



## RELATIONS OF GEODYNAMIC PROCESSES, TECTONIC STRESSES AND STRONG EARTHQUAKES ON THE MIDDLE KURIL FROM 2006 THROUGH 2009 WITH ERUPTION OF THE SARYCHEV PEAK VOLCANO

T. K. Zlobin<sup>1,2</sup>, A. Yu. Polets<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Marine Geology & Geophysics FEB RAS, 693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Nauka street, 1b, Russia*

<sup>2</sup>*Sakhalin State University, 693008, Yuzhno-Sakhalinsk, Lenin street, 290, Russia*

**Abstract:** It is suggested that the eruption of the Sarycheva Peak volcano on 11 June 2009 may have been related to strong earthquakes which occurred in the Middle Kuril Islands from 2006 through 2009 (Figure 1), geodynamic processes (such as tectonic activation, subduction, and friction of contacting blocks), tectonic stresses, melting of rocks, rising of the melting substance, gases and fluids.

The publication discusses the earthquake hypocenters profile along the Kuril Islands (Figure 2), the seismogeological depth profile of volcanoes of the Kuril Islands that was published by T.K. Zlobin (Figure 3), and positions of the magmatic chamber and the seismogenic zone of the Sen-Helens volcano from the publication by S. Carey (Figure 4).

The map of earthquake epicenters for the Middle Kuril Islands is constructed on the basis of the NEIC catalogue (Figure 5). A corresponding depth profile showing earthquake hypocenters is constructed (Figure 6).

An aseismic area is detected underneath the Matua Island (Sarychev Peak volcano); it is almost 30 km wide and about 200 km thick. In the Middle Kuril Islands, magma lifting and eruption were facilitated by stretching of the lithosphere (Figure 7), occurrence and activation of breaks, fractures and faults due to earthquakes which occurred from 2006 through 2009, and lifting of gas and fluids (Figure 8). The eruption was possible by explosion upon instant injection of fluids into the porous space due to considerable shear stresses, which occurred after the earthquakes, and the reaction of dehydration. It can also result from supply of volcanic gases and fluids, according to the vacuum-explosion fluid dynamics model.

*Key words:* volcanic eruption, earthquake, the Middle Kuril Islands, gas, fluid, subduction.

**Recommended by** Yu.L. Rebetsky 5 May 2011

**Citation:** Zlobin T.K., Polets A. Yu. Relations of geodynamic processes, tectonic stresses and strong earthquakes on the Middle Kuril from 2006 through 2009 with eruption of the Sarychev Peak Volcano // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011. V. 2. № 2. P. 161–174.

## СВЯЗЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2006–2009 ГГ. НА СРЕДНИХ КУРИЛАХ С ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА ПИК САРЫЧЕВА

Т. К. Злобин<sup>1,2</sup>, А. Ю. Полец<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1б, Россия*

<sup>2</sup>*Сахалинский государственный университет, 693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, Россия*

**Аннотация:** Извержение вулкана Пик Сарычева 11.06.2009 г., возможно, связано с сильными землетрясениями 2006–2009 гг. на Средних Курилах (рис. 1), геодинамическими процессами (тектонической активизацией, субдукцией, трением контактирующих блоков), тектоническими напряжениями, плавлением пород, подъемом расплавленного вещества, газов и флюидов.

Приведен разрез локализации гипоцентров землетрясений вдоль Курильской островной дуги (рис. 2), пример

глубинного сейсмогеологического разреза через вулканы Курил, построенного Т.К. Злобиным (рис. 3), положения магматической камеры и сейсмогенной зоны вулкана Сент-Хеленс по данным С. Карей [Carey, 1985] (рис. 4).

На Средних Курилах построена карта эпицентров землетрясений по данным NEIC (рис. 5), соответствующий глубинный разрез гипоцентров землетрясений (рис. 6).

Под о-вом Матуа (вулканом Пик Сарычева) выявлена асейсмичная область шириной около 30 км и глубиной до 200 км. Подъему магмы и извержению способствовали имеющиеся в литосфере Средних Курил условия растяжения (рис. 7), возникновение и обновление разрывов, трещин, разломов в результате землетрясений 2006–2009 гг., подъем газов и флюидов (рис. 8). Извержение могло осуществляться взрывным путем при мгновенном вспрыскивании флюидов в поровое пространство вследствие значительного уровня сдвиговых напряжений, возникших после землетрясений, и реакции дегидратации, а также в результате поступления вулканических газов и флюидов согласно вакуумно-взрывной флюидодинамической модели.

*Ключевые слова:* извержение вулкана, землетрясение, Средние Курилы, газ, флюид, субдукция, тектоническое напряжение.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Геодинамические процессы, глубинное строение, тектонические напряжения, землетрясения и вулканизм изучались на Курилах многие годы [Авдейко и др., 2001; Горшков, 1967; Злобин, 1987, 2005, 2008; Злобин и др., 2006, 2008; Zlobin et al., 2008, 2009; Симбирева и др., 1976; Тараканов, 1981; Тихонов и др., 2007; Федорченко, Родионова, 1975]. Они входят в зону перехода от Евразийского континента к Тихому океану и являются одной из областей с самой высокой сейсмичностью и активным вулканизмом. Здесь, как и во многих регионах мира, происходят то сильные и катастрофические землетрясения, то неожиданные и сильные извержения вулканов.

14 апреля 2010 г. в Исландии произошло извержение вулкана Эйяфьятлайокудль, имевшее катастрофические последствия для большей части Европы. Оно было относительно небольшим. Эруптивная колонна из водяных паров, вулканического пепла и летучих компонентов поднялась на высоту лишь 6 км.

11 июня 2009 г. на Средних Курилах (о-в Матуа) произошло извержение вулкана Пик Сарычева, которое было одним из крупнейших за исторический период. Высота пепловых облаков (до 16 км) была, видимо, максимальной за всю историю наблюдений. Выпадение пепла было зафиксировано на космических снимках со спутников. Шлейф вулканического пепла протянулся на 2,5 тыс. км на север и северо-запад и более чем на 3 тыс. км на восток и северо-восток. В результате извержения вулкана Пик Сарычева были обнаружены пирокластические потоки, излившиеся в океан и увеличившие островную сушу (территорию России) примерно на 1 км<sup>2</sup>. Минимальный объем изверженных пород составил около 0,4 км<sup>3</sup> [Левин и др., 2009].

Перед извержением вулкана, 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г., на Средних Курилах произошли катастрофическое и сильное землетрясения с магнитудами соответственно  $M_w=8.3$  и  $M_w=8.1$  [Zlobin et al., 2008;

Zlobin, Polets, 2009]. В дальнейшем за период с 2006 г. по 2009 г. на Средних Курилах в районе о-ва Симушир произошла серия сильных землетрясений (рис. 1), первые особенности которых были также изучены авторами [Zlobin et al., 2009b].

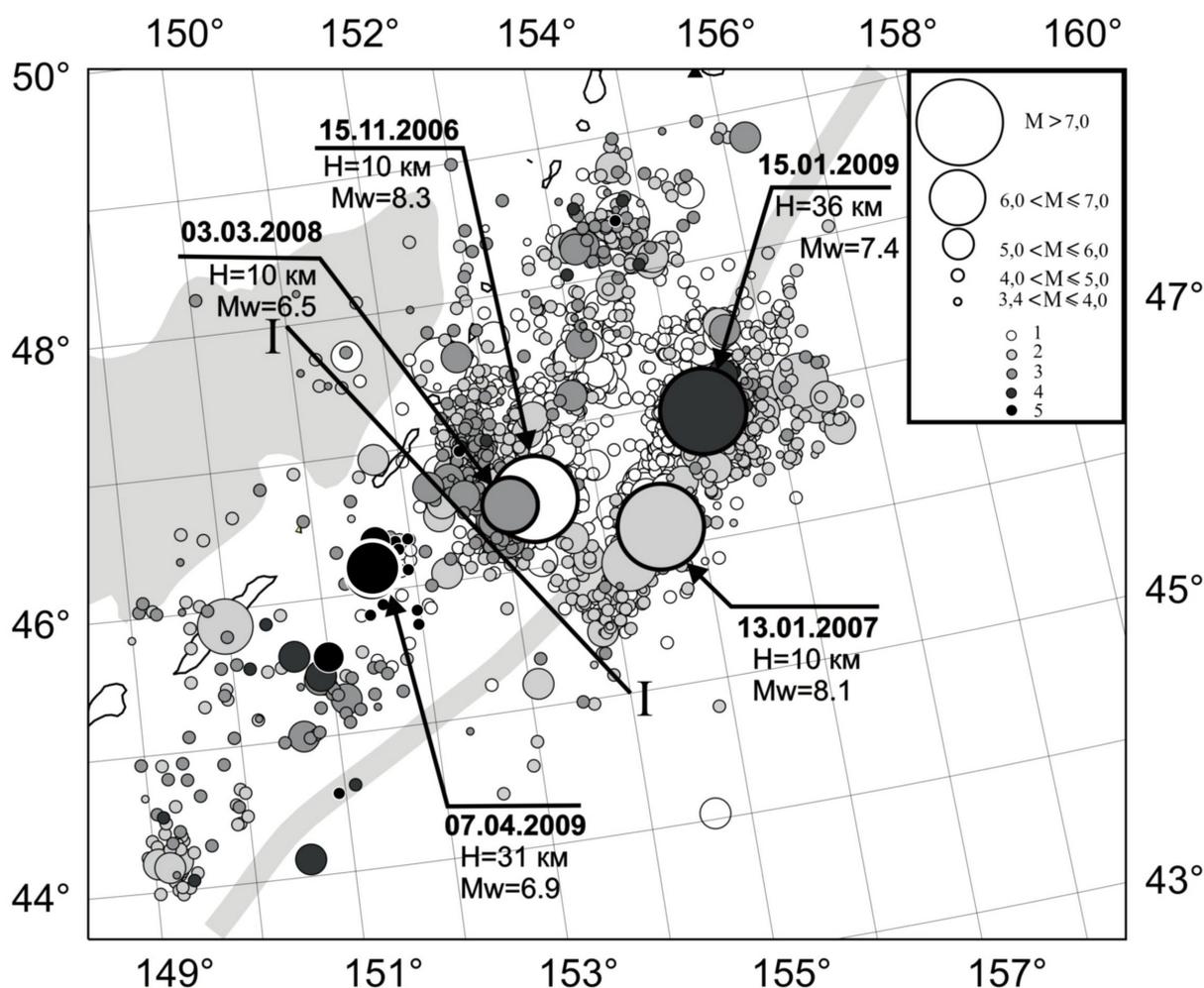
Цель настоящей работы – рассмотреть возможную связь между геодинамическими процессами, тектоническими напряжениями, сильными Симуширскими землетрясениями 2006–2009 гг. на Средних Курилах и последним извержением вулкана Пик Сарычева в 2009 г.

