

## К ПРОБЛЕМЕ СЕЙСМИЧНОСТИ РАЗЛОМОВ САХАЛИНА\*

*С.М. Сапрыгин*

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;  
e-mail: vnf@imgg.ru

Поступила в редакцию 28 сентября 2009 г.

Рассмотрены основные разломы Сахалина, различающиеся своим поведением в региональном поле напряжений. Выделены запертые, свободные, разломы-волноводы и обводненные разломы. Такая характеристика разломов подчеркивает различие их сейсмической опасности и наиболее пригодна для сейсмического районирования.

**Ключевые слова:** разломы, региональное поле напряжений, сейсмическое районирование, о. Сахалин.

Спутниковая съемка эпицентра Нефтегорского землетрясения 1995 г. с помощью радиointерферометра [19] поставила точку в многолетней дискуссии: очагом тектонического землетрясения является магистральная трещина или разлом, а не объем некоторой области его афтершоков. Поэтому географию землетрясений необходимо увязывать с региональной сетью разломов. Такая связь признавалась, например, авторами схемы сейсмического районирования Сахалина [17], но не была реализована из-за существования многочисленных и разноречивых точек зрения на характер разломов и тектонику острова.

Рассмотрим эволюцию взглядов на разломы земной коры. Их картированием до середины XX века занимались геологи. Используя наблюдения по обнажениям и скважинам, они выделяли сбросы, надвиги и взбросы [5].

Но уже картирование сдвигов столкнулось с трудностями. И хотя В.С. Рождественский в своей статье [11] назвал Тымь-Поронайский разлом сдвигом, это было лишь предположением. Для того, чтобы оно стало реальностью, потребовались пятилетние геодезические наблюдения, установившие, что в 1979 г. по этому разлому произошел левый сдвиг ве-

