

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ, БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНЫХ КУРИЛ

Р.Г. Кулинич, М.Г. Валитов, З.Н. Прошкина

ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43, г. Владивосток, 690041; e-mail: rkulinich@mail.ru

Поступила в редакцию 26 марта 2012 г.

На основе совместного анализа геофизических и сейсмологических данных выявлена связь сильнейших землетрясений 2006, 2007, а также 2009 гг., произошедших в районе Центральных Курил, с блоковой структурой земной коры этого района. Показано, что афтершоки сильнейших землетрясений 2006 и 2007 гг. стали форшоками, соответственно, для землетрясений 2007 и 2009 гг. Общая совокупность землетрясений, произошедших в данном районе в период с 2006 г. по 2012 г., пространственно тесно связана с ранее выявленной здесь тектонической зоной деструктивного характера, уточняет ее положение и объективно подтверждает ранее высказанное мнение о ее наложенном и секущем характере относительно Курильской дуги.

Ключевые слова: землетрясения, геофизические поля, блоковая структура, хр. Витязя, Курильский желоб, Центральные Курилы.

ВВЕДЕНИЕ

В 2005 г. геолого-геофизической экспедицией, выполненной Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичева ДВО РАН совместно с Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН на НИС “Академик М.А. Лаврентьев” (рейс № 37), в районе Центральных Курил, на месте длительного сейсмического затишья (сейсмической брешы), была выявлена деструктивная зона рифтогенного типа, наложенная на основные морфоструктуры фронтального склона Курильской островной гряды [2, 3]. В последующем здесь были проведены еще две геолого-геофизические экспедиции, в задачу которых входила детализация ранее выполненных исследований (НИС “Академик М.А. Лаврентьев”, рейсы № 41, 2006 г. и № 52, 2010 г.). На этой основе с учетом информации, заимствованной из предшествующих многолетних исследований [6 и др.], для данного района создана большая база геолого-геофизических данных и результатов их интерпретации, куда вошли карты гравитационных и магнитных аномалий, мощности осадочных отложений и рельефа акустического фундамента; собрана также большая коллекция образцов коренных пород и осадков, определены вещественный состав, физические свойства, возраст и условия формирования изученных геологических

комплексов (рис. 1). На этой основе построена структурная схема и геологическая карта района Центральных Курил и его флангов [2,4].

На базе полученных данных был сделан первоначальный вывод, что длительное отсутствие сильнейших землетрясений в данном районе связано с его интенсивной блоковой раздробленностью, в условиях которой напряжения, накапливаемые относительно небольшими блоками, реализуются сейсмическими событиями умеренных магнитуд, вместе с тем сильнейшие землетрясения не исключены в случае группирования нескольких сейсмогенных блоков [3].

Не прошло и полугодия после второй экспедиции, как этот район был потрясен двумя сильнейшими землетрясениями – в ноябре 2006 г. ($M = 8.3$) и январе 2007 г. ($M = 8.2$) с гипоцентрами на глубинах, по разным оценкам, 7–13.5 км [5]. Первое землетрясение произошло в пределах деструктивной зоны ($\varphi = 46.6^\circ$, с.ш., $\lambda = 153.2^\circ$ в.д.), а второе – на ее продолжении, в пределах океанического борта глубоководного желоба ($\varphi = 46.29^\circ$ с.ш., $\lambda = 154.49^\circ$ в.д.). В 2009 г. в непосредственной близости от рассматриваемой зоны произошли еще два сильных землетрясения, одно в пределах океанического борта глубоководного желоба, северо-восточнее землетрясения 2007 г. ($\varphi = 46.97^\circ$ с.ш., $\lambda = 155.16^\circ$ в.д., $M = 7.4$) с глу-