Для этого необходимо рассмотреть геодинамику Средних Курил, особенно сейсмичность, глубинное строение и возможное положение здесь корневых зон вулканов на основе настоящих и выполненных исследований [Злобин, 1987, 2005; Zlobin et al., 2008, 2009].

## 2. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ НА КУРИЛАХ

Привлечение результатов сейсмических исследований стало возможно благодаря тому, что практически на всех островах Курильской дуги и слагающих их вулканах помимо вулканологических работ [Мархинин, 1967; Федорченко, Родионова, 1975; и др.] с 1975 г. ИМГиГ ДВО РАН проводил сейсмические исследования методами обменных волн землетрясений (МОВЗ) [Злобин, 1987]. Это позволило изучить глубинную структуру литосферы, скоростные особенности земной коры, внутреннее строение вулканов, выявить магматические очаги и корневые зоны магмообразования.

Кроме того, выполнялись исследования внутреннего строения сейсмофокальной зоны (СФЗ). Последние данные [Злобин, Полец, 2009] свидетельствуют о сложном внутреннем строении СФЗ, ее поперечной неоднородности и зональности. Землетрясения, связанные с субдуцирующей Тихоокеанской плитой, ука-



**Рис. 1.** Карта эпицентров землетрясений 2006–2009 гг. на Средних Курилах. 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. 1.** Earthquake epicentres map of the Middle Kuri Island. It includes earthquakes which occurred from 2006 through 2009. The inset shows the following seismic events: 1 – November 15, 2006; 2 – January 13, 2007; 3 – March 03, 2008; 4 – January 15, 2009; 5 – April 07, 2009.

зывают на то, что она представляется не однородной единой плитой, а состоящей из сегментов (блоков), отличающихся по глубине, размерам, строению и сейсмичности. Выполненные исследования [Zlobin *et al.*, 2008, 2009a, 2009b] показали, что последние сильные землетрясения на Курилах могут быть связаны с тектономагматической активностью Среднекурильского сегмента, включающего острова от Симушира до Матуа.

При этом анализ сейсмичности показал, что извержению вулкана Пик Сарычева не предшествовала какая-либо повышенная сейсмичность непосредственно в районе о-ва Матуа. Здесь не были зарегистрированы никакие значимые предшествующие землетрясения или сейсмические признаки произошедшего извержения. Надо подчеркнуть, что в данном случае мы имеем в виду не возможные микроземлетрясения, т.е. мелкие, вулканические землетрясения, которые могли быть

связаны непосредственно с движением магмы по выводному каналу, а сильные тектонические землетрясения с магнитудами  $M \geq 3-5$ , проявление которых связано с глубинными процессами. Это вызывает необходимость проанализировать особенности глубинного строения литосферы, сейсмичность за длительный период и тектоническое поле напряжений в районе Средних Курил под о-вом Матуа, где расположен вулкан Пик Сарычева.

Основную информацию о сейсмичности недр Курил дают карты эпицентров и глубинные разрезы гипоцентров землетрясений. Ранее за период инструментальных наблюдений с 1995 г. по 2000 г. по данным Сахалинского филиала ГС РАН мы построили разрез гипоцентров землетрясений вдоль Курильской островной дуги в полосе 100 км (рис. 2) и рассмотрели его [Злобин и др., 2006]. Разрез показал, что в литосфере на глубинах от 70 до 200 км имеет место практически

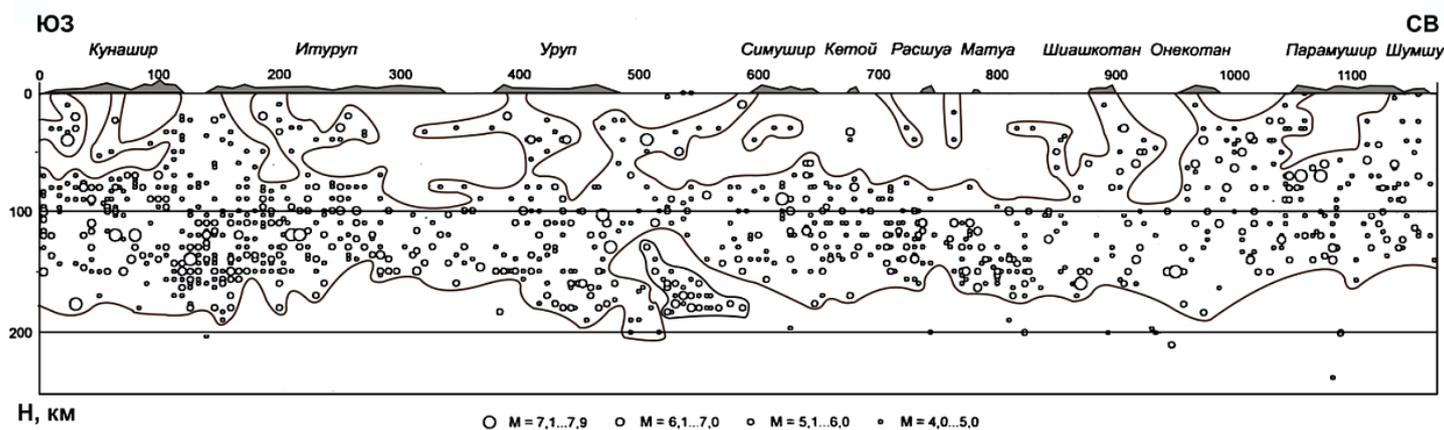


Рис. 2. Глубинный разрез гипоцентров земной коры и верхней мантии вдоль Курильской дуги по данным СФ ГС РАН за 1995–2000 гг. (составил А.О. Бобков). Разный размер кружочков соответствует разным значениям магнитуд землетрясений.

Fig. 2. Depth profile of earthquakes hypocenters in the crust and the upper mantle along the Kuril Arc according to the data from the Sakhalin Branch of the Geological Survey of RAS for the period from 1995 through 2000 (according to A.O. Bobkov). Circles are sized to denote earthquake magnitudes.

сплошное поле гипоцентров землетрясений, в то время как в земной коре под вулканами Курильской гряды часто имеются области отсутствия землетрясений, что требует проведения анализа сейсмичности.

При более детальных работах, выполненных в процессе многолетних сейсмических исследований строения литосферы с помощью МОБЗ на вулканах Курильской островной дуги, нами были построены глубинные сейсмические разрезы земной коры и верхней мантии вдоль большинства вулканов и островов Курильской дуги [Злобин, 1987], например вдоль о-ва Кунашир [Злобин, 2008] (рис. 3).

