GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS

2010. Vol. 1. № 1. 36-54.



ГЕОДИНАМИКА И ТЕКТОНОФИЗИКА

PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST

ISSN 2078-502X



INVESTIGATIONS OF REGULARITIES IN DISTRIBUTION OF TECTONIC STRESSES IN THE KURIL-KAMCHATKA ZONE

T. K. Zlobin^{1, 2}, A. Yu. Polets^{1, 2}

¹Institute of Marine Geology & Geophysics FEB RAS, 693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Nauka str., 1b, Russia ²Sakhalin State University, 693008, Yuzhno-Sakhalinsk, Lenin str., 290, Russia

Abstract: The article highlights the importance of researching earthquake which occurred in the Sakhalin and Kuril Islands in combination with studies of seismic dislocations and tectonic movements caused by such earthquakes. It is shown that seismic dislocations and tectonic movements can be studied from focal mechanisms of earthquakes. Data on the crustal structure and earthquake sources are valuable for finding solutions of fundamental problems of geotectonic and geodynamics; therefore, it is challenging to juxtapose such data while studying the transition zone from the Eurasian continent to the Pacific Ocean.

The crustal structure and distribution of earthquake are considered along the Shantar-Matua profile which runs from the western border of the Tatarsky Strait (the Primorie coast) through South Sakhalin and the Okhotsk Sea up to the Matua Island. Based on the NEIC catalogue, a depth profile showing earthquake hypocenters is constructed for a zone which widths on both sides of the Shantar-Matua profile amounted to 200km. This allows us to consider specific features of the deep structure of the crust and positions of the earthquake sources in the crust and in the upper mantle along the uniform profile (Fig. 1, *a*, *b*).

Data on catastrophic earthquakes with magnitudes of 8.3 and 8.1 that occurred on 15 November 2006 and 13 January 2007 in the region of the Simushir Island are collated with results of onshore and marine deep seismic researches by DSS, CMRW, MSWE, MEW methods in the region of the Middle Kurils. The structure of the crust and focal zones of these earthquakes are considered in conjunction (Figures 2–8).

Cyclic changes in the state of stresses of the lithosphere and corresponding seismic dislocations in the focal zone of the catastrophic Shikotan earthquake of 04 October 1994 (M=8.1, depths 0-150km) are revealed (Table 1, Fig. 9).

We apply the method of cataclastic analysis (MCA) of fractures to assess the state of stresses of the crust in the area of the Shikotan earthquake. This method is the basis for new experimental studies of the state of tectonic stresses and deformations and properties of rocks in their natural bedding. The method of reconstruction of tectonic stresses was designed by Yu.L. Rebetsky. Stresses are reconstructed from Centroid Moment Tensor data (CMT), i.e. solutions for earthquakes recorded in NEIC catalogues (Figures 10–15). Based on reconstructed parameters of the recent state of stresses of the crust and the upper mantle of the Southern Kurils, there are grounds to conclude that spacious areas of stable stress tensor parameters are present in the region under studies, along with local sites wherein these parameters are subject to anomalously fast changes.

Keywords: crustal structure, seismotectonics, earthquake, Sakhalin, Kurils.

Recommended by K.Zh. Seminsky 22 October 2009

Zlobin T.K., Polets A.Yu. Investigations of regularities in distribution of tectonic stresses in the Kuril-Kamchatka zone // Geodynamics & Tectonophysics. 2010. V. 1. № 1. P. 36–54.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ЗОНЕ

Т. К. Злобин^{1, 2}, **А. Ю. Полец**^{1, 2}

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1б, Россия ²Сахалинский государственный университет, 693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, Россия

Аннотация: Указана важность исследований землетрясений на Сахалине и Курилах, а также вызванных ими сейсмодислокаций и тектонических подвижек. Показано, что они могут быть выполнены на основе изучения механизмов очагов землетрясений. Поскольку большое значение при решении фундаментальных вопросов геотектоники и геодинамики имеют данные об очагах землетрясений и о глубинном строении земной коры, особый интерес представляет их совместное рассмотрение и сопоставление в зоне перехода от Евроазиатского континента к Тихому океану.

По профилю «Шантары – Матуа» рассмотрено строение земной коры и распределение землетрясений, он проложен от западного борта Татарского пролива (побережья Приморья), через Южный Сахалин и Охотское море до о. Матуа. На основе каталога NEIC в полосе шириной 200 км в обе стороны от профиля «Шантары – Матуа» был построен глубинный разрез гипоцентров землетрясений. Это позволило совместно рассмотреть особенности глубинной структуры земной коры и положения очагов землетрясений в земной коре и верхней мантии по единому профилю (рис. 1, *a*, *б*).

Данные о катастрофических землетрясениях с магнитудой 8.3 и 8.1, произошедших 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. в районе острова Симушир, сопоставлены с результатами наземно-морских глубинных сейсмических исследований методами ГСЗ, КМПВ, МОВЗ и МОВ в районе Средних Курил. На основе этого совместно рассмотрено строение земной коры и очаговые зоны этих землетрясений (рис. 2–8).

Установлена цикличность в смене характера напряженного состояния литосферы и соответствующих ему сейсмодислокациях в очаговой зоне катастрофического землетрясения (Шикотанского 4.10.1994 года с магнитудой 8.1) на глубинах 0–150 км (табл. 1, рис. 9).

Для оценки напряженного состояния земной коры в районе Шикотанского землетрясения нами был применен метод катакластического анализа (МКА) разрывных нарушений, лежащий в основе нового направления экспериментального изучения тектонического напряженно-деформированного состояния и свойств массивов горных пород в их естественном залегании. Реконструкция напряженного состояния выполнялась на основе данных СМТ (тензоров моментов центроидов) – решений для землетрясений, взятых из каталогов NEIC (рис. 10– 15). Выполненная реконструкция параметров современного напряженного состояния земной коры и верхней мантии Южных Курил позволила установить, что для этого района, с одной стороны, характерно наличие обиширных областей устойчивого поведения параметров тензора напряжений, а с другой – присутствие локальных участков аномально быстрого изменения этих параметров.