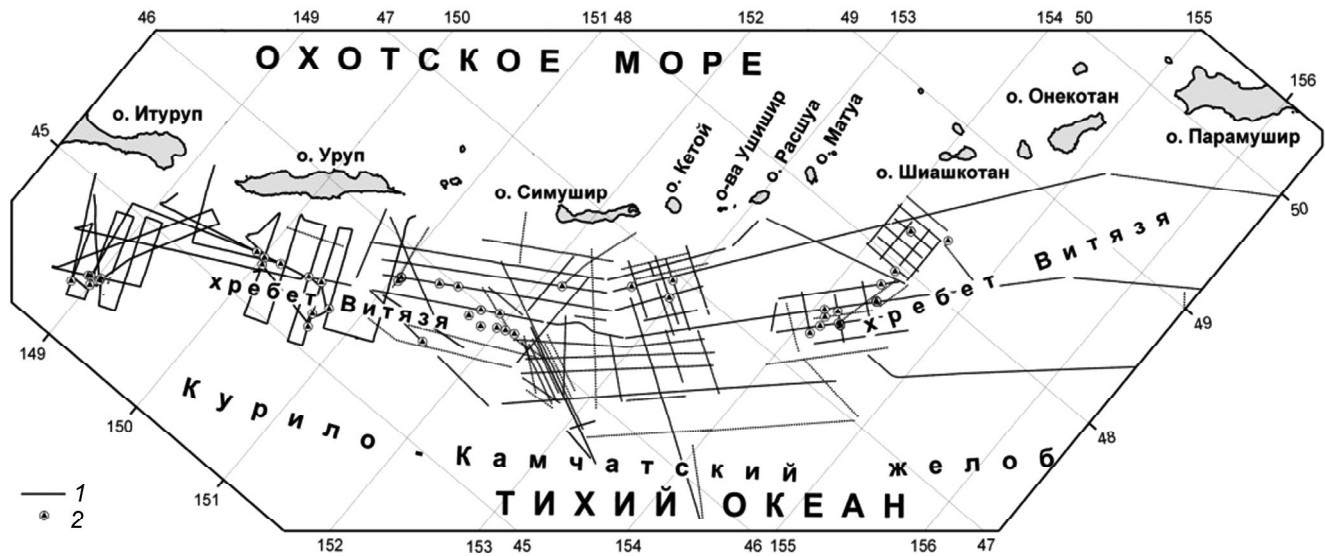


Рис. 1. Схема геолого-геофизической изученности фронтального склона Курильской островной дуги за период 2005–2010 гг.

1 – профили геофизических работ, 2 – станции геологического опробования (драгирование).

биной гипоцентра 36 км, и западнее пролива Буссоль на северном склоне хребта Витязя ($\varphi = 46.17^\circ$ с.ш., $\lambda = 151.55^\circ$ в.д., $M = 6.9$) с глубиной гипоцентра 31 км.

Указанные события закрыли существовавшую сейсмическую брешь и дали основание предполагать, что длительное сейсмическое затишье означало не стагнацию тектонических процессов в этом районе, а лишь накопление сейсмогенной энергии для дальнейшего развития деструктивных процессов в этом районе.

Мелкофокусный характер указанных землетрясений дал основание для поисков их связи с глубинным строением земной коры в этом районе [1].

Этот же фактор позволил предположить, что пространственное положение их очагов должно коррелироваться с аномалиями геофизических полей и блоковой структурой фундамента, определенной по комплексу геофизических данных. Исследование указанной связи открывает возможность увязки коровой сейсмичности со структурно-тектонической ситуацией района, что, в свою очередь, позволяет оценить размеры и положение сейсмогенных блоков, а также лучше понять дислокационную кинематику сейсмического процесса. В настоящей статье приводятся результаты исследования, выполненного авторами в этом направлении.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходным материалом для работы послужил каталог землетрясений, составленный Национальным

центром информации о землетрясениях Геологической службы США (NEIC USGS), а также карты гравитационных и магнитных аномалий и карта рельефа акустического фундамента района исследований, полученных нами в ранее выполненных экспедициях.

На первом этапе были совмещены эпицентры главных событий указанных выше землетрясений с картами гравитационных и магнитных аномалий, а также с картой рельефа акустического фундамента, построенной по данным сейсмических работ. Во всех случаях эпицентры землетрясений расположились на границах блоков фундамента, выделенных по комплексу геофизических данных, что соответствует зонам коровых разломов. Наиболее четко блоковая структура проявлена в рельефе акустического фундамента и гравитационном поле. Из них для иллюстрации выявленной совместимости выбрано гравитационное поле, как наиболее полно и достаточно детально отражающее блоковую структуру исследуемого района (рис. 2). По данным NEIC USGS погрешности определения координат эпицентров землетрясений 2006–2009 гг. располагаются в интервале ± 3.6 – 4.8 км (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/>). Ширина градиентных зон гравитационных аномалий, отражающих границы блоков, на разных участках составляет 10 и более километров, что существенно перекрывает величину погрешности определения координат эпицентров. Это исключает случайность совмещения эпицентров землетрясений с градиентными зонами и делает наш вывод обоснованным.