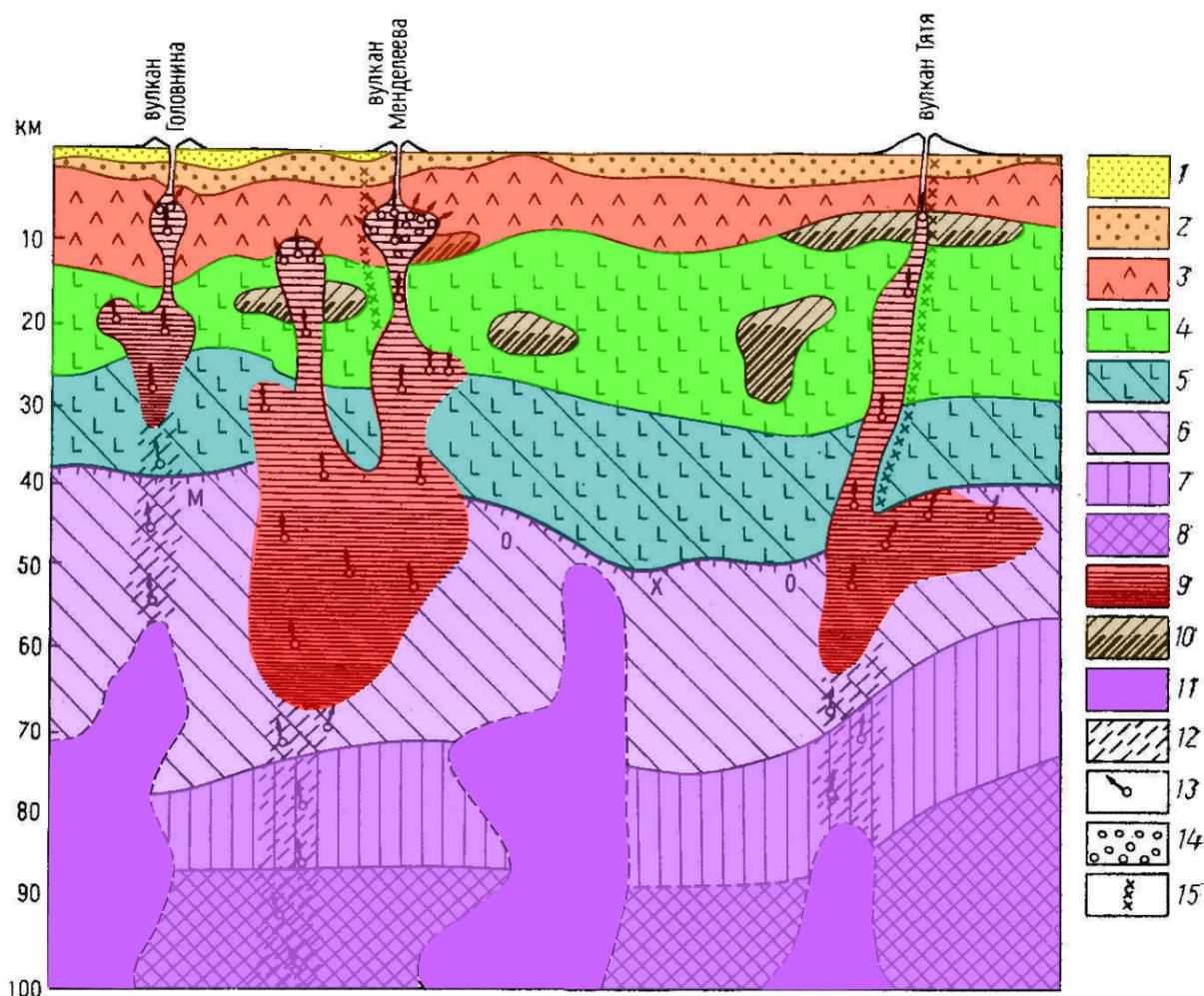
Это позволило выделить области отсутствия обменных волн землетрясений и дать им более обоснованную интерпретацию. Аномальное затухание в них сейсмических волн, преимущественное затухание или отсутствие поперечных волн, а также приуроченность к действующим вулканическим постройкам позволили отождествлять эти области с областями однородной, гомогенной частично расплавленной породы, которые мы связывали с магматическими очагами, а также зонами магмообразования [Злобин, 1987]. При этом названные зоны расположены практически везде в пределах выделенных нами областей отсутствия гипоцентров землетрясений. Сопоставление областей отсутствия обменов и областей отсутствия землетрясений показало их хорошее соответствие. Положение очагов хорошо видно на глубинном сейсмическом разрезе литосферы под о-вом Кунашир, где были выполнены наиболее детальные работы МОБЗ (рис. 3).

Поскольку землетрясения указывают на хрупкость среды, а деформации в очаге землетрясения исключают наличие пластичного, расплавленного вещества, о

возможном существовании непосредственно магматического очага вулкана можно говорить только вне наличия землетрясений. Это подтвердилось при детальном анализе слабой местной сейсмичности на вулкане Сент-Хеленс (рис. 4). С. Карей [Carey, 1985] показал, что в магматической камере нет землетрясений, вызванных подъемом магмы, а сейсмогенная зона находится за ее пределами, окружает ее и оконтуривает. То же показали детальные исследования сейсмичности Гавайской вулканической системы при построении ее пространственно-временной модели путем томографического анализа сейсмичности, проведенные П.Е. Котляром [1989]. При этом вычисления положения гипоцентров выполнялись с точностью  $\pm 1.0$  км.

Таким образом, области, связываемые с магматическими очагами, можно выявить по сейсмическим данным. Это может быть выполнено так, как показал С. Карей, а также Т.К. Злобин методом МОБЗ [Злобин, 1987]. Кроме того, выявление областей, которые могут быть связаны с магматическими очагами вулканов, можно осуществлять известными сейсмическими способами. Так, С.Т. Балеста оценил очаговую область на сейсмических разрезах по данным ГСЗ путем сейсмического просвечивания вулкана Безымянный в Ключевской группе вулканов [Балеста, 1981].

Поэтому нами для анализа связи извержений вулкана Пик Сарычева и землетрясений были построены карта эпицентров (рис. 5) и глубинный разрез гипоцентров землетрясений Средних Курил от о-ва Симушир до о-ва Харимкотан в полосе 50 км по каталогу NEIC в диапазоне  $3.4 < M \leq 8.3$  [National Earthquake Information Center, [http://neic.usgs.gov/neic/epic/epic\\_rect.html](http://neic.usgs.gov/neic/epic/epic_rect.html)] (рис. 6). Минимальное значение магнитуд на



**Рис. 3.** Глубинный сейсмогеологический разрез МОВЗ через вулканы о-ва Кунашир (Курильские острова) [Злобин, 2008]. 1–3 – комплексы (1 – верхнемиоценовый-четвертичный, 2 – верхнеолигоценый-миоценовый, 3 – геосинклинальный верхнего мела и палеогена (?); 4 – палеозойское (а возможно, и докембрийское) основание; 5 – базальтовый слой; 6–8 – слои верхней мантии; 9–11 – зоны отсутствия обменных волн: 9 – расслоенные магматические очаги, 10 – дифференцированные интрузивные тела базальтов – более ранних порций базальтовых магм, 11 – неинтерпретированные магматические тела; 12 – зоны проницаемости под очагами; 13 – флюидные трансмагматические потоки; 14 – реликты субстрата в областях магматического замещения; 15 – крупнейшие разломы.

**Fig. 3.** Seismogeological depth profile of volcanoes in the Kunashir Island (in the system of the Kuril Islands) [Злобин, 2008]. 1 – the Upper Miocene-Quaternary suite; 2 – the Upper Oligocene-Miocene suite; 3 – the geosyncline of the Upper Cretaceous and Paleogene (?); 4 – Paleozoic (or Precambrian) base; 5 – the basalt layer; 6–8 – the upper mantle layers; 9–11 – zones of absence of converted waves: 9 – stratified magmatic centers, 10 – differentiated intrusive bodies of basalts – earlier portions of basalt magmas, 11 – not interpreted magmatic bodies; 12 – permeability zones under the centers; 13 – trans-magmatic fluid streams; 14 – substratum relicts in areas of magmatic replacement; 15 – major faults.

рис. 5 составляет 4.

На карте эпицентров в исследованной прямоугольной области показаны землетрясения, которые были использованы для построения глубинного разреза вдоль линии профиля. На построенном затем разрезе гипоцентров землетрясений за 2000–2009 гг. по каталогу землетрясений NEIC околнурены области отсутствия землетрясений, выделенные в литосфере под Средними Курилами (рис. 6). Для уверенного установления областей отсутствия землетрясений околнурены только те из них, которые расположены за пределами области возможных ошибок в определении гипоцентров

по каталогу NEIC и показаны концентрическими зонами радиусом 15 и 20 км вокруг гипоцентров.

Выделенная таким образом основная область отсутствия землетрясений установлена нами на Средних Курилах. Она близвертикальна и имеет небольшой наклон на северо-восток. Выход ее на дневной поверхности соответствует 140–165 км профиля. При этом сам магматический очаг находился под постройкой вулкана, на 145–150-м км профиля (см. рис. 5). Именно здесь, на этих интервалах профиля, расположен о-в Матуа и вулкан Пик Сарычева, извергавшийся в 2009 г.

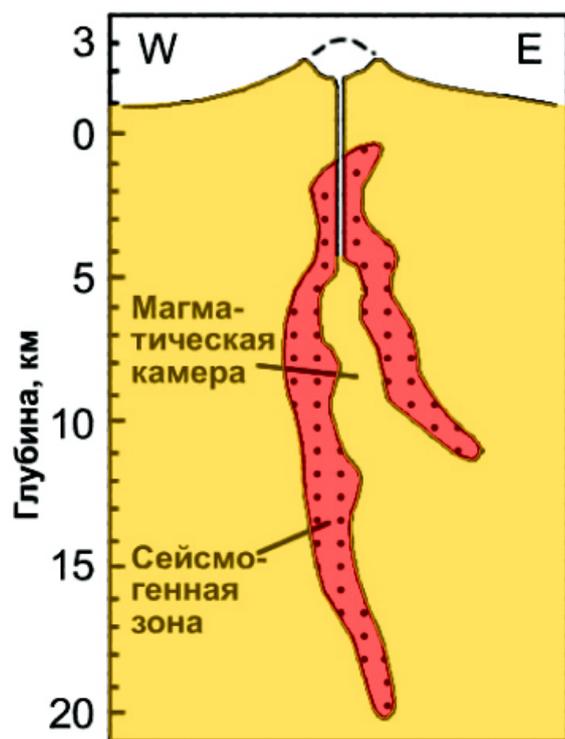


Рис. 4. Положение магматической камеры и сейсмогенной зоны вулкана Сен-Хеленс по [Carey, 1985].

Fig. 4. Positions of the magmatic chamber and seismogenic zone of the Sen-Helens volcano by S. Carey.

Выделенная нами область отсутствия землетрясений составляла около 25–50 км в ширину и до 200 км в глубину (рис. 6). Она может представлять собой ослабленную тектоническую зону. Ее форма сложная, близкая к изометричной, расширяется на глубинах 25–75 км и 120–175 км.

Рассматривая положение этой зоны и глубинных региональных разломов на тектонической карте Охотоморского региона под ред. Н.А. Богданова и В.Е. Хаина [Объяснительная записка..., 2000], можно увидеть, что вдоль Курильской островной дуги имеют место разломы (мегасдвиги, сбросы и взбросы), направление которых в основном соответствует простиранию дуги. Один из ее разломов расположен непосредственно в районе Средних Курил. Он проходит в 50 км восточнее о-ва Симушир в районе очаговой области катастрофического землетрясения 15 ноября 2006 г., а далее продолжается на север к о-ву Матуа и, согласно тектонической карте [Объяснительная записка..., 2000], практически проходит через вулкан Сарычева. Выделяемая нами область (рис. 6) может ассоциироваться с зоной дезинтегрированных тектонически ослабленных пород, связанных с этим разломом.