Ключевые слова: строение земной коры, сейсмотектоника, землетрясение, Сахалин, Курилы.

Глубинное строение и сейсмотектоника по профилю Шантары – Поднятие АН СССР – Матуа

Исследование землетрясений, сейсмотектоники и глубинного строения в Охотоморском регионе, находящемся в зоне перехода от Евроазиатского континента к Тихому океану, имеет большое значение для решения фундаментальных вопросов геотектоники основных тектонических элементов Земли. Особый интерес представляет совместный анализ структурных построений (глубинных сейсмических разрезов земной коры) и изучение тектонических напряжений, сейсмодислокаций в земной коре и верхней мантии.

В связи с этим нами были построены глубинные разрезы земной коры по профилю Шантары – Матуа с гипоцентрами землетрясений в полосе шириной 200 км и механизмами их очагов (рис. 1, *a*, *б*) [Злобин и др., 2008, 2009].

В южной части этого профиля под о-вом Сахалин и центральной частью Охотского моря (рис. 1, а) были установлены глубинные зоны нарушений, соответствующие следующим разломам: 1 – Северо-Западно-Сахалинскому, 2 – Западно-Шмидтовскому (Хоккайдо-Сахалинскому), 3 – Восточно-Сахалинскому, 4 – Западно-Дерюгинскому, 5 – Западно-Охотскому, Восточно-Дерюгинскому.

Четыре (1, 3, 4, 5) из шести – разломы сквозькоровые и доходят до верхней мантии. Первый и третий разломы ограничили Северо-Сахалинский прогиб, четвертый и шестой – прогиб Дерюгина.

Изучение механизмов очагов землетрясений в разломах позволило установить, что в Восточно-Сахалинском разломе в верней части земной коры на глубине 10 км имели место первоначально (18.12.1995 г.) взбросовые подвижки, а затем (08.01.1996 г.) на глубине около 12 км – сбросовые. Сейсмодислокации были знакопеременными, т.е. смещения блоков были вверх, а затем - вниз. Возможно, с этими подвижками связаны современные движения земной коры прогиба. Магнитуда самого крупного землетрясения (27.05.1995 г.) M=7.0. Гипоцентр его находился в шовной зоне Западно-Дерюгинского разлома. Тип сейсмодислокаций – взброс. Очевидно, взброшено было северо-западное поднятое крыло разлома, ограничивающее западный борт прогиба Дерюгина.

В центральной части профиля практически не наблюдается энергетически значимых землетрясений. Они исключительно редки, и нет возможности оценить по их механизмам особенности сейсмотектоники.

В восточной части профиль (рис. 1, б) пересекает Курильскую глубоководную котловину, Курильскую островную дугу, сопряженный с ней глубоководный желоб и выходит в Тихий океан.

Анализ глубинного разреза земной коры в восточной части (рис. 1, б) и полученных данных показывает следующее. Все семь разломов, установленные в этой части профиля (№ 7–13) по сейсмическим данным, соответствуют зонам, которые выделяются по положению гипоцентров землетрясе-



Рис. 1 (Продолжение на следующей странице).

ний.

При этом сейсмологические данные о гипоцентрах очагов землетрясений позволяют не только подтвердить наличие выделенных разломов в земной коре, но и проследить их положение ниже, т.е. в мантии. Это зоны № 7, 8, 9, 12 и 13.

В верхней части коры под морское дно выходит уникальная глубинная структура – сейсмофокальная зона землетрясений (СФЗ).

Возможной причиной возникновения ряда очагов землетрясений в верхней части разреза является не только погружение океанической литосферной плиты, но и непосредственно разломы в земной коре или верхней мантии вне СФЗ. Последнее хорошо проявляется в зонах № 7, 8, 10, 11. Они явно расположены вне СФЗ.

Анализ механизмов очагов землетрясений в восточной части профиля показал следующее. Определенные механизмы отвечают подвижкам двух типов – взбросам и пологим надвигам. Взбросам соответствуют землетрясения № 6, 8, 5, надвигам – № 7, 9, 4. При этом положение взбросов и надвигов не приурочено к какой-то определенной части СФЗ или глубине. Они имеют место на разных глубинах и не приурочены только к одной или другой (внешней или внутренней) стороне СФЗ.

Таким образом, и проанализирован глубинный

разрез земной коры от Шантарских до Курильских остров (о-в Матуа), положение гипоцентров землетрясений по этому профилю и механизмы очагов.

Глубинное строение земной коры Средних Курил и очаговые зоны катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. (*М*=8.3) и 13 января 2007 г. (*М*=8.1) (механизмы очагов, сейсмодислокации)

Были проведены исследования уникальных катастрофических землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г., произошедших в районе Средних Курил к востоку от острова Симушир с моментными магнитудами (*M*_w) для первого землетрясения 8.3 и 8.1 для второго [Злобин и др., 2008; Полец и др., 2008].

Повышение сейсмической активности в центре Курильской гряды началось в конце сентября 2006 г. С 24 октября по 14 ноября события практически отсутствовали, наблюдался период сейсмического затишья (рис. 2, *a*). После этого краткого периода затишья произошло катастрофическое землетрясение с *M*_w=8.3, сопровождаемое большим количеством афтершоков. Из рис. 2, *б*, видно, что фиксировались два периода основной активности – с 15 по 30 ноября и с 13 по 19 января, после 19 января



Рис. 1. *а* – глубинный разрез земной коры, построенный по сейсмическим данным и совмещенный с разрезом гипоцентров землетрясений в западной и центральной части по профилю Шантары – Поднятие АН СССР – Матуа; *б* – глубинный разрез земной коры, построенный по сейсмическим данным и совмещенный с разрезом гипоцентров землетрясений в восточной части по профилю Шантары – Поднятие АН СССР – Матуа.

