших за период инструментальных наблюдений, приурочено к субгоризонтальной ветви СФЗ. В ее пределах, где погружающаяся под углом $10-12^\circ$ Тихоокеанская плита (ТО)

взаимодействует с нависающей Охотской плитой, хорошо проявлены разломы северо-западного простирания, соответствующие направлению движения ТО (рис. 1). Эти разломы, по-видимому, представляют собой сдвиги, разделяющие субгоризонтальную ветвь СФЗ на отдельные сегменты. Разломы маркируются выстраивающимися в линию очагами землетрясений, проявленными за короткие интервалы времени, а также краевыми частями очаговых зон сильных землетрясений [1]. Максимум проявления числа землетрясений и все сильные землетрясения магнитудой более 7 локализованы в зоне пересечения субгоризонтальной и наклонной ветвей СФЗ. В свою очередь, в пределах этой зоны максимум очагов землетрясений приурочен к горизонту 30-40 км. В структурном плане эта зона соответствует резкому изгибу поддвигаемой ТО при упоре ее в Охотскую плиту, где угол субдукции увеличивается с 10-12° до 50°. Эта зона соответствует фронтальной тектонической дуге, которая характеризуется положительной гравитационной аномалией в изостатической редукции.

Между полосой максимальной сейсмической активности в зоне изгиба ТО и глубоководным желобом располагается вторая прерывистая полоса увеличения числа и энергии землетрясений. Пространственно она совпадает с подводными возвышенностями, наблюдаемыми на батиметрической карте Н.И. Селиверстова [7]. К этой полосе приурочено два сильных цунамигенерирующих землетрясения 1923 и 1952 г., а также Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. ($M = 7.9$).

Практически всем пятнам сгущения очагов землетрясений второй полосы соответствуют надвиговые подвижки, сопровождаемые сильными землетрясениями и роями землетрясений. Азимуты падения плоскостей сместителя юго-восточные, а углы падения, определенные на вращаемых по программе Maple 7 блок-диаграммах, колеблются в пределах 45°. В двух случаях, при роевых землетрясениях февраля 1983 г. и августа-сентября 1994 г., угол падения плоскости сместителя уменьшается до 35-40°. Взбросовый характер механизмов очагов таких землетрясений впервые был отмечен Л.М. Балакиной [2], а взбросовые подвижки зарегистрированы при экспериментальном моделировании зон субдукции [5].

Предлагаемая модель ортогонального взаимодействия Тихоокеанской и Охотской плит (рис. 2) объясняет условия образования наблюдаемых сеймотектонических структур.

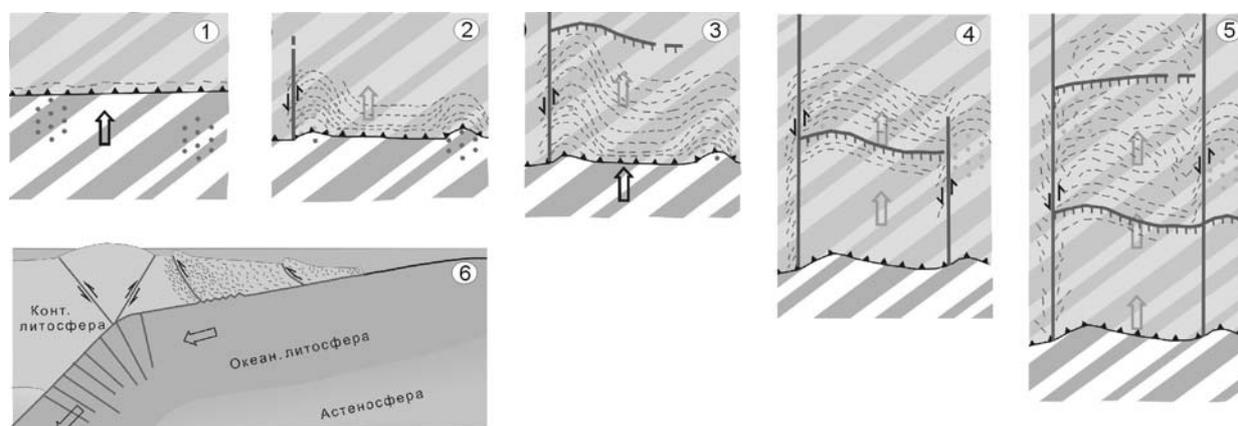


Рис. 2. Модель формирования сегментации и надвиговых блоков внутри сегментов при поддвигании океанической плиты под континентальную. На океанической плите условно показаны полосовые магнитные аномалии, просвечивающиеся под континентальной плитой, а точками – неровности рельефа (участки сильного сцепления).