Кроме того, оценивая физические (упругие) свойства выделенной зоны, следует заметить, что согласно

сейсмическим данным ГСЗ С.М. Зверева, И.П. Косминской и др. на разрезах литосферы вдоль Курильской островной дуги устанавливаются области пониженной скорости ( $V_p=7.3-7.5$ ,  $V_p=7.7-7.9$  км/с) [Золоторев и др., 1972; Строение..., 1964]. Рассматривая сейсмические данные по Курильской островной дуге и прилегающим акваториям, можно видеть, что области пониженной сейсмической скорости выделяются под о-вом Матуа и северо-восточнее, на вышеназванных интервалах глубин, показанных вертикальными линиями на рис. 5. Как известно, пониженные скорости наблюдаются именно при наличии пластичных, частично расплавленных пород.

Согласно работе [Федотов, 2006], в области пониженных скоростей сейсмических волн в мантии ( $V_p=7.3-7.7$  км/с) находятся тела, с которыми связано их экранирование и наблюдается эффект дифракции волн от землетрясений с глубинами 100–200 км.

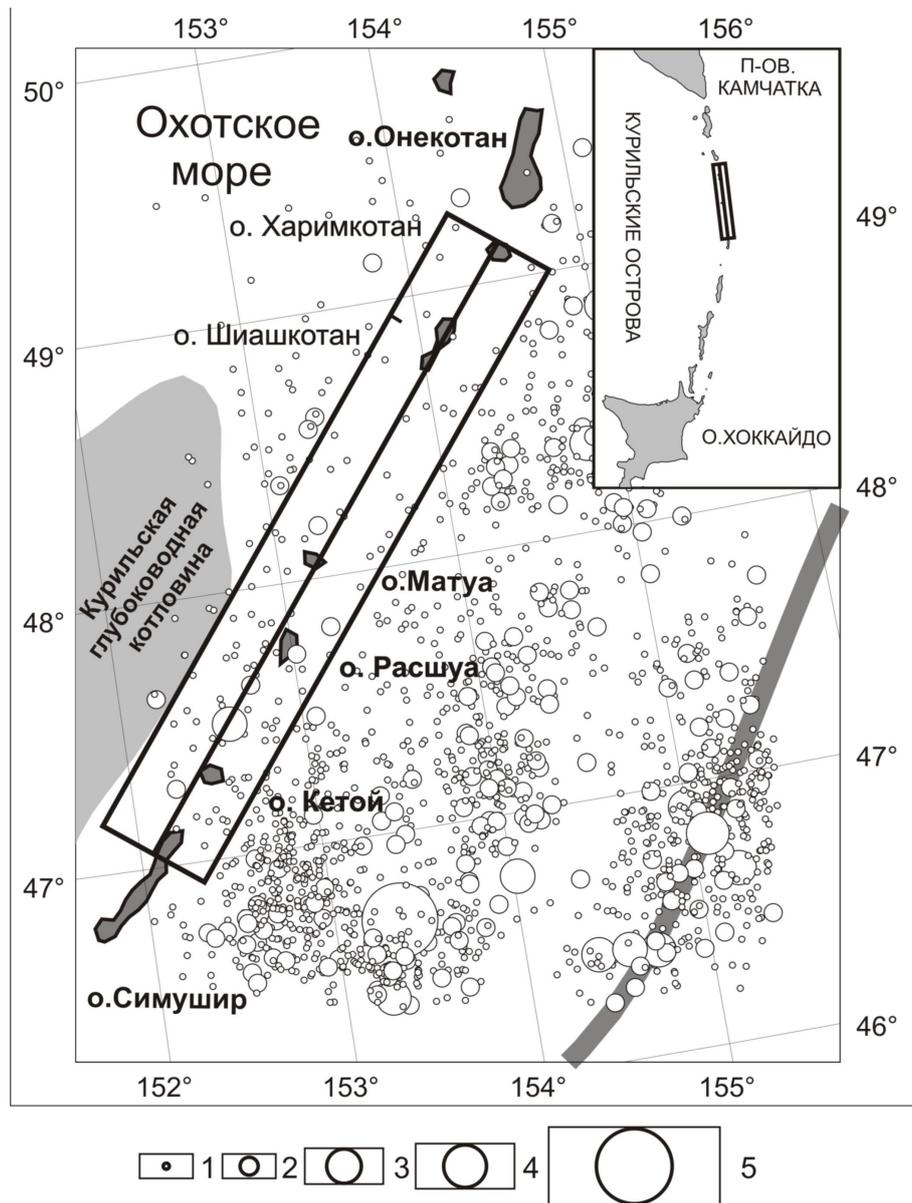
Анализируя положение выделенных зон, отметим, что в соответствии с построенным разрезом гипоцентров (рис. 6) первая область отсутствия землетрясений и пониженных скоростей находится на глубинах 25–75 км. Ниже, на глубинах 120–160 км, выделяется вторая аналогичная область. Проанализировав глубины зон и петрографический состав изверженных пород вулканов, можно заключить следующее. Судя по продуктам извержения вулкана Пик Сарычева (андезиты и андезибазальты) в 2009 г. и в предыдущие годы [Горшков, 1967; Левин и др., 2009; Федорченко, Родионова, 1975], а также согласно глубинным сейсмическим исследованиям вулканов Курильских островов [Злобин, 1987] магматический очаг вулкана Пик Сарычева располагается в нижнем слое земной коры, на глубинах от 10–15 до 25 км.

Однако при этом зона магнообразования может располагаться и глубже, в верхней мантии (см. рис. 6). Возможность существования этой второй глубинной области, выявленной по разрезу гипоцентров землетрясений под Средними Курилами, подтверждают ксенолиты, найденные в лавах вулкана Кунтоминар на соседнем острове Шиашкотан, а также вулкана Пик Немо (о. Онекотан) и в кальдере Заварицкого (о. Симушир) [Федорченко, Родионова, 1975].

Аналогичный вывод был сделан при исследованиях вулканов Камчатки. Результат исследований свидетельствует о том, что «глубина «корней вулканов» под Камчаткой может превышать 100 км» [Федотов, Потапова, 1974, с. 52].

### 3. АНАЛИЗ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛИТОСФЕРЕ ПОД КУРИЛАМИ

Большое значение для настоящих исследований имеет изучение упругого поля тектонических напряжений, напряженного состояния литосферы, положения осей сжатия и растяжения. Как известно, подъем

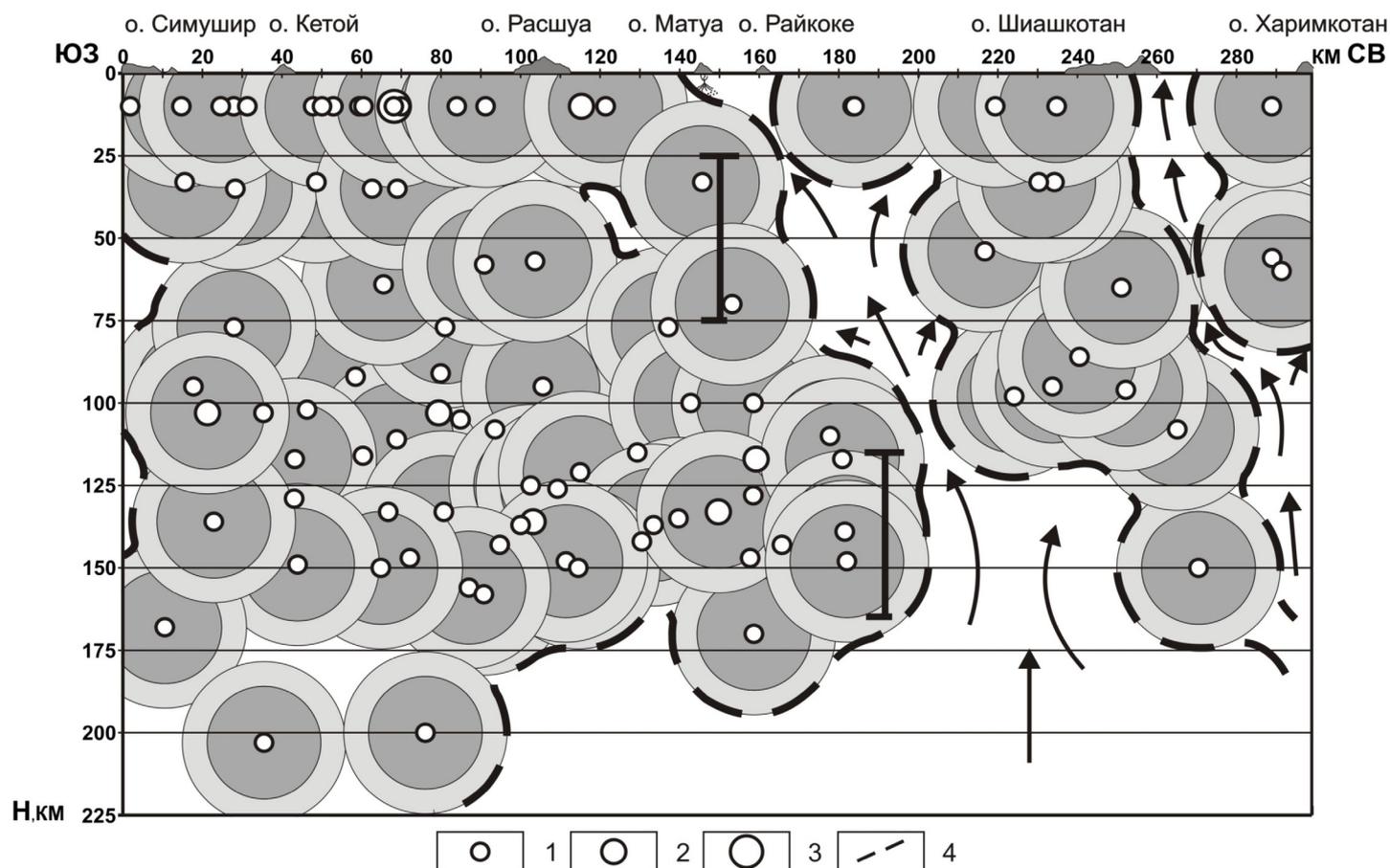


**Рис. 5.** Карта эпицентров землетрясений средней части Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны за 2000–2009 гг. по каталогу NEIC. На врезке – район исследований на Средних Курилах. В рамке – 50-километровая полоса эпицентров и положение линии разреза. 1–5 – магнитуда землетрясений:  $4 \leq M < 5$  (1);  $5 \leq M < 6$  (2);  $6 \leq M < 7$  (3);  $7 \leq M < 8$  (4);  $M \geq 8$  (5).