1-5 – сейсмические границы: в осадочном чехле по данным МОВ ОГТ (1), связанные с подошвой осадочных отложений – кровлей фундамента (2), по данным КМПВ (3) и ГСЗ (4) в земной коре и связанные с подошвой земной коры, поверхностью Мохо (5); 6, 7 – граничные и средние сейсмические скорости, км/с; 8, 9 – положение разломов в земной коре по сейсмическим и геологическим данным, согласно [Злобин и др., 2009; Объяснительная записка..., 2000] (8) и субвертикальные зоны гипоцентров землетрясений (9) и их номера; 10 – стереогамма механизмов очагов землетрясений; 11 – предполагаемые границы сейсмофокальной зоны. На вставке на разрезах кружками показаны гипоцентры землетрясений и значения их магнитуд.

Fig. 1. a – The crustal cross-section based on seismic data juxtaposed with the cross-section showing hypocenters of earthquakes for the western and central parts of the Shantary - Uplift of Acad.Sci. of USSR – Matua profile. b – The crustal cross-section based on seismic data juxtaposed with the cross-section showing hypocenters of earthquakes for the eastern parts of the Shantary - Uplift of Acad.Sci. of USSR – Matua profile.

1-5 – seismic boundaries: according to MEW CDP data, in sedimentary cover (1), connected with the bottom of sediments – roof of the base (2), according to CMRW (3) and DSS (4) data, in the crust and connected with the crustal bottom, Moho surface (5); 6, 7 – boundary and medium seismic velocities, km/sec; 8, 9 – positions of faults in the crust, according to seismic and geological data as given in [$3no6uh u \partial p., 2009$; O6 + schumenbha anucka..., 2000] (8), and sub-vertical zones of earthquake hypocenters (9) and their numbers; 10 – stereogram of earthquakes focal mechanisms; 11 – estimated boundaries of seismo-focal zone.

Circles in the insert show earthquakes hypocenters and magnitudes.

2007 г. число толчков постепенно убывало.

Интерес представляет анализ распределения по глубине афтершоков Симуширских землетрясений после главного толчка первого землетрясения (с 15 ноября по 5 декабря 2006 г.) и после главного толчка землетрясения 13.01.2007 г. (с 13 января по 1 февраля 2007 г.) (рис. 3, *a*, *б*).

В распределении афтершоков по глубине следу-

T. K. Zlobin, A. Yu. Polets: Investigations of regularties of tectonic stresses...



Рис. 2. Изменение количества землетрясений в сутки: а – с 1 июня по 15 ноября 2006 г.; б – с 15 ноября 2006 г. по 30 июня 2007 г.

Fig. 2. Variations of daily quantities of earthquakes: a) from 01 June 2006 to 05 November 2006; b) from 15 November 2007 to 30 June 2007.

ет отметить два момента (рис. 3). Наибольшее количество толчков произошло на глубине 10 км. Отмечены глубины, на которых отсутствуют толчки. Это объясняется, видимо, наличием астеносферных слоев на этих глубинах, впервые выявленных и подтвержденных Р.З. Таракановым [*Тараканов*, 1967].

Ранее, в 1983 г., под руководством Т.К. Злобина на Средних Курилах были выполнены глубинные сейсмические работы ГСЗ-КМПВ и МОВЗ [Злобин, 1987; Злобин и др., 1998; Аносов и др., 1988].

Сейсмическими методами было отработано два ортогональных профиля. Один из них был пройден вдоль, другой – вкрест Курильской островной дуги (КОД) (рис. 4).

Положение главных толчков землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. практически полностью совпадает с областью глубинного сейсмического разреза по профилю II (рис. 5).

Это позволило рассмотреть совместно особенности глубинного строения земной коры (слои, рельеф и скорости в них) и положения очагов названных землетрясений.

Анализ данных о землетрясениях и результаты исследования глубинного строения земной коры Средних Курил позволяют установить следующее.

1. Гипоцентр главного толчка землетрясения 15.11.2006 г. располагался в нижнем гранулито-базитовом («базальтовом») слое коры. Здесь под приостровным склоном желоба на ПК 110–150 ско-



Рис. 3. Распределение количества землетрясений по глубине: *a* – c 15 ноября по 5 декабря 2006 г.; *б* – c 13 января по 1 февраля 2007 г. **Fig. 3.** Depth distribution of earthquakes: a) from 15 November 2006 to 05 December 2006; b) from 13 January 2007 to 01 February 2007.



Рис. 4. Схема расположения профилей ГСЗ.

1 – сейсмическая станция «Симушир»; 2 – наземные, автономные станции МОВЗ «Черепаха»; 3 – положение эпицентров землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. Прямыми линиями показано положение профилей ГСЗ. На врезке – район работ.

Fig. 4. Location plan of DSS profiles.

1 – «Simushir» seismic station; 2 – «Cherepakha» autonomous stations; 3 – location of earthquake epicentres of 15 November 2006 and 13 January 2007. Routes of DSS profiles are shown by straight lines. The insert show a schematic map of the area under studies.

рость по поверхности, залегающей на глубине 8 км, аномально увеличилась до 7.1 км/с против 6.4–6.7 км/с на большей части профиля. Восточнее ПК 150 на разрезе поверхность М круто поднимается и наблюдается резкий перегиб этой основной структурной границы.

2. Гипоцентр главного толчка землетрясения 13.01.2007 г. расположен на границе верхнего слоя со средней скоростью 3.7 км/с и нижнего гранулитобазитового («базальтового») слоя коры с Vr=6.7 км/с.