С точки зрения причинно-следственных связей, плоскость взаимодействия поверхности поддвигаемой ТО и подошвы Охотской плиты представляет собой структуру 1-го порядка. Сейсмоактивные сегменты и разделяющие их сейсмоактивные разломы являются структурами 2-го порядка. Эти структуры локализованы только в пределах нависающей Охотской плиты. Взбросо-надвиговые блоки в пределах сегментов являются структурами 3-го порядка. Источником энергии тектонических движений, сопровождаемых землетрясениями, является движение ТО. Накопление сейсмической энергии в зоне субдукции зависит от силы сцепления между поддвигаемой ТО и нависающей Охотской плитой и от давления, которое оказывает нависающая плита на поддвигаемую плиту. При расчлененном рельефе поддвигаемой ТО коэффициент трения будет значительно выше, чем при пологом рельефе с глинистыми океаническими осадками на

поверхности. В последнем случае взаимодействие может выражаться в относительно равномерном движении, сопровождаемом слабыми и средними землетрясениями (рис. 2.1). На начальном этапе поддвигания участка расчлененного рельефа происходит смятие переднего края нависающей плиты. Дальнейшее продвижение поддвигаемой плиты приводит к накоплению энергии, трещиноватости и затем сдвигу в нависающей плите на границе сильного и слабого сцепления (рис. 2.2). При дальнейшем движении поддвигаемой плиты в нависающей плите возникают напряжения скола, переходящие затем во взброс или надвиг (рис. 2.3). При поддвигании соседнего участка с высоким коэффициентом трения (рис. 2.4) накапливаются напряжения сдвига, переходящие в разрыв на границе слабого и сильного сцепления, как и на рис. 2.3, и в результате формируется сегмент со сдвиговыми подвижками. После образования сегментов накопление сейсмической энергии происходит, в основном, в надвиговых блоках, так как сцепление между сейсмоактивными сегментами по уже сформировавшимся сдвигам значительно слабее. Происходит формирование 2-го, а иногда и 3-го надвиговых блоков (рис. 2.5). Сейсмическая энергия возрастает с удалением от глубоководного желоба за счет увеличения давления нависающей плиты. Этим, а также наличием упора в литосфере Охотской плиты, обусловлена приуроченность сильных землетрясений к зоне изгиба ТУ, где мощность и давление нависающего блока максимальны. Надвиговые блоки представляют опасность с точки зрения генерации волн цунами (пример землетрясений 1923 и 1952 г.). С позиции рассмотренной модели, 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.

Ретроспективный анализ сейсмических событий в сейсмоактивных сегментах (рис. 3) показал следующие результаты:

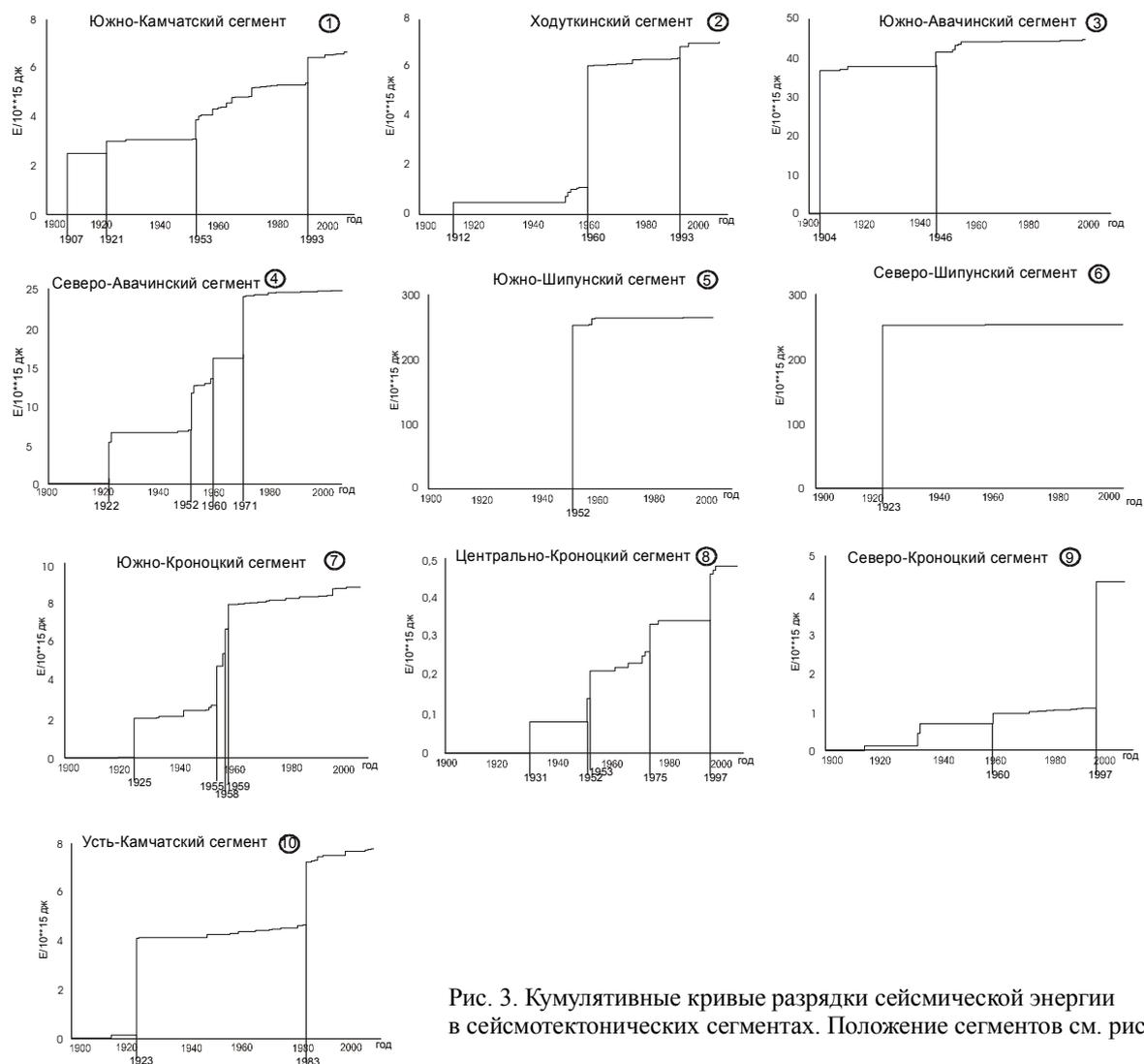


Рис. 3. Кумулятивные кривые разрядки сейсмической энергии в сеймотектонических сегментах. Положение сегментов см. рис. 1.

1. Максимальная сейсмическая активность, как по числу землетрясений, так и по выделившейся сейсмической энергии, приурочена к зоне резкого изгиба субдуцируемой Тихоокеанской плиты (рис. 1, 3). Эта зона ведет себя как единая структура независимо от сегментации и представляет собой выдавливаемый вверх клин, чем и обусловлена положительная изостатическая аномалия. Эта зона и в будущем будет представлять наибольшую опасность с точки зрения генерации сильных землетрясений. Особенно это относится к участкам Шипунского и Кроноцкого полуостровов, где возможно соскальзывание вниз надвиговых блоков. Формирующиеся при этом подводные оползни будут сопровождаться гигантскими цунами с катастрофическими последствиями.

2. Формирование надвиговых блоков в пределах сегментов сопровождается образованием тектонических террас и поднятий непосредственно над зоной надвига. Такие поднятые морфоструктуры являются показателем того, что в этом месте может произойти цунамигенерирующее землетрясение, а их превышение над дном – показателем магнитуды землетрясения, особенно, если поднятие совпадает с сейсмической брешью.

3. Сейсмическая брешь, приуроченная к подводной возвышенности в Северо-Шипунском сегменте, представляет, на наш взгляд, наибольшую опасность с точки зрения проявления сильного цунамигенерирующего землетрясения. Здесь в 1923 г. произошло землетрясение, сопровождаемое цунами с катастрофическими последствиями, и с тех пор идет накопление сейсмической энергии.

4. Несмотря на наличие сейсмической бреши, Южно-Камчатский сегмент, по-видимому, не представляет опасности с точки зрения проявления сильных землетрясений, за исключением зоны изгиба ТО, так как здесь наблюдается спокойный рельеф и сейсмическая энергия реализуется в виде слабых землетрясений.

Мы благодарим сотрудников Камчатского филиала Геофизической службы РАН за предоставленные материалы. Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Мировой океан», тема 4, договор № 43.634.11.0004/3. Материалы исследований отражены в годовых и итоговом отчетах, переданных в Камчатский Филиал ГС РАН.

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. Балакина Л.М. Землетрясения Тихого океана (пространственное расположение и процессы в очагах) // Геотектоника. 1983. №5. С. 20-37.
3. Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 251 с.
4. 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.
5. 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.
6. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древних времен до 1975 г. /Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шабалин. М.: Наука, 1977. 536 с.
7. Селиверстов Н.И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.
8. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмологическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С.121-150.
9. 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.
10. Christova C. Depth distribution of stress in the Kamchatka Wadati-Benioff zone inferred by inversion of earthquake focal mechanisms // Journ. of Geodynamics. 2001. №31. P. 355-372.