**Fig. 5.** Earthquake epicenters map of the middle part of the Kuril-Kamchatka seismic focal zone for the period from 2000 through 2009, based on the NEIC catalogue. The inset shows the area under study in the Middle Kuril Islands. The 50 km wide epicenter zone and the location of the profile are shown in the frame. Earthquake magnitudes: 1 –  $4 \leq M < 5$ ; 2 –  $5 \leq M < 6$ ; 3 –  $6 \leq M < 7$ ; 4 –  $7 \leq M < 8$ ; 5 –  $M \geq 8$ .

расплавленной породы (магмы) происходит по ослабленным зонам, разломам, тектоническим нарушениям, трещинам и разрывам, которые возникают в условиях растяжения в литосфере. Ниже проанализированы сейсотектонические условия в литосфере Курило-Камчатской дуги (в том числе и Средних Курил) и рассмотрено поле упругих напряжений, наличие обстановки горизонтального сжатия или растяжения в очагах землетрясений под Курило-Камчатской островной дугой [Симбирева и др., 1976]. Анализ этих дан-

ных показывает следующее. Характер деформации структур земной коры и верхней мантии (глубины 0–60 км) блока в центре Курильской островной дуги, согласно И.Г. Симбиревой, С.А. Федотову и др. [Симбирева и др., 1976], обуславливает формирование области горизонтального растяжения (рис. 7). Вышеназванная обстановка латерального растяжения земной коры в районе Средних Курил свидетельствует о том, что она способствовала возникновению ослабленных зон, с которыми мог быть связан подъем магмы и изверже-



**Рис. 6.** Глубинный разрез гипоцентров землетрясений на Средних Курилах. 1–3 – гипоцентры землетрясений с магнитудой:  $4 \leq M < 5$  (1);  $5 \leq M < 6$  (2);  $M > 6$  (3); 4 – линия контура областей отсутствия землетрясений. Стрелками показано движение флюидов и теплового потока. Вертикальными прямыми линиями показано положение областей с пониженными сейсмическими скоростями по данным ГСЗ. Тонированные концентрические области вокруг гипоцентров – зоны возможной ошибки определения.

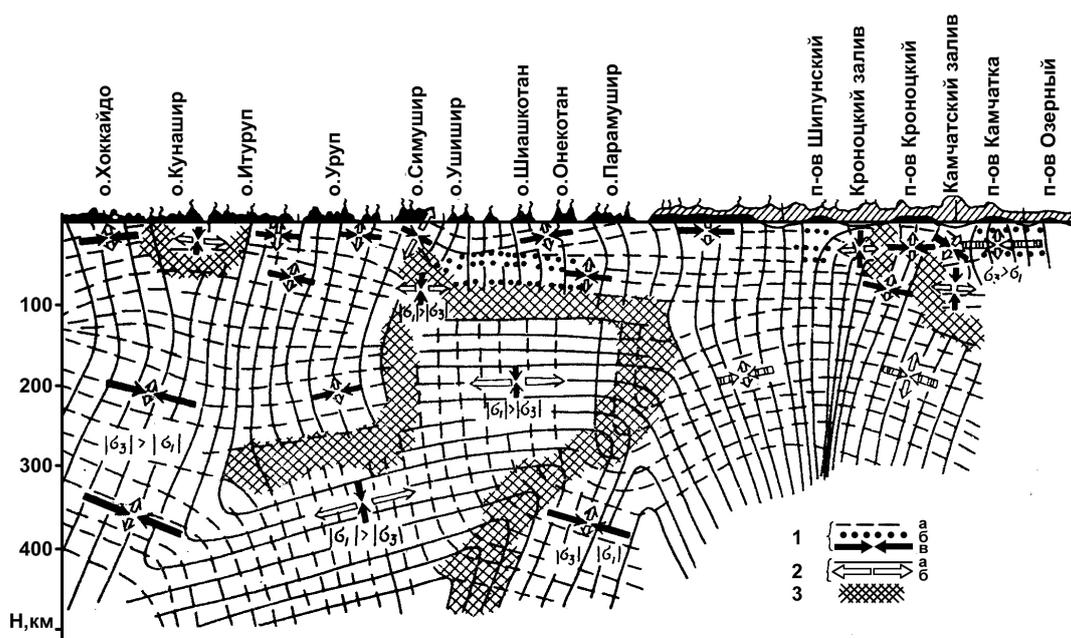
**Fig. 6.** Depth profile of earthquakes hypocenters in the Middle Kuril Islands. Earthquake hypocenters: 1 –  $4 \leq M < 5$ ; 2 –  $5 \leq M < 6$ ; 3 –  $M > 6$ ; 4 – planimetric line of areas without earthquakes. Arrows show movements of fluids and heat flows. Vertical straight lines show locations of areas with decreased seismic velocities, according to deep seismic sounding data. Shaded concentric areas around the hypocenters show zones of possible measuring deviations.

ниле вулкана Пик Сарычева о-ва Матуа.

Дальнейший анализ упругого поля напряжений показывает, что с глубин от 70 до 100 км выделяется зона максимальных градиентов локального поля напряжений. Она прослежена вдоль дуги под средними и северными Курилами и уходит почти вертикально вверх к острову Симушир, где преобладают растягивающие силы. Здесь же эта зона уходит вниз в верхнюю мантию. Ниже, на глубинах 100–250 км, в северной и центральной части Курильской дуги преобладают горизонтально ориентированные растягивающие силы, что способствует извержению вулкана Пик Сарычева на о-ве Матуа.

Анализ построенного глубинного разреза гипоцентров (см. рис. 6) показывает, что кроме вышеназванной области отсутствия землетрясений под о-вом Матуа выделяется также меньшая по ширине и глубине

подобная зона под северной частью о-ва Шиашкотан на 255–270-ом км профиля. На дневной поверхности ее выход имеет ширину около 15 км. В глубину она уверенно выделяется до 50 км, хотя глубже в верхней мантии возможно ее продолжение. Данная область расположена под вулканами Кунтоминтар и Синарка. Это позволяет говорить о том, что и под этими вулканами глубинное строение и условия аналогичны первой зоне (под о-вом Матуа), поэтому при соответствующем развитии глубинных процессов это может способствовать также и их извержению. Таким образом, выделенные нами области отсутствия землетрясений отвечают областям отсутствия обменных волн, положение которых, как было ранее показано (см. рис. 3), соответствуют вулканическим постройкам и магматическим очагам вулканов. При этом они отвечают также областям пониженной сейсмической скоро-



**Рис. 7.** Проекция траекторий осей сжатия и растяжения в вертикальной плоскости вдоль фокальной зоны, по работе [Симбирева и др., 1976]. 1 – траектория осей сжатия, ориентированных вдоль (а) и вкост (б) фокальной плоскости и положение в пространстве главных нормальных осей напряжений сжатия  $\sigma_3$  (в); 2 – траектория осей растяжения, ориентированных вдоль фокальной плоскости (а) и положение в пространстве главных нормальных осей напряжений растяжения  $\sigma_1$  (б); 3 – зоны максимальных градиентов локального поля напряжений. Величина стрелок соответствует количественному соотношению растягивающих и сжимающих сил.

**Fig. 7.** Projection of trajectories of compression and tension axes in the vertical plane along the focal zone, according to [Симбирева и др., 1976]. 1 – trajectories of compression axes oriented along (a) and across (б) the focal plane and spatial locations of the main normal axes of compression stresses  $\sigma_3$  (в); 2 – trajectories of tension axes oriented along the focal plane (а) and spatial locations of the main normal axes of tension stresses  $\sigma_1$  (б); 3 – zones of maximum gradients of the local stress field. Lengths of arrows denote quantitative ratios of tension and compression forces.

сти и зоне латерального растяжения в литосфере. Все это подтверждается и произошедшим извержением вулкана Пик Сарычева 11–16 июня 2009 г.

#### 4. СВЯЗ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА СРЕДНИХ КУРИЛАХ В 2006–2009 ГГ. И ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ПИК САРЫЧЕВА В 2009 Г.

Связь вулканов и землетрясений общеизвестна. Она проявляется даже в глобальном пространственном размещении землетрясений и вулканов на планете. «Еще в тридцатые годы XX в. было выяснено, что землетрясения с глубиной очага 100–200 км в тихоокеанском сейсмическом поясе происходят по большей части в тех областях, где имеются активные вулканы. Было естественно предположить, что между этими явлениями существует зависимость» [Федотов, 2006, с. 59].