3. Землетрясение 15.11.2006 г. произошло под приостровным склоном глубоководного желоба, 13.01.2007 г. – практически в его осевой части (рис. 5).

По результатам исследования механизмов главных толчков землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. установлено, что первый явился пологим надвигом, второй – сбросом, что говорит соответственно об обстановке горизонтального сжатия в первом случае и горизонтального растяжения во втором.

Вскоре после этих катастрофических событий в районе Средних Курил вновь произошли сильные землетрясения: 03.03.2008 г. (*M*_w=6.5), 15.01.2009 г. (*M*_w=7.4) и 07.04.2009 г. (*M*_w=6.9) (рис. 6).

Глубинный разрез земной коры вдоль Средних Курил по профилю Уруп-Расшуа (рис. 7) [Злобин, 2002] показал, что подошва земной коры (граница М) установлена под о-вом Симушир и соседними островами (Черные Братья, Кетой, Ушишир, Расшуа) на глубинах около 30 км [Злобин и др., 1991; Злобин и др., 2001; Злобин, 2002]. Однако под островом Симушир (140–170 км профиля I) выявлено аномальное строение земной коры: граница М не прослеживается и наблюдается 30-километровое «зияние», ее «размыв», после которого северо-восточнее, на 145-м километре профиля, наблюдается резкое смещение границы до глубин 20 км. Эта зона, соответствующая блоку III, отличается в скоростном и, по-видимому, литологическом отношении (рис. 7).

Сопоставление разреза земной коры и положения гипоцентров землетрясений 15.11.2006 г., 03.03.2008 г. и 07.04.2009 г. показало, что они находятся на траверзе разреза названной аномальной зоны и юго-восточнее нее (рис. 7). Очаг землетрясения 07.04.2009 г. расположен под проливом Буссоль в блоке II по разрезу (рис. 7) в переходной зоне от коры к мантии (границе М). При этом, согласно полученным нами данным [Злобин, 2002], над ним находится мошный слой пониженной (6.5 км/с) скорости толщиной 15-20 км, подстилаемый породами верхней мантии со скоростью 8.0 км/с и перекрытый тонким (5 км) высокоскоростным (7.0-7.7 км/с) слоем. Таким образом, очаг приурочен к неоднородному блоку с резко дифференцированными скоростями и, видимо, плотностями, а также литологией.

Анализ региональных разломов и мегасдвигов в



Рис. 5. Сейсмический разрез земной коры по профилю II.

1 – пункты постановки буйковых станций; 2, 3 – пункты постановки донных станций при исследованиях КМПВ (2) и ГСЗ (3); 4, 5 – преломляющие границы, построенные по данным КМПВ (4) и ГСЗ (5) (цифры сверху границы – значение эффективной скорости, снизу – значения граничной скорости); 6, 7 – поверхность Мохоровичича, построенная по результатам исследований 1983–1984 гг. (6) и 1957– 1959 гг.(7); 8 – поверхность акустического фундамента океанического склона желоба; 9 – участки интерполяции преломляющих границ; 10 – глубины залегания сейсмических границ по данным ГСЗ и МОВЗ в местах пересечения с профилем I; 11 – зоны тектонических нарушений; 12–15 – местоположение на разрезе очагов землетрясений различной магнитуды; 16, 17 – фокальные механизмы очагов землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. (16) и положение на разрезе их гипоцентров (17); 18 – границы сейсмофокальной зоны.

Fig. 5. Crustal seismicity in Profile II.

1 - sites of buoy stations; 2, 3 - sites of benthonic stations for CMRW (2) and DSS (3) studies; 4, 5 - refracting boundaries designed from of CMRW (4) and DSS (5) data (figures above boundary lines show values of effective velocities, those below show values of boundaries velocities); 6, 7 - Moho surface reconstructed from research results of 1983–1984 (6) and 1957–1959 (7); 8 - surface of the acoustic base of the oceanic trench slope; 9 - areas of interpolation of refracting boundaries; 10 - depths of seismic boundaries from DSS and MSWE data at cross points with Profile I; 11 - zones of tectonic disturbance; 12-15 - earthquakes foci of different magnitudes; 16, 17 - focal mechanisms of earthquake foci for 15 November 2006 and 13 January 2007 (16) and locations of hypocenters I the cross-section (17); 18 - boundaries of the seismo-focal zone.

земной коре в районе Средних Курил и под прилегающими акваториями на тектонической схеме Охотоморского региона [*Структура..., 1996*] (рис. 8) показал следующее. Южнее о-ва Симушир под проливом Буссоль и далее в Тихий океан по направлению, ортогональному простиранию Курильской дуги, предполагается разлом в земной коре, сопровождаемый серией оперяющих нарушений (рис. 8), с одним из которых, видимо, можно связывать землетрясение 07.04.2009 г.

Дальнейший анализ разрывной тектоники и положения эпицентров сильных землетрясений [*Структура..., 1996, 2004*] показал следующее. Через полтора года после главного толчка катастрофического землетрясения 15.11.2006 г., 03.03.2008 г. в этой же очаговой зоне вновь произошло сильное сейсмическое событие. Оба они оказались в зоне расположения двух параллельных разломов северо-восточного направления (рис. 8). Поскольку глубина гипоцентров обоих землетрясений согласно каталогу NEIC оценивается в 10 км, можно считать, что они расположены в земной коре, и их уместно связывать с ослабленной тектонической зоной этих разломов.

Интересно отметить, что согласно данным NEIC гипоцентры сильных землетрясений 13.01.2007 г. и 15.01.2009 г. расположены прямо под осью глубоководного желоба, причем первое из них произошло на глубине около 12 км, а второе – около 31 км.