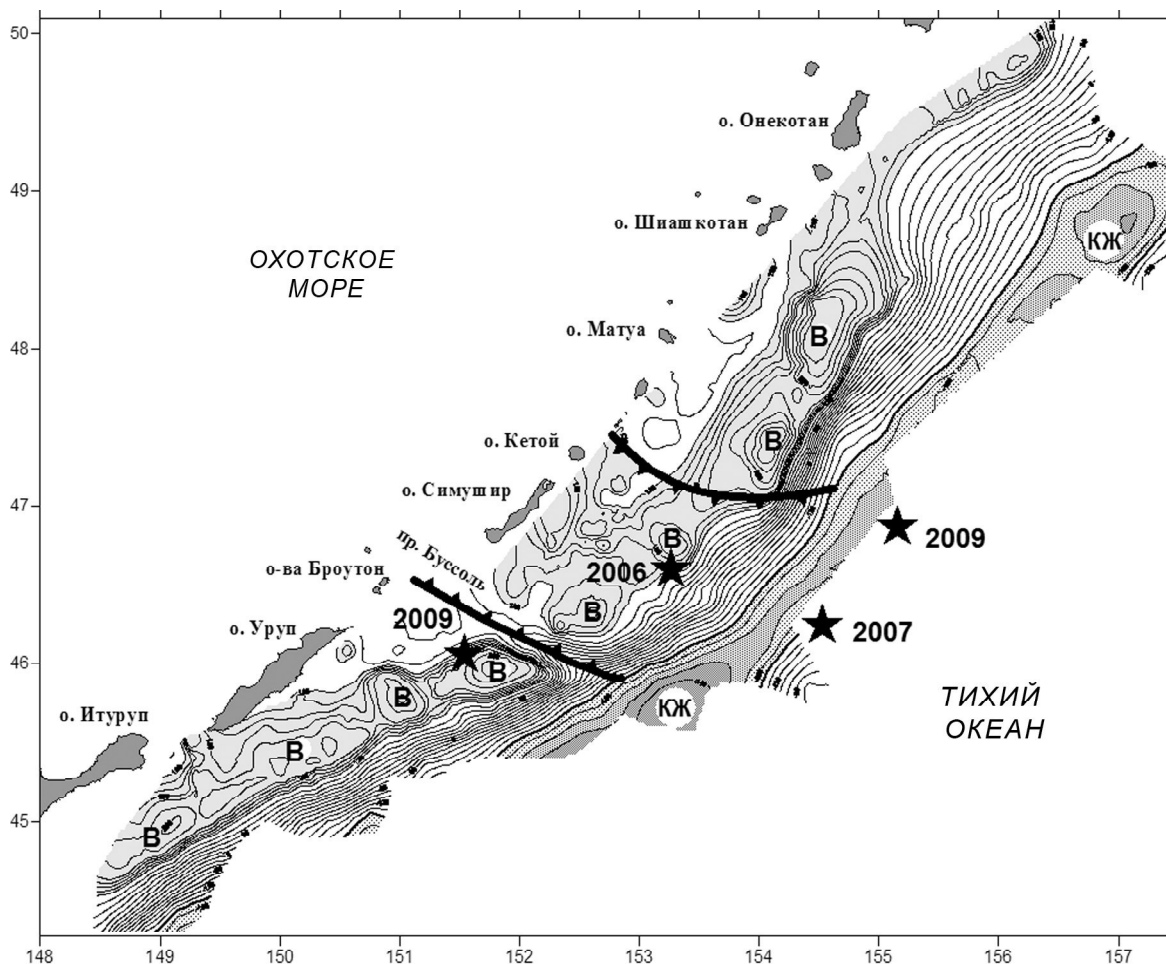


Рис. 2. Гравитационные аномалии в свободном воздухе, блоки фундамента и эпицентры основных толчков землетрясений 2006–2009 гг.

В – блоки фундамента подводного хр. Витязя; КЖ – Курильский желоб. Жирные линии с бергштрихами – границы зоны активной тектонической деструкции фронтального склона Курильской дуги. Звездочками обозначены эпицентры землетрясений с указанием года этих событий.

Далее для анализа были использованы афтершоки, происходившие в течение недели после каждого основного события. Было выполнено аналогичное совмещение афтершоков с геофизическими данными отдельно для 2006, 2007 и 2009 гг. и в совокупности за периоды 2009–2011 гг. и 2006–2011 гг. Для иллюстрации полученных результатов также использована карта гравитационных аномалий и частично рельеф дна изучаемого района.

На рис. 3 показано размещение афтершоков 2006 (А) и 2007 (Б) годов. Визуальный анализ афтершоков 2006 г. (рис. 3А) показывает, что они образуют две зоны, простирающиеся в северо-восточном направлении. Это было отмечено еще в предшествующих работах [7, 8]. Одна из этих зон протягивается преимущественно вдоль океанического борта Курильского желоба, вторая локализована на фронтальном

склоне Курильской гряды. Расположение афтершоков внутри каждой из этих зон имеет свои примечательные особенности, что делает их различными. Так, зона океанического борта желоба образована плотной совокупностью афтершоков и ориентирована вдоль простираня глубоководного желоба. Напротив, размещение афтершоков островного склона имеет относительно рассеянный характер, отражая сложную картину блоковой раздробленности этого участка. Большая часть афтершоков располагается в пределах поперечной зоны деструкции. Их остальная часть расположилась только северо-восточнее этой зоны, охватив ближайшие бортовые участки хр. Витязя. За пределами юго-западной границы зоны деструкции, роль которой выполняет грабен пролива Буссоль, афтершоки практически отсутствуют. Это свидетельствует о том, что блоковая неус-