Многолетние исследования вулканов и землетрясений на Камчатке и Курилах [Федотов, 2006] показали их локальную взаимосвязь. Более того, существует методика определения времени извержений вулканов исходя из количества энергии землетрясений [Токарев,

1976], которая основана именно на наличии связи между этими явлениями.

Однако, как писал С.А. Федотов, «до сих пор по этому поводу высказываются противоположные мнения» [Федотов, 2006, с. 59]. Общеизвестно, что землетрясения происходят в акустически жестких средах, способных привести к деформации слоев и к нарушению сплошности среды.

В то же время магматический очаг представляет собой уже по определению пластичную массу, т.е. это тело, в котором не могут возникнуть и располагаться очаги землетрясений, поскольку для возникновения и распространения упругих волн от землетрясений необходима упругая среда. Возникает противоречие в вопросе о возможности сильных землетрясений под вулканами.

Детальные исследования показывают, что когда идет речь о наличии землетрясений под вулканами, то имеется в виду регистрация мелких и слабых землетрясений, класс которых в основном от 6 до 9–10, а магнитуда  $M \sim 1-3$  [Федотов, 2006].

Слабые сотрясения могут происходить в малом объеме горных пород, представляющем собой довольно упругую, жесткую среду. В нем могут возникать

мелкие нарушения, трещины, сколы и т.д., в том числе и мелкие землетрясения.

Определение точного положения очага землетрясения, с одной стороны, исключает кажущееся физическое противоречие по отношению к требованиям среды, а с другой – является критерием определения положения магматического очага по сейсмическим данным. Это было показано в приведенных выше работах С. Карей [Carey, 1985] и П.Е. Котляра [1989] по Гавайям.

Выделенные нами области отсутствия обменных волн по данным МОВЗ (см. рис. 3), отождествляемые с магматическими очагами, имеют размеры в основном около 3–5 км в диаметре, что согласуется с работами С.А. Федотова [2006]. Области аномального строения земной коры, с которыми можно связывать магматический очаг по данным С.Т. Балесты, имеют размеры до 10 км и более. Радиус аномальной зоны неоднородности с пониженными вязкоупругими параметрами на глубинах от 10 до 20 км, выявленной по наблюдениям времен запаздывания сейсмических волн при сейсмических исследованиях на Ключевской группе вулканов, достигал 15 км [Балеста, 1981].

При этом важно отметить следующее. Очаг землетрясения, как область, в которой проявляется физическое воздействие землетрясения, в среде может иметь несопоставимо большие размеры, особенно при магнитудах, больших 7–8. Например, размер очага Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 г. на Южных Курилах с  $M=8.2$  составил около 270 км [Злобин, 2005]. Очаг катастрофического Симуширского землетрясения 15 ноября 2006 г. на Средних Курилах с  $M=8.3$ , судя по размерам области афтершоков, составлял около 250–300 км [Zlobin, et al., 2009a], а протяженность сейсморазрыва оценивается величиной около 300 км [Zlobin et al., 2008]. Рассматривая возможное воздействие землетрясений на магматический очаг вулкана и процессы, связанные с ними, необходимо учитывать среду такой значительной области. Это будем учитывать при рассмотрении возможной модели процессов.

## 5. СВЯЗ СЕЙСМОФОКАЛЬНОЙ ЗОНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ С СУБДУКЦИЕЙ

Как известно, концепция тектоники плит была основана на установлении закономерного распределения землетрясений на Земле, их концентрации в протяженных зонах, окаймляющих плиты, поэтому необходимо рассмотреть возможную связь вулканов и землетрясений. В моделях сейсмических и вулканических процессов эта связь проявляется через общий процесс – субдукцию. Благодаря существованию единого тектономагматического процесса, проявляющегося в субдукции в Курило-Камчатской зоне, извержения вулканов и землетрясения могут быть связаны между собой.

О связи вулканов с сейсмофокальным слоем писали С.А. Федотов, Р.З. Тараканов, П.И. Токарев и др. [Федотов, 2006; Тараканов, 1981; Токарев, 1976]. «П.И. Токаревым было обнаружено, что действующие вулканы Камчатки проектируются по вертикали вниз на ту узкую полосу в фокальном слое, в которой происходит резкое уменьшение сейсмической активности с глубиной» [Федотов, 2006, с. 59]. Исследования Р.З. Тараканова показали, что фокальная зона «состоит из мозаики блоков с повышенными и пониженными значениями скоростей и плотности гипоцентров, причем в областях с пониженными скоростью и сейсмической активностью может наблюдаться режим горизонтального растяжения» [Тараканов, 1981, с. 62]. На основании этого и анализа других параметров он выделил астеносферные слои. При этом Р.З. Тараканов [1981], как А.И. Фарберов [1974] и другие, рассматривал вещество мантии в этих слоях как близкое к плавлению или находящееся в частично расплавленном состоянии.

Согласно Р.З. Тараканову [1981] астеносферные слои, в которых наблюдается уменьшение максимальных магнитуд землетрясений, находятся на глубинах 60–80 км, 110–150 км, 220–290 км и 400–460 км. Предложена модель строения и схема возможных процессов в земной коре и верхней мантии, согласно которым из областей первичной генерации расплавов происходит отделение и подъем разогретых и обогащенных газами легкоплавких компонентов. Как пишет выше-названный автор, «эти компоненты формируют разуплотненные зоны, которые в виде неправильного цилиндра или конуса располагаются, по-видимому, на глубине 60–120 км. Они выявляются как области аномально высокого поглощения сейсмических поперечных волн и низких скоростей объемных волн» [Тараканов, 1981, с. 61].

Еще ранее вопрос о механизме подъема магмы, силах, вызывающих этот процесс, и возможном положении мантийных областей питания вулканов был рассмотрен в работах [Green, Ringwood, 1967; и др.]. Было показано, «что базальтовые магмы могут подниматься (выжиматься) из верхней мантии. Основание непрерывных вертикальных питающих магматических колонн должно находиться для колонн базальтового состава на глубинах 35–70 км или глубже, если в нижней части колонн находятся более плотные ультраосновные магмы» [Федотов, 2006, с. 58]. При этом ультраосновные магматические колонны поднимаются из фокального слоя с глубины 100–250 км. После выделения астеносферных слоев было естественным связать с ними поступление магмы к вулканам, что и сделали С.А. Федотов, Р.З. Тараканов и др.

Сложным является то, что процессы подготовки и землетрясений, и извержений вулканов, как известно, обычно являются длительными (сотни и миллионы лет), хотя проявляются они в событиях быстрых или почти мгновенных. Так, извержения вулканов (первая

эксплозия, взрыв) происходят в течение часов или суток, а время землетрясения (первого, главного, толчка) не превышает минуты, поэтому вопрос выявления и однозначного отождествления связи этих процессов остается сложным.

На о-ве Матуа периоды между извержениями вулкана Пик Сарычева составляли от нескольких до 63 лет. Извержение, предшествующее такому событию в 2009 г., было в 1946 г. Иным примером было извержение, произошедшее в Южной Исландии. Здесь на о-ве Хейман началось извержение вулкана Киркьюфелл, считавшегося потухшим 6000 лет [Раст, 1982].

Однако тектономагматические процессы, с которыми связаны последние сильные землетрясения на Средних Курилах в 2006–2009 гг. [Zlobin et al., 2009b], включая катастрофическое с магнитудой  $M_w=8.3$  [Zlobin et al., 2008], явно свидетельствуют об их активизации на Средних Курилах, где С.А. Федотов прогнозировал сильное землетрясение. В связи с произошедшими здесь последними сейсмическими и вулканическими событиями необходимо рассмотреть такие возможные модели геодинамических (сейсмовулканических) процессов, которые смогли бы объяснить связь извержения вулкана Пик Сарычева в 2009 г. с землетрясениями 2006–2009 гг.

## 6. МОДЕЛИ И СХЕМЫ СЕЙСМОВУЛКАНИЧЕСКИХ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Схема вулканического процесса, при котором происходит гидростатический подъем магм из мантии, описана гипотезой Д.Н. Грина и А.Е. Рингвуда [Green, Ringwood, 1967]. Независимые данные геофизики и петрологии подтверждают эту гипотезу. Однако подъем тел лишь под действием гидростатических сил может осуществляться со скоростью порядка 1 см/год [Федотов, 2006].

Особо протекают вулканические процессы в зонах субдукции. Здесь в результате трения литосферных блоков происходит повышение температуры, плавление пород, изменение свойств магмы в зоне контакта и в очаге и ее подвижности. Фиксируется соотношение летучих соединений, вариации накопления газов и изменение их давления в магматическом очаге (рис. 8). Кроме того, «отделяющаяся от субдуцированной океанической коры вода мигрирует вверх и, попадая в область более высоких температур в пределах мантийного клина, является причиной плавления» [Авдейко, 2001, с. 24].