Анализ механизмов очагов всех рассматриваемых землетрясений показал, что подвижки были трех видов: пологий надвиг, сброс и взброс. Первоначально при землетрясении 15.11.2006 г. произошел пологий надвиг в западной, внешней прику-



Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений в 2006–2009 г. в районе Средних Курил. На врезке землетрясения: 1 – 15.11.2006 г., 2 – 13.01.2007 г., 3 – 03.03.2008 г., 4 – 15.01.2009 г., 5 – 07.04.2009 г. и значения магнитуд.

Fig. 6. Map of epicentres of earthquakes which occurred in 2006-2009 in the Middle Kurils region. The insert shows earthquakes and magnitudes: 1 – 15 November 2006, 2 – 13 January 2007, 3 – 03 March 2008, 4 – 15 January 2009, 5 – 07 April 2009.

рильской, части СФЗ. Практически в той же очаговой зоне примерно на удалении около 10 км через год и четыре месяца, 03.03.2008 г., вновь произошло сильное землетрясение. Это, безусловно, говорит о том, что описываемые события были следствием одного и того же движения блоков земной коры, начавшегося 15.11.2006 г. и продолжавшегося как минимум до 3 марта 2008 г.

Таким образом, в очаговых зонах этих толчков блоки испытывали пологий надвиг (с 15.11.2006 г. по 03.03.2008 г.) на глубинах около 10 км, позже произошел сброс (13.01.2007 г.), а через два года (15.01.2009 г.) был отмечен взброс на глубинах 30– 40 км. Следовательно, имела место релаксация в блоках литосферы в СФЗ.

Таким образом, в работе рассмотрены основные особенности серии катастрофических и сильных землетрясений 2006–2009 гг., произошедших в рай-

оне Средних Курил после многолетнего (с середины прошлого столетия) затишья.

Вариации поля упругих напряжений и основные сейсмодислокации в очаговой зоне Шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 г.

В связи с изложенным большой интерес представляет изучение напряженного состояния и сейсмодислокаций в очаговых зонах катастрофических землетрясений. Нами было рассмотрено упругое поле и его вариации в очаговой зоне Шикотанского землетрясения 1994 г. с *М*=8.2, произошедшее восточнее Южных Курил [Злобин, 1987]. В результате исследований была установлена цикличность в смене характера напряженного состояния литосферы на глубинах 0–150 км.

В рассмотренный период времени (1991-1994





Рис. 7. Скоростной разрез земной коры по профилю І Уруп-Расшуа.

ЮВ

1 – изолинии скорости; 2 – сейсмические границы и значения скорости над границей и под ней, км/с; 3 – границы скоростных блоков, отождествляемые с границами структурных несогласий и разломами; 4 – поверхность Мохоровичича (М); 5, 6 – слой повышенной (5) и пониженной (6) скорости. Звездочками показаны гипоцентры землетрясений.

Fig. 7. High-velocity cross-section of the crust along Profile I Urup-Rasshua.

1 - velocity isolines; 2 - seismic boundaries and velocities above and under the boundary, km/sec; 3 - boundaries of high-velocity blocks referred to as boundaries of structural discontinuities and faults; 4 - Moho surface (M); 5, 6 - layers of increased (5) and decreased (6) velocities. Hypocenters of earthquakes are shown by stars.



Рис. 8. Схема расположения профилей ГСЗ, разломов (согласно тектонической схеме Охотоморского региона [Структура..., 1996]) и эпицентров землетрясений.

1 – сейсмическая станция «Симушир»; 2 – наземные, автономные станции МОВЗ «Черепаха»; 3 – положение эпицентров землетрясений 15.11.2006 г., 13.01.2007 г., 03.03.2008 г., 15.01.2009 и 07.04.2009 г.; 4 – мегасдвиги; 5 – региональные разломы. Прямыми линиями показано положение профилей ГСЗ. На врезке – район работ.

Fig. 8. Location plan of DSS cross-sections, faults according to the tectonic scheme of the Okhotsk Sea region [8], and epicentres of earthquakes.

1 – «Simishir» seismic station; 2 – «Charepakha» autonomous stations; 3 – location of epicentres of earthquakes 15 November 2006, 13 January 2007, 03 March 2008, 15 January 2009, and 07 April 2009; 4 – megashifts; 5 – regional faults. Routes of DSS profiles are shown by straight lines. The insert show a schematic map of the area under studies

Характер напряженного состояния и типы сейсмодислокаций в очагах землетрясений, предшествовавших главному событию

State of stresses and ty	vpes of seismic	dislocations in foci of	f earthquakes which	preceded main seismic events

№ п/п	№ по рабочему каталогу	Дата	Время (Гринвич) час. мин.	Глубина очага Н, км	Сейсмодислокация	Типы сейсмодислокаций	Главное напряжение
1	3	20.01.1991	11 07	59	взброс	1	Р
2	19	4.04.1991	09 00	39	пологий надвиг	3	Р
3	21	13.04.1991	01 38	73	пологий надвиг	3	Р
4	37	10.07.1991	05 52	97	поддвиг	2	Т
5	40	21.07.1991	14 20	47	СДВИГ	3	P=T
6	7	07.02.1992	00 06	51	взброс	1	Р
7	17	18.03.1992	16 25	32	сброс	2	Т
8	24	06.04.1992	03 35	95	сброс	2	Т
9	28	05.05.1992	08 55	38	взброс	1	Р
10	32	23.05.1992	09 48	58	поддвиг	2	Т
11	61	07.12.1992	02 11	48	взброс	1	Р
12	62	07.12.1992	05 49	44	поддвиг	2	Т
13	66	21.12.1992	18 43	80	пологий надвиг	1	Р
14	18	08.03.1993	08 01	72	взброс	1	Р
15	8	12.04.1994	00 17	128	пологий надвиг	1	Р
16	16	25.06.1994	08 38	65	СДВИГ	3	P=T
17	41	31.08.1994	09 07	78	СДВИГ	3	P=T
18	45	04.10.1994	13 23	26	взброс	1	Р
19	51	04.10.1994	15 24	32	взброс	1	Р
20	67	05.10.1994	04 00	36	СДВИГ	3	P=T

гг.) формировались пять видов сейсмодислокаций, для удобства анализа они объединены в три типа (таблица): в условиях преобладающего сжатия (P) – взбросы и пологие надвиги (тип 1); в условиях преобладающего растяжения (T) – сбросы, поддвиги (тип 2); в условиях равнодействия сжатия и растяжения (P=T) – сдвиги (тип 3).