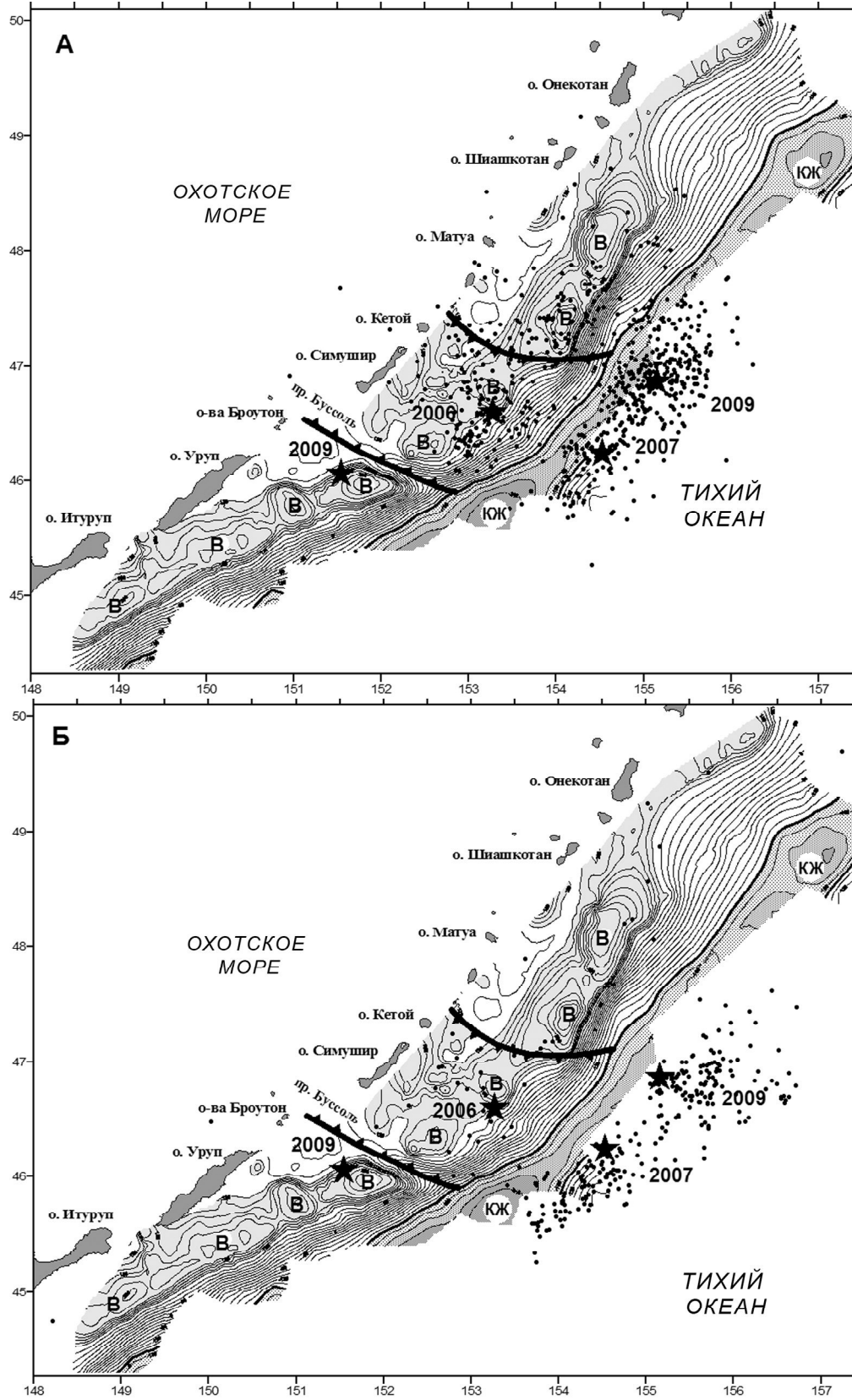


Рис. 3. Афтершоки землетрясений 2006 (А) и 2007 (Б) г.г. в поле гравитационных аномалий и блоковой структуре (обозначены точками).

Другие условные обозначения см. на рис. 2.

тойчивость к моменту указанного события имела место только северо-восточнее грабена Буссоль, в зоне сейсмического затишья и далее на северо-восток вдоль простираения Курильской системы дуга-желоб.

Зона афтершоков, располагающаяся в пределах желоба, имеет свои примечательные особенности. Визуально она состоит из двух групп эпицентров, обособляющихся вблизи будущих сильных землетрясений 2007 и 2009 гг.

Основное количество афтершоков землетрясения 2007 г. (рис. 3Б) локализовано в пределах океанического борта глубоководного желоба, визуально также составляя две группы эпицентров, сосредоточенных вблизи главного события 2007 г. и вблизи будущего землетрясения, состоявшегося в 2009 г. Афтершоки указанного землетрясения в меньшем количестве имели место и на островном склоне желоба, располагаясь, в основном, в пределах поперечной зоны деструкции.

Наконец, землетрясения 2009 гг., происшедшие на океаническом борту желоба и на северо-западной границе южного фрагмента подводного хр. Витязя, имели незначительное количество афтершоков, которые расположились только вблизи основных сейсмических событий, сигнализируя, видимо, о завершении к тому времени в данном локальном районе процесса разрядки накопившейся сейсмогенной энергии и создании здесь условий относительной блоковой устойчивости.

Для проверки выводов визуального анализа о группировании афтершоков свершившихся землетрясений вокруг очагов будущих активных сейсмических событий нами был выполнен кластерный анализ их латерального распределения, реализованный в программном пакете STATISTIKA 10 [5]. До проведения вычислений исходные данные были подвержены стандартизации с целью исключения влияния различия размерности и масштаба изменения на результаты анализа:

$$x' = \frac{x_i - \bar{x}}{\sqrt{D_x}},$$

где x' – стандартизованное значение переменной, x_i – значение переменной, \bar{x} – среднее значение и D_x – выборочная дисперсия.