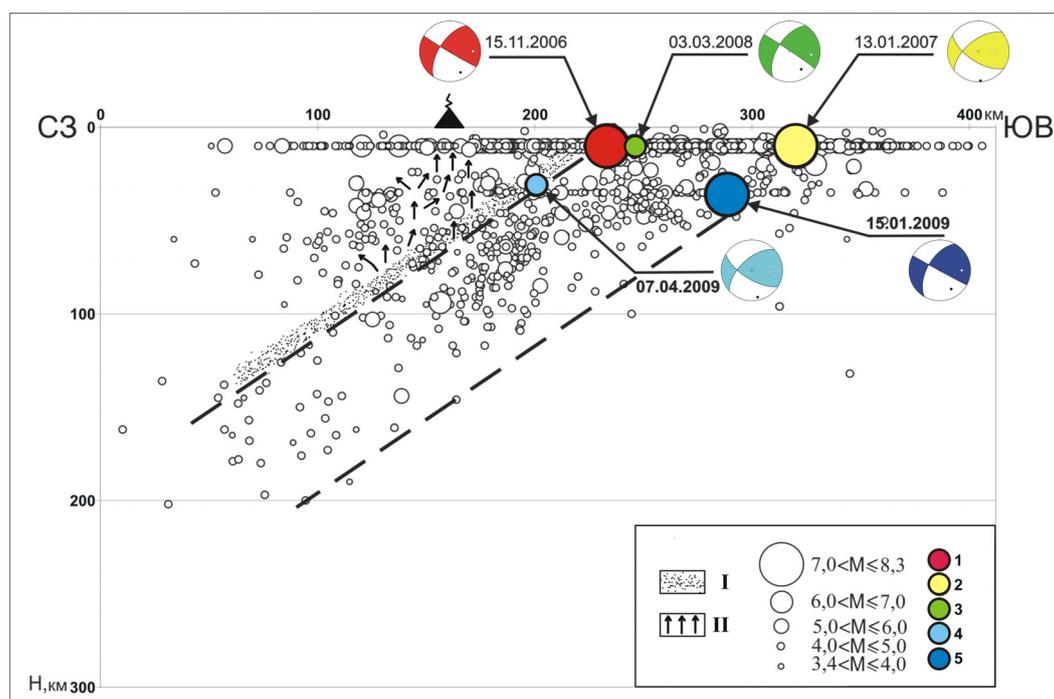
Важным фактором оценки состояния очага для последующих извержений вулканов являются вулканические газы, заключенные в магме. Они вызывают вулканические извержения или, по крайней мере, являются их движущей силой [Раст, 1982] и могли способствовать подготовке извержения вулкана Пик Сарычева.

Однако при рассмотрении возможной модели, способной объяснить механизм произошедшего извержения этого вулкана, связывая его с произошедшими в 2006–2009 гг. землетрясениями, необходимо изложить нижеследующее. Помимо общеизвестных и вышеназванных моделей следует рассмотреть такую из них, которая учитывала бы роль флюидов и их проникновение по тектоническим разломам, нарушениям, трещинам, а также роль тектонических напряжений и давления флюидов в трещинообразовании, о чем писал Ю.Л. Ребецкий [2008].

После землетрясений, тем более после таких сильных, как Симуширские 2006–2009 гг., значительно большее влияние на извержение вулкана оказывает не движение магмы или повышение температуры пород, а быстро поднимающиеся газы, флюиды. Землетрясение могло спровоцировать подъем газа в верхних горизонтах земной коры по разломам, в том числе вдоль субвертикальных тектонически ослабленных зон, таким, как мы выделили в районе Средних Курил и о-ве Матуа (см. рис. 6). Флюиды мигрируют по каналам повышенной проницаемости согласно концепции о прохождении через кристаллическую земную кору глубинного флюидопотока. По пути миграции флюидов их вместилищами (ловушками) могут быть очаги вулканов, куда поступали новые порции флюидов.

Эти флюиды и газы могли поступать по трещинам и разрывам, возникшим при Симуширских землетрясениях. При этом трещины возникают при определенной пороговой магнитуде [Ребецкий, 2008]. Важным было то, что при катастрофическом Симуширском землетрясении магнитуда ( $M=8.3$ ) превышала пороговое значение. Это, безусловно, привело к возникновению трещин и тектоническим нарушениям, по которым мог двигаться флюид.

По теоретическим представлениям [Sibson, 1974] уровень девиаторных напряжений в коре может достигать значений 3–6 килобар, однако результаты тектонофизической реконструкции напряжений, выполненной для субдукционных областей в работах [Ребецкий, 2006; Rebetsky, 2009; Rebetsky, Marinin, 2006], показали, что они не превышают 250–350 бар. Это связано с повышенным флюидосодержанием и большим давлением флюида в зонах разломов зон субдукции. В период подготовки землетрясения (т.е. хрупкого разрушения) давление флюидов в трещинно-поровом пространстве повышается, снижая силы сопротивления поверхностного трения на разрыве. Как показано Ю.Л. Ребецким, «в периоды локализованного сдвигового течения в разломах наблюдается дилатансия пород – появление микро- и макротрещин отрыва, которая тем выше, чем большая структурная неоднородность существует на микро- и макроуровнях. В эти моменты времени флюидное давление падает из-за увеличивающегося объема трещинно-порового пространства» [Ребецкий, 2008, с. 419]. При достаточно высоком уровне сдвиговых напряжений реакция де-



**Рис. 8.** Вертикальный разрез зоны гипоцентров землетрясений 15.11.2006 г. ( $M=8.3$ ), 13.01.2007 г. ( $M=8.1$ ), 03.03.2008 г. ( $M=6.5$ ), 15.01.2009 г. ( $M=7.4$ ) и 07.04.2009 г. ( $M=6.9$ ), их афтершоков вквост простирания Курильской островной дуги. Механизмы сильных землетрясений с магнитудой 5.0–8.3 показаны в проекциях на вертикальную плоскость. 1, 3 – пологий надвиг; 2 – сброс; 4, 5 – взбросы. I – зона плавления пород в области контакта плит; II – поток тепла и легкоподвижных компонентов из возможных областей дифференциации магмы.

**Fig. 8.** Vertical profile showing hypocenters of earthquakes which occurred on November 15, 2006 ( $M=8.3$ ), January 13, 2007 ( $M=8.1$ ), March 3, 2008 ( $M=6.5$ ), January 15, 2009 ( $M=7.4$ ), and April 7, 2009 ( $M=6.9$ ), their aftershocks across to the strike of the Kuril Arc. Mechanisms of strong earthquakes (magnitudes from 5.0 to 8.3) are shown in vertical projections. 1, 3 – low-angle thrusts; 2 – normal fault; 4, 5 – reverse faults. I – rock melting area at the plates’ contact; II – flow of heat and thinly fluids from potential magma differentiation areas.

гидратации осуществляется взрывным образом, со скоростью диффузионного процесса, на несколько порядков превышающей скорость диффузии в жидкой фазе. При таком развитии реакции дегидратации в областях сдвига в поровое пространство практически мгновенно впрыскивается большой объем флюидов [Ребецкий, 2006].

К вышесказанному следует добавить, что извержение вулкана Пик Сарычева на о-ве Матуа могло произойти также согласно вакуумно-взрывной флюидодинамической модели, развивающей идеи А.Д. Дмитриевского и Б.М. Валяева и реализованной Е.Н. Наумовой и др. [2008] при установлении связи между сейсмичностью и вулканизмом. Согласно им в определенных динамических условиях (разрывах сплошности среды) из камер происходят выбросы (впрыскивание) флюидов в полости, сопровождающиеся взрывами.

Эти процессы сопровождаются выделением большой энергии. Энергия для упругой отдачи может накопиться в верхней части земной коры (до 20 км). Как пишут Е.Н. Наумова и др., «декомпрессия в разломных зонах вызывает взрывное соединение гелия и водоро-

да, а мантийные пары и газы расширяют разломы и, тем самым, ослабевают сочленения блоков» [Наумова и др., 2008, с. 334].

Наличие связи между землетрясениями и выделением газа (в частности, метана) выявил А.И. Обжиров. Он установил, что на Сахалине и прилегающих акваториях подъем газов и флюидов был связан с Нефтегорским (27.05.1995 г.), Невельским (02.08.2006 г.) и другими землетрясениями [Обжиров, 2008].

В ряде случаев сказались землетрясения и на деятельности грязевых вулканов Сахалина. Так, в результате Углегорского землетрясения (04.08.2000 г.) магнитудой более 7 образовались сейсморазрывы, тяготеющие к зоне Западно-Сахалинского разлома, а в районе Пугачевской группы грязевых вулканов возникло 6 новообразований грязевулканической деятельности [Обжиров, 2008]. В.В. Ершовым с соавторами была «впервые обнаружена и представлена на конкретном фактическом материале ранее предполагавшаяся связь грязевулканической деятельности с сильными сейсмическими событиями в регионе. Установлены ко- и постсейсмические аномалии параметров

грифонной деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана, представляющего собой отклик на Горнозаводское и Невельское землетрясения» [Ershov et al., 2008, с. 537]. Все это говорит о связи между землетрясениями и вулканической деятельностью. Она может осуществляться быстро согласно названным нами выше моделям процессов в земной коре и мантии и передаваться через газы и флюиды.

Таким образом, можно заключить, что после сильных Симуширских землетрясений 2006–2009 гг. через возникшие в результате этих событий трещины тектонически ослабленной зоны вулканические газы повлияли на вулканический очаг вулкана Пик Сарычева, что способствовало его извержению 11–16 июня 2009 г.

## 7. Выводы

1. Показана возможная связь извержения вулкана Пик Сарычева в 2009 г. с сильными землетрясениями 2006–2009 гг. на Средних Курилах

2. В земной коре и верхней мантии на Средних Курилах в районе о-ва Матуа под вулканом Пик Сарычева на глубинном разрезе гипоцентров землетрясений (см. рис. 6) выделена асейсмичная область отсутствия землетрясений, способная вмещать магматический очаг. На основе изучения положения в пространстве главных нормальных осей напряжений сжатия и растяжения на Средних Курилах, включая о-в Матуа, установлено, что здесь имела место обстановка растяжения. Это способствовало подъему магмы из нижележащего очага.

3. На Средних Курилах после длительного сейсмического затишья 15 ноября 2006 г. произошло катастрофическое Симуширское землетрясение с магнитудой 8.3, после которого последовали сильные землетрясения [Zlobin, Polets, 2009; Zlobin et al., 2009b]. Усиление сейсмической активности, проявившейся в землетрясениях 2006–2009 гг. и извержении вулкана Пик Сарычева 11–16 июня 2009 г. на о-ве Матуа, свидетельствует о повышении тектономагматической активности Средних Курил и усилении движений этого сегмента Тихоокеанской литосферной плиты в последнее время.