За начало цикла принято состояние равновесия поля упругих напряжений, действующих в очаге землетрясения (P=T).

Впервые за период наблюдений 1991–1994 гг. равновесное состояние среды отмечено 21.07.1991 г. (событие № 40 на рис. 9 и в таблице). Дислокация в очаге – сдвиг (тип 3), глубина гипоцентра H=47 км.

Следующая по времени подобная ситуация в очаговой зоне Шикотанского землетрясения 4(5).10.1994 г. отмечалась только через 3.5 года – 25.06.1994 г. (событие № 16 на рис. 9 и в таблице). Дислокация в очаге – сдвиг (тип 3), глубина гипоцентра Н=65 км.

Между этими событиями на всех глубинах наблюдалось постоянное чередование условий сжатия и растяжения (типы дислокаций 1 и 2). Этот период наблюдений, в течение которого поле упругих напряжений было нестабильным, закончился 21.12.1992 г.

С 21.12.1992 г. (событие № 66 на рис. 9 и в таблице), то есть за 1 год и 9 месяцев (21 месяц до основного события), сменился характер дислокаций. Далее вплоть до главного толчка и позже наблюдалась смена дислокаций только типов 3 и 1, то есть сдвиг или пологий надвиг и взброс. Это говорит о том, что с 21.12.1992 г. в очаговой зоне Шикотанского землетрясения поле напряжений стабилизировалось и имели место условия только преимущественного сжатия (Р). Причем эти условия сохранялись до 25.06.1994 г. (событие № 16), когда насту-

пило равновесное состояние среды с дислокацией в очаге типа сдвиг.

Такая обстановка наблюдалась в течение 3.5 месяца, после чего 04.10.1994 г. в 13 час 23 мин произошел взброс, явившийся главным толчком разрушительного Шикотанского землетрясения. В дальнейшем через 2 часа (в 15 час 24 мин 04.10.1994 г.) взбросовые движения повторились, а через сутки после главного толчка, 05.10.1994 г., вновь установилась обстановка равновесия (P=T) и снова был отмечен сдвиг (событие № 67). Затем наблюдалось большое число афтершоков, которые происходили преимущественно в условиях сжатия [Землетрясения..., 2000].

Таким образом, в цикле, предшествовавшем главному толчку, выделяется две фазы. В первой фазе цикла длительностью 1.5 года наблюдались только дислокации типа 1-2, что соответствовало постоянному чередованию условий сжатия и растяжения. Во второй фазе, длительностью 1 год и 9 месяцев, наблюдались дислокации типа 3-1 в условиях сжатия, после чего произошел сдвиг в условиях равновесия Р и Т и затем главный толчок.

Сравнительный анализ типов сейсмодислокаций и глубин гипоцентров землетрясений показал, что перед наступлением равновесного состояния поля напряжений происходит толчок на существенно большей глубине. Так было перед началом цикла (сдвигом 21.07.1991 г., событием № 40 на рис. 9 и в таблице): 10.07.1991 г. (т.е. за 11 суток) произошло землетрясение, гипоцентр которого был определен на глубине 97 км, при средних глубинах предшествующих землетрясений 57 км. На еще большей глубине (H=128 км) произошло землетрясение (№ 8 на рис 9. и в таблице), предваряющее следующий цикл, приведший к катастрофическому Шикотанскому землетрясению 1994 г. [Злобин и др., 2008].



Рис. 9. Очаги землетрясений 1991–1994 гг., предшествующих Шикотанскому землетрясению 4 октября 1994 г.

1–5 – основные сейсмодислокации: 1 – сдвиг, 2 – взброс, 3 – сброс, 4 – поддвиг, 5 – пологий надвиг; 6–8 – классификация по глубине (H) залегания гипоцентра: 6 – H < 30 км, 7 – H=30–70 км, 8 – H>70 км; 9 – катастрофическое землетрясение 4(5) октября 1994 г.

Fig. 9. Foci of earthquakes which occurred in 1991-1994 and preceded the Shikotan earthquake of 04 October 1994.

1-5 – main seismic dislocations: 1 – strike-slip, 2 – upthrust, 3 – fault, 4 – underthrust, 5 – low angle overthrust; 6-8 – classification by hypocenter depths (H): 6 – H <30 km; 7 – H=30-70 km; 8 – H >70 km; 9 – catastrophic earthquake of 4(5) October 1994.

Поскольку глубина последующего главного толчка была определена в 26 км, можно говорить о передаче упругой деформации с больших глубин в верхние части литосферы.

Напряженное состояние земной коры и верхней мантии до и после Шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 г.

В целом для оценки напряженного состояния земной коры и верхней мантии исследуемого региона нами был применен метод катакластического анализа разрывных нарушений (МКА), предложенный Ю.Л. Ребецким [*Ребецкий, 2007*]. Нами представлены результаты реконструкции до (рис. 11, *a*, – 15, *a*) и после (рис. 11, *б*, – 15, *б*) Шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 г.