Собственно кластерный анализ был выполнен методом объединения (древовидная кластеризация). Мерой расстояния был принят квадрат Евклидова расстояния: $R(x,y) = \sum_i (x_i - y_i)^2$, эта мера позволяет более контрастно выделять отдаленные друг от друга объекты и объединять близлежащие. Объединение

анализируемых значений в кластеры выполнялось методом Варда. Результаты расчетов подтвердили вышесказанное, что отчетливо иллюстрирует рис. 4.

На рисунке 4А показаны кластеры афтершоков, имевших место в течение недели после основного события в ноябре 2006 г. Как видно, в зоне Курильского желоба они действительно образуют два кластера вблизи эпицентров будущих сильных землетрясений 2007 г. и 2009 г. На этом основании их можно считать форшоками указанных последующих землетрясений. На островном склоне выделяются три кластера афтершоков, один из которых образовался вблизи основного землетрясения, а два других приурочены к северному сегменту подводного хр. Витязя. Наибольшее количество афтершоков сосредоточено в южном блоке этого сегмента, на границе с зоной деструкции. На наш взгляд, это свидетельствует о гравитационной неустойчивости этого участка хр. Витязя с повышением этого состояния по мере приближения к зоне деструкции. В противовес этому южный сегмент этого хребта (южнее пролива Буссоль) выглядит структурой более стабильной и уравновешенной, поскольку события 2006 г. не вызвали здесь такого обилия афтершоков, как это наблюдается на севере этого хребта. В этой связи можно предполагать, что сейсмогенный процесс в Курильской системе в настоящее время продвигается от ее центральной части на северо-восток.

Афтершоки землетрясения 2007 г. (рис. 4Б) образуют три кластера: вблизи основного события, на участке будущего землетрясения 2009 г. и вблизи эпицентра уже прошедшего землетрясения 2006 г. Отсюда видно, что и это событие внесло свой вклад в подготовку землетрясения 2009 г., а кластер афтершоков вблизи эпицентра уже свершившегося землетрясения в 2006 г. свидетельствует о незавершенности к этому времени процесса тектонической стабилизации на данном участке. Однако землетрясение 2007 г. не вызвало заметную сейсмогенную реакцию в пределах хр. Витязя (отсутствие кластеров афтершоков). Возможно, высвобожденной энергии при этом оказалось недостаточной для распространения афтершокового процесса в район хребта.

Для оценки сейсмогенной ситуации в рассматриваемом районе после землетрясений 2006–2009 гг. имеющийся каталог сейсмических данных был пополнен соответствующей информацией до начала 2012 г. На рис. 5 показано распределение мелкофокусных землетрясений ($M \geq 4$) за период 2009–2011 гг.

Как видно, продолжающаяся после землетрясения 2009 г. сейсмоактивность имеет в целом рассеянный характер и приурочена, главным образом, к