4. Согласно геодинамической модели сейсмовулканических процессов подготовка извержения вулкана Пик Сарычева в 2009 г. связана с субдукцией Тихоокеанской плиты, трением контактирующих блоков, плавлением пород, последующим подъемом расплавленного вещества, флюидов и газов в зону магмообразования и магматический очаг (рис. 8), а само извержение связано с землетрясениями 2006–2009 гг. на Средних Курилах.

5. В результате катастрофического Симуширского землетрясения 2006 г. и последующих сейсмических событий возникли и обновились разрывы, трещины, разломы, по которым произошел подъем флюидов.

При значительном уровне сдвиговых напряжений, возникших вследствие землетрясений, реакция дегидратации могла осуществляться взрывным путем и в поровое пространство могли мгновенно вспрыскиваться флюиды. Это и могло послужить непосредственной причиной извержения вулкана.

6. Толчком к извержению могли послужить также вулканические газы и флюиды, действовавшие по механизму вакуумно-взрывной флюидодинамической модели А.Н. Дмитриевского и Б.М. Валяева.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А. Современная тектоническая структура Курило-Камчатского региона и условия магмообразования // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 9–33.
- Балеста С.Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 134 с.
- Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.
- 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. Динамика сейсмического процесса и строение очаговых зон сильных землетрясений Сахалина и Курил. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2005. 138 с.
- Злобин Т.К. Глубинная геодинамика и строение Земли. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2008. 124 с.
- Злобин Т.К., Волков И.А., Полец А.Ю. Анализ вулканизма и сейсмичности в литосфере Курил // Вулканизм, биосфера и экологические проблемы. Туапсе: НИГТЦ ДВО РАН, 2006. С. 39.
- Злобин Т.К., Полец А.Ю. Неоднородная (блоково-клавированная) структура Курильской островной дуги и сейсмофокальной зоны // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. М.: ГЕОС, 2008. Т. 1. С. 333–336.
- Золоторев Б.П., Соболев С.Ф. Связь петрохимических особенностей базальтоидов Курильской островной дуги и сопредельных районов с различными типами земной коры // Земная кора островных дуг и дальневосточных морей. Верхняя мантия № 9. М.: Наука, 1972. С. 171–191.
- Котляр П.Е. Пространственно-временные модели Гавайской вулканической системы (томографический анализ сейсмичности). Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1989. 40 с.
- Левин Ю.В., Рыбин А.В., Разжигаяева Н.Г., Василенко Н.Ф., Фролов Д.И., Майор А.Ю., Салюк П.А., Жарков Р.В., Прытков А.С., Козлов Д.Н., Чернов А.Г., Чибисова М.В., Гурьянов В.Б. Комплексная экспедиция «Вулкан Сарычева-2009» (Курильские острова) // Вестник ДВО РАН. 2009. № 6. С. 98–104.
- Мархинин Е.К. Роль вулканизма в формировании земной коры на примере Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 254 с.
- Наумова Е.Н., Соловьев В.А., Соловьева Л.П. Сейсмичность, грязевой вулканизм, нефтегазоносность и дегазация Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы: Материалы Всероссийской конференции, 22–25 апреля 2008 г. М.: ГЕОС, 2008. С. 334–336.
- Обжиров А.И. Миграция углеводородов из недр к поверхности и формирование нефтегазовых залежей и газогидратов в Охотском море в период сеймотектонических активизаций // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы: Материалы Всероссийской конференции, 22–25 апреля 2008 г. М.: ГЕОС, 2008. С. 359–362.
- Объяснительная записка к тектонической карте Охотоморского региона масштаба 1:2500 000. М.: ИЛОВМ РАН, 2000. 193 с.
- Раст Х. Вулканы и вулканизм: Пер. с нем. М.: Мир, 1982. 344 с.

- Ребецкий Ю.Л.* Дилатанция, поровое давление флюида и новые данные о прочности горных массивов в естественном залегаии // Флюид и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 120–146.
- Ребецкий Ю.Л.* Разломы как особое геологическое тело. Модель развития крупномасштабного хрупкого разрушения // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы: Материалы Всероссийской конференции, 22–25 апреля 2008 г. М.: ГЕОС, 2008. С. 418–420.
- Симбирева И.Г., Федотов С.А., Фиофилактов В.Д.* Неоднородности поля напряжений Курило-Камчатской дуги по сейсмологическим данным // Геология и геофизика. 1976. № 1. С. 70–86.
- Строение земной коры в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану.* М.: Наука, 1964. 308 с.
- Тараканов Р.З.* Фокальные зоны и их роль в развитии островодужных систем // Геология дальневосточной окраины Азии. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 53–66.
- Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Спирин А.И., Фролов Д.И.* Катастрофические Симуширские землетрясения 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. // Проблемы сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири: Тезисы докладов международного научного симпозиума, Южно-Сахалинск, Россия, 27–30 сентября 2007 г. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2007. С. 27–28.
- Токарев П.И.* Предсказание места и времени Большого Толбачинского извержения в июле 1975 года // Доклады АН СССР. 1976. Т. 229. № 2. С. 439–442.
- Фарберов А.И.* Магматические очаги вулканов Восточной Камчатки по сейсмологическим данным. Новосибирск: Наука, 1974. 88 с.
- Федорченко В.И., Родионова Р.И.* Ксенолиты в лавах Курильских островов. Новосибирск: СО АН СССР, 1975. 139 с.
- Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 435 с.
- Федотов С.А., Потапова О.В.* Предварительная карта тел на глубинах 30–100 км в верхней мантии под Камчаткой, экранирующих Р и S волны // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке / Отв. ред. С.А. Федотов. Новосибирск: Наука, 1974. С. 76–179.
- Федотов С.А., Уткин И.С., Уткин Л.И.* Оценка размеров коровых очагов вулканов и изменения их размеров во времени по данным о количестве, составе изверженных продуктов и глубине очага // Вулканоология и сейсмология. 2000. № 3. С. 3–14.
- Carey S.* The magma chamber beneath Mount St. Helens // Maritimes. 1985. V. 29. № 1. P. 10–11.
- Ershov V.V., Levin B.W., Mel'nikov O.A., Domansky A.V.* Manifestations of the Nevelsk and Gornozavodsk earthquakes of 2006–2007 in the dynamics of gryphon activity of the Yuzhno-Sakhalinsk gas-water-lithoclastic (mud) volcano // Doklady Earth Sciences. 2008. V. 423A. № 9. P. 1443–1447. doi:10.1134/S1028334X08090262.
- Green D.H., Ringwood A.E.* The genesis of basaltic magmas // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1967. V. 15. № 2. P. 103–190. doi:10.1007/BF00372052.
- National Earthquake Information Center.* [http://neic.usgs.gov/neic/epic/epic\\_rect.html](http://neic.usgs.gov/neic/epic/epic_rect.html).
- Rebetsky Yu.L.* Stress state of the Earth's crust of the Kuril Islands and Kamchatka before the Simushir earthquake // Russian Journal of Pacific Geology. 2009. V. 3. № 5. P. 477–490. doi:10.1134/S1819714009050108.
- Rebetsky Yu.L., Marinin A.V.* Preseismic stress field before the Sumatra-Andaman earthquake of 26.12.2004: a mode of metastable state of rocks // Russian geology and geophysics. 2006. V. 47. № 11. P. 1173–1185.
- Sibson R.H.* Frictional constraints on thrust, wrench and normal faults // Nature. 1974. V. 249. № 5457. P. 542–544. doi:10.1038/249542a0.
- Zlobin T.K., Levin B.W., Polets A.Yu.* First results of the comparison of catastrophic Simushir earthquakes on November 15, 2006 (M=8.3), and January 13, 2007 (M=8.1), with the deep structure of the Earth's crust in the Central Kuril Islands // Doklady Earth Sciences. 2008. V. 420. № 4. P. 615–619. doi:10.1134/S1028334X08040193.
- Zlobin T.K., Polets A.Yu.* Source zones of the catastrophic Simushir earthquakes on November 15, 2006 (Mw=8.3) and January 13, 2007 (Mw=8.1) and deep crust structure beneath the Middle Kuril segment // Russian Journal of Pacific Geology. 2009. V. 3. № 5. P. 460–469. doi:10.1134/S181971400905008X.
- Zlobin T.K., Poplavskaya L.N., Polets A.Yu.* Possibility of the reconstruction of the real dynamics of the Earth's crust (the example of the Southern regions of Sakhalin and Kuril Island) // Doklady Earth Sciences. 2009a. V. 427A. № 6. P. 1043–1046. doi:10.1134/S1028334X09060348.
- Zlobin T.K., Poplavskaya L.N., Polets A.Yu.* A series of strong and catastrophic Simushir earthquakes, 2006–2009: general features and seismotectonics of the source zones // Doklady Earth Sciences. 2009b. V. 428. № 7. P. 1227–1231. doi:10.1134/S1028334X09070411.



**Злобин Тимофей Константинович**, докт. геол.-мин. наук, г.н.с.  
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН  
693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16, Россия  
Тел.: 89147527290; ✉ e-mail: t.zlobin@mail.ru

**Zlobin, Timofei K.**, Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher  
Institute of Marine Geology and Geophysics, Far East Branch of RAS  
693022, Yuzhno-Sakhalinsk, Nauka street, 1b, Russia  
Tel.: 89147527290; ✉ e-mail: t.zlobin@mail.ru



**Полец Анастасия Юрьевна**, м.н.с.  
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН  
693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16, Россия  
Тел.: (4242)793335; e-mail: polec84@mail.ru

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