Реконструкция напряженного состояния выполнялась на основе данных СМТ (тензоров моментов центроидов) – решений для землетрясений, взятых из каталога NEIC. Обработка исходных сейсмологических данных производилась в пределах области 40°-48° с.ш. и 143°-153° в.д. в узлах сетки 0.25°× ×0.25° в латеральном направлении для разных глубинных срезов: 0-30, 30-60, 60-120 км.

По результатам реконструкции в большинстве случаев проекции осей максимального девиаторного сжатия σ_3 и растяжения σ_1 для всех глубинных уровней ориентированы почти ортогонально простиранию Курильского желоба с погружением под океаническую плиту – оси сжатия и под субконтинентальную плиту – оси растяжения (рис. 10, 11).

Оси максимального девиаторного растяжения σ_1 имеют более крутое погружение, а оси максимального девиаторного сжатия σ_3 – более пологое. Более всего изменяются ориентации осей алгебраически максимального напряжения σ_1 .

Подобная ориентация осей главных напряжений является типичной для субдукционных зон. Ось промежуточного главного напряжения направлена вдоль простирания основных тектонических структур Курильского желоба, Курильской островной дуги. В соответствии с подобной ориентацией осей главных напряжений характер поля напряжений для всех глубинных интервалов в коре и мантии – горизонтальное сжатие (рис.12).

С глубиной наряду с основным типом напряженного состояния появляются локальные участки с преимущественным тем или иным режимом поля напряжений. Наиболее ярко это отражается для глубинного интервала 60-120 км. Здесь помимо преимущественного типа горизонтального сжатия появляются локальные участки горизонтального растяжения, горизонтального сдвига, горизонтального сжатия в сочетании со сдвигом и участки, для которых тип напряженного состояния - поддвиг. В основном изменение характера поля напряжений наблюдается вблизи о. Хоккайдо. Как правило, области локальных аномалий приурочены к сегментам сочленения крупных литосферных плит или участкам резкого изменения простирания границ плит, т.е. к участку сопряжения Японской и Южно-Курильской сейсмофокальных областей района [Ребецкий, 2007].

Однородными выглядят распределения значений коэффициента Лодэ-Надаи, определяющего вид тензора напряжений (рис. 13). Для исследуемой области основной вид тензора напряжений – чистый сдвиг. Вблизи о. Хоккайдо наблюдается сочетание чистого сдвига с одноосным сжатием, когда значения коэффициента Лодэ-Надаи смещены в сторону положительных значений. При этом в районе островов Кунашир и Итуруп на разных глубинных интервалах отмечается область с напряженным состоянием, близким к одноосному растяжению, при котором значения коэффициента Лодэ-Надаи близки к –1.

Типичная для субдукционных зон ориентация осей главных напряжений отражается в устойчивой ориентации касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках с нормалями к центру Земли, в направлении от океанической плиты к континентальной. Подобная ориентация показывает направление воздействия активных сил со стороны



Рис. 10. Ориентация проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений максимального девиаторного сжатия.

Fig. 10. Projection of the plunging axes of principal stresses of maximum deviational compression, σ_3 to the horizontal plane.



Рис. 11. Ориентация проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений максимального девиаторного растяжения.

Fig. 11. Projection of plunging axes of principal stresses of maximum deviational extension, σ_1 to the horizontal plane.



Рис. 12. Тип напряженного состояния.

Fig. 12. Schemes of states of stresses.



Рис. 13. Вид тензора напряжений и значения коэффициента Лодэ-Надаи.

Fig. 13. Schemes of stress tensors (the Lode-Nadai coefficient).



Рис. 14. Ориентация осей поддвиговых касательных напряжений τ_z на горизонтальных площадках с нормалью в глубь Земли, вместе с их относительной величиной τ_z/τ , где τ – максимальные касательные напряжения.

Fig. 14. Orientations of axes of underthrusting tangent stresses on the horizontal plane, and relative values τ_z/τ_z , where τ is maximum tangent stress.



Рис. 15. Распределение относительного эффективного всестороннего давления p^*/τ_{f} .

Fig. 15. Distribution of relative effective all-around pressure p^*/τ_{f} .

верхней мантии (рис. 14).

В целом для района исследований распределение эффективного всестороннего давления носит мозаичный характер. Для всех глубинных уровней повышение значений относительных величин эффективного давления р*/т_f наблюдается в направлении с юго-запада на северо-восток (рис. 15). С глубиной увеличивается число областей минимального значения этих параметров, при этом они расположены достаточно мозаично. Для всех глубинных уровней имеются довольно крупные участки, в пределах которых параметр эффективного всестороннего давления принимает значения отвечающие среднему уровню от 4-12. Большая эффективность хрупкого разрушения наблюдается в областях среднего уровня девиаторных и изотропных напряжений. Здесь отмечается максимум снимаемых напряжений [Ребецкий, 2007].

Анализ области подготовки Шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 г., в интервале глубин 0–30 км, показал, что она достаточно однородна и соответствует среднему уровню напряжений. Очаг землетрясения находится в области наименьших величин относительного эффективного давления, это согласуется с методикой Ю.Л. Ребецкого по выявлению областей повышенной сейсмоопасности [*Ребецкий, 2007*].

Напряженное состояние земной коры и верхней мантии до и после Шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 г. указывает, с одной стороны, на наличие обширных областей устойчивого поведения параметров тензора напряжений, а с другой – на присутствие локальных участков аномально быстрого изменения этих параметров.