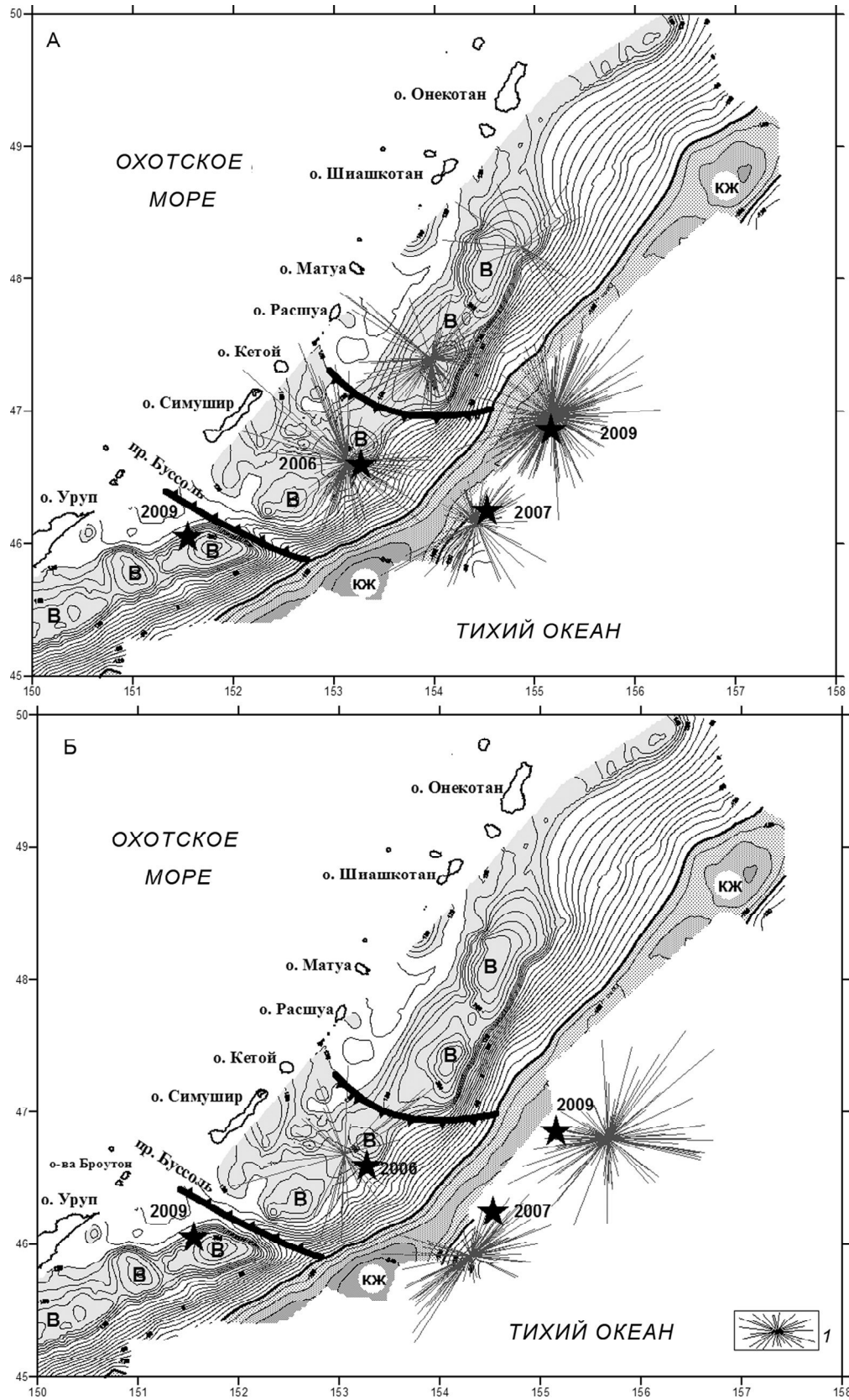


Рис. 4. Кластеры афтершоков землетрясений 2006 (А) и 2007 (Б) гг. в поле гравитационных аномалий и блоковой структуре.

1 – кластеры. Другие условные обозначения см. на рис. 2.

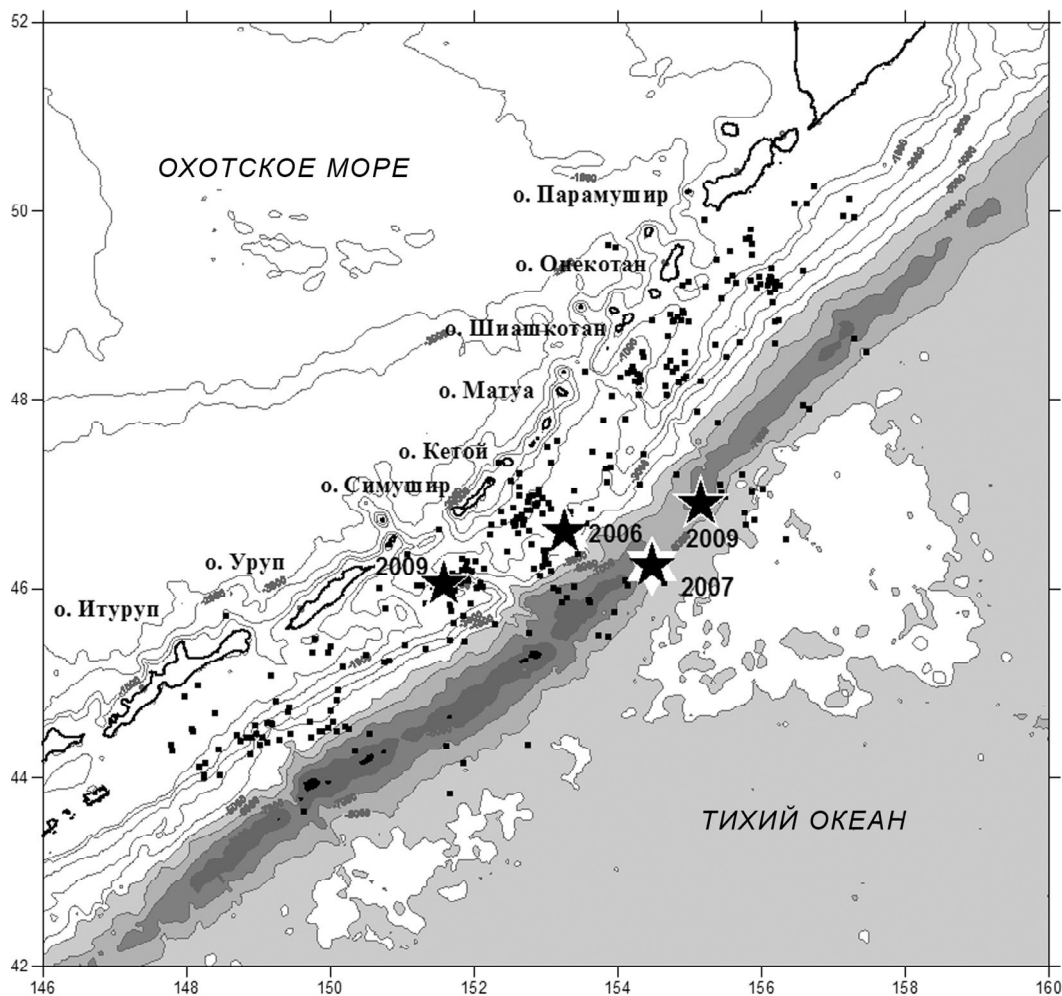


Рис. 5. Эпицентры землетрясений ($M \geq 4$) за период 2009–2011 гг. (обозначены точками) и рельеф дна района исследований.

Звездочками обозначены эпицентры сильных землетрясений 2006–2009 гг. с указанием года этих событий.

фронтальному склону Курильской островной гряды. На этом фоне заметна повышенная сейсмоактивность вблизи эпицентра землетрясения 2006 г., на траверзе о-вов Симушир и Кетой, а также на юго-западном борту трога Буссоль, вблизи эпицентра землетрясения 2009 г. На траверзе о. Итуруп на борту глубоководного желоба в интервале глубин 1000–5000 м также заметна концентрация достаточно большого количества землетрясений. Океанический борт желоба в указанный период был менее сейсмоактивен. Повышенное количество землетрясений имело место только вблизи эпицентров бывших землетрясений 2007–2009 гг.

Общее представление о сейсмоактивности изученного района за весь период исследований (2006–2011 гг.) дает карта распределения эпицентров мелкофокусных землетрясений, построенная

по совокупности всех собранных нами данных (рис. 6).

Представленная карта наглядно демонстрирует приуроченность подавляющего большинства землетрясений к ранее существовавшей сейсмической брешии и выявленной здесь тектонической зоне деструктивного характера [2, 3]. Их совокупность образует почти правильный четырехугольник, ортогонально ориентированный к Курильской гряде. Более того, только здесь высокая сейсмоактивность захватила и океанический борт глубоководного желоба. Все это объективно подтверждает ранее высказанное мнение о наложенном и секущем характере указанной зоны деструкции [3].

Нельзя не отметить еще одну особенность, представленную на последнем рисунке. Как видно, в пределах океана на продолжении рассмотренной по-

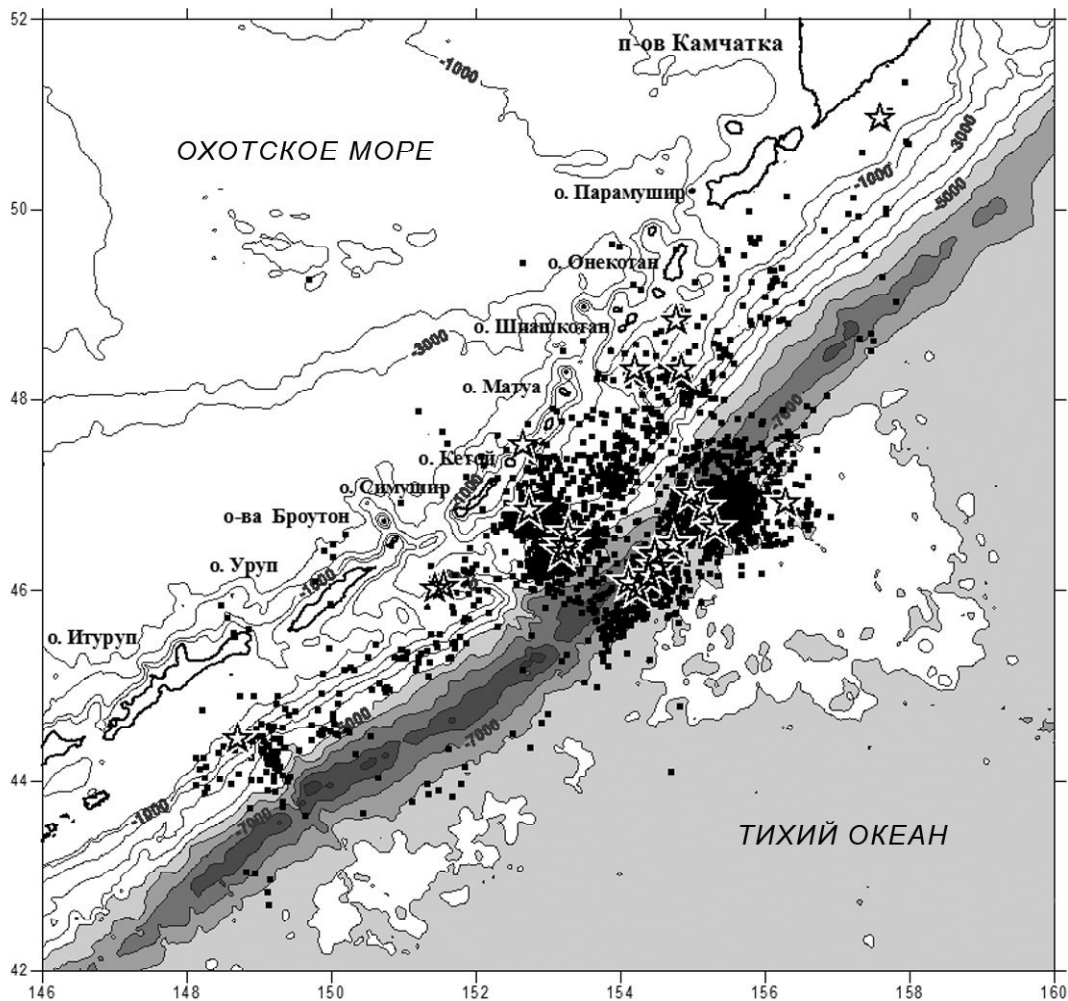


Рис. 6. Эпицентры землетрясений ($M \geq 4$) за период 2006–2011 гг. (обозначены точками) и рельеф дна района исследований.

Звездочками обозначены эпицентры землетрясений с $M \geq 6$.

перечной зоны располагается пологое поднятие в рельефе дна. Его природа не ясна. Возможно, это является внешним проявлением глубинных процессов (магматогенного характера?), образовавших этот купол и как-то связанных с развитием указанной тектонической зоны. Во всяком случае, этот район требует дальнейшего изучения, что, возможно, позволит выявить истинные размеры, причины, механизмы возникновения и развития зоны разрушения хребта Витязя в районе центральных Курил.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Выявлена пространственная связь сильнейших Симуширских землетрясений 2006, 2007, а также 2009 гг., произошедших в районе Центральных

Курил, с блоковой структурой консолидированного фундамента, установленной по геофизическим данным. В пределах фронтального склона Курильской гряды эпицентры землетрясений 2006 и 2009 гг. приурочены к границам тектонических блоков подводного хребта Витязя, что соответствует зонам коровых разломов. Землетрясения 2007 и 2009 гг., приуроченные к океаническому борту глубоководного желоба, также имели место в тектонически активной зоне.

2. Землетрясения 2006 и 2007 гг. послужили спусковым механизмом соответственно для последующих землетрясений 2007 и 2009 гг.

3. Два из четырех сильнейших землетрясений (2006 и 2007 гг.) произошли в пределах ранее выявленной зоны тектонической деструкции рассматриваемого района. Остальные имели место в непосредственной близости от нее. Большая часть

афтершоков этих землетрясений располагается в пределах указанной зоны, остальная часть сейсмических толчков распространилась только северо-восточнее этой зоны, охватив ближайшие бортовые участки хребта Витязя. За пределами юго-западной границы зоны деструкции, роль которой выполняет грабен пролива Буссоль, афтершоки землетрясений 2006 и 2007 гг. практически отсутствуют. Это свидетельствует о том, что блоковая неустойчивость к моменту указанных событий имела место только северо-восточнее грабена Буссоль, в зоне сейсмического затишья и далее на северо-восток вдоль простираения Курильской системы дуга-желоб.

4. Общая совокупность землетрясений, произошедших в данном районе в период с 2006 г. по 2012 г. и пространственно тесно связанная с деструктивной зоной, уточняет ее положение и объективно подтверждает ранее высказанное мнение о ее наложенном и секущем характере.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ДВО РАН № 09-I-P17-08.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Злобин Т.К., Левин Б.В., Полец А.Ю. Первые результаты сопоставления катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. ($M = 8.3$) и 13 января 2007 г. ($M = 8.1$) и глубинного строения земной коры Центральных Курил // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 1. С. 111–115.
2. Кулинич Р. Г., Карп Б. Я., Баранов Б. В. и др. О структурно-геологической характеристике “сейсмической брешии” в центральной части Курильской островной гряды // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 1. С. 5–19.
3. Лаверов Н.П., Лаппо С.С., Лобковский Л.И. и др. Центрально-Курильская “брешь”: строение и сейсмический потенциал // Докл. РАН. 2006. Т. 408, № 6. С. 1–4.
4. Леликов Е.П., Емельянова Т.А. Геология и вулканизм подводного хребта Витязя на Тихоокеанском склоне Курильской островной дуги // Океанология. 2011. Т. 51, № 2. С. 329–343.
5. Программный пакет STATISTIKA 10 [<http://www.statsoft.com/support/free-statistica-10-trial/>].
6. Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря. М.: Наука, 2006. 133 с.
7. Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Левин Ю.Н. и др. Симуширские землетрясения 2006–2007 гг. – новая страница в истории Курильской сейсмоактивной зоны // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Материалы 1-й регион. науч.-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, Камчат. фил., 11–17 ноября 2007 г. Петропавловск-Камчатский, 2007. С. 215–219.
8. Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Золотухин А.А. и др. Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 3–16.

R.G. Kulinich, M.G. Valitov, Z.N. Proshkina

Geophysical fields, block structure and seismicity of the Central Kuril Islands

On the basis of the combined analysis of seismologic information with gravity and magnetic fields and relief of the acoustic basement it was revealed that the largest earthquakes that occurred near the Central Kuril Islands in 2006-2009 were related to the block structure of the Earth's crust. Aftershocks of the largest earthquakes recorded in 2006 and 2007 have become foreshocks for the earthquakes followed in 2007 and 2009, respectively. In total, the earthquakes that have occurred in this area in the period of 2006-2012, are closely related to the existing here tectonic destructive zone, clarifies its position and objectively supports the earlier concept on its superimposed and intersecting character with respect to the Kuril Island Arc.

Key words: earthquakes, geophysical fields, block structure, Vityaz Ridge, Kuril trench, Central Kuril Islands.