Заключение

Особенности тектонических напряжений, проявившиеся в сейсмодислокациях и тектонических подвижках в земной коре, рассмотрены совместно с результатами исследований глубинного строения земной коры по профилю «Шантары – Матуа» с разрезом гипоцентров землетрясений в 200-километровой полосе от Евроазиатского континента до Курил (о. Матуа). Выявлены их закономерности в зонах глубинных разломов. Положение гипоцентров и сейсмодислокации в очагах катастрофического Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. (М=8.3) и сильного землетрясения 13.01.2007 г. (М=8.1) сопоставлены с глубинным строением земной коры по данным ГСЗ, КМПВ, МОВ-ОГТ и МОВЗ района Средних Курил. Установлены их особенности в глубинных структурах коры и в сейсмофокальной зоне (СФЗ). Пологий надвиг 15.11.2006 г. произошел в районе западной приостровной границы СФЗ, а сброс 13.01.2007 г. - в районе ее восточной приокеанической границы. Анализ последующих сильных землетрясений с магнитудой 6.5-7.4, произошедших в 2006-2009 гг. в этом районе, подтвердил выявленную закономерность. Гипоцентры землетрясений 15.11.2006 г., 03.03.2008 г. и 07.04.2009 соответствовали северо-западной внешней границе СФЗ, а гипоцентры событий 13.01.2007 г. и

15.01.2009 г. находятся на продолжении внутренней юго-восточной границы. Установлена цикличность в смене характера напряженного состояния литосферы и соответствующих сейсмодислокаций в очаговой зоне катастрофического Шикотанского землетрясения 4.10.1994 г. с магнитудой 8.1, выразившаяся в закономерном чередовании условий сжатия и растяжения. Реконструкция напряженного состояния земной коры и верхней мантии Южных Курил показала, что для этого района характерно, с одной стороны, наличие обширных областей устойчивого поведения параметров тензора напряжений, а с другой – присутствие локальных участков аномально быстрого изменения этих параметров.

Литература

- Аносов Г.И., Аргентов В.В., Петров А.В., Злобин Т.К., Снеговской С.С., Киктев Ю.В. Новые сейсмические данные о строении земной коры центрального звена Курило-Камчатской островной дуги // Тихоокеанская геология. – 1988. – № 1. – С. 10–18.
- Землетрясения Северной Евразии в 1994 году. М.: ГС РАН, 2000. С. 292–297.
- Злобин Т.К. Строение земной коры и верхней мантии Курильской островной дуги (по сейсмическим данным). – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. – 150 с.
- Злобин Т.К. Западная граница Охотской литосферной плиты // Общие вопросы геотектоники: Тезисы докладов 7-й международной конференции по тектонике плит им. Л.П. Зоненшайна. – М., 2001. – С. 373–374.
- Злобин Т.К. Строение земной коры Охотского моря и ее нефтегазоносность в северо-восточной (прикамчатской) части (по сейсмическим данным). – Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2002. – 97 с.
- Злобин Т.К., Бобков А.В. Встречные сейсмофокальные зоны Охотской литосферной плиты // Доклады АН. – 2001. – Т. 381, № 5. – С. 677–680.
- Злобин Т.К., Злобина Л.М. Строение земной коры Курильской островной системы // Тихоокеанская геология. – 1991. – № 6. – С. 24–35.
- Злобин Т.К., Костюкевич А.С., Злобина Л.М. Структура земной коры Средних Курил по данным сейсмического моделирования // Тихоокеанская геология. 1998. № 2. С. 115–121.
- 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 Средних Курил // Доклады АН. – 2008. – Т. 420, № 1. – С. 111–115.
- Злобин Т.К., Полец А.Ю. Сейсмодислокации и разломы земной коры в западной части Охотского моря по профилю Шантары – Северный Сахалин – Поднятие АН СССР // Тектоника и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: Тезисы докладов всероссийской конференции. – М., 2008. Т. 2. – С. 255–257.
- Злобин Т.К., Поплавская Л.Н., Левин Б.В., Сафонов Д.А., Полец А.Ю., Рудик М.И. Вариации поля упругих напряжений и основные сейсмодислокации в очаговой зоне Шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 года // Доклады АН. – 2008. – Т. 419. № 6. – С. 820–823.
- Курильские острова (природа, геология, землетрясения, вулканы, история, экономика) / Под ред. Т.К. Злобина и М.С. Высокова. – Южно-Сахалинск: Сах. кн. изд-во, 2004. – 227 с.
- Объяснительная записка к тектонической карте Охотоморского региона масштаба 1:2500000. – М.: ИЛОВМ РАН, 2000. – 193 с.
- Полец А.Ю., Злобин Т.К. Анализ разрезов гипоцентров афтершоков Симуширских землетрясений 15.11.2006 и 13.01.2007 гг // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: материалы Третьей Сахалинской молодежной научной школы. – Южно-Сахалинск: Ин-т морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2008. – С. 80–81.
- Полец А.Ю., Злобин Т.К. Глубинный разрез земной коры, гипо-

центры землетрясений и их механизмы по профилю Шантары – Матуа // Тектоника и глубинное строение востока Азии. Четвертые Косыгинские чтения: доклады всероссийской конференции. – Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2009. – С. 268–271.

- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. – М.: ИКЦ Академкнига, 2007. – 406 с.
- Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона / В.В. Харахинов, И.К. Туезов, В.А. Бабошина и др. – М.: Национальный геофизический комитет РАН, 1996. – 337 с.
- Тараканов Р.З., Левый Н.В. Полиастеносферная модель верхней мантии Земли по сейсмологическим данным // Доклады АН СССР. 1967. Т. 176, № 8. С. 571–574.

Злобин Тимофей Константинович, докт. геол.-мин. наук, с.н.с., зав. лабораторией Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693010, Южно-Сахалинск, а/я 53 тел.: 89147527290, e-mail: t.zlobin@mail.ru

 \bowtie

Полец Анастасия Юрьевна, м.н.с. Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1 б Тел.: (4242) 793335, e-mail: polec84@mail.ru

Polets, Anastasia Yu., Junior Researcher Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch of RAS 1b Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia Tel.: (4242) 793335. e-mail: polec84@mail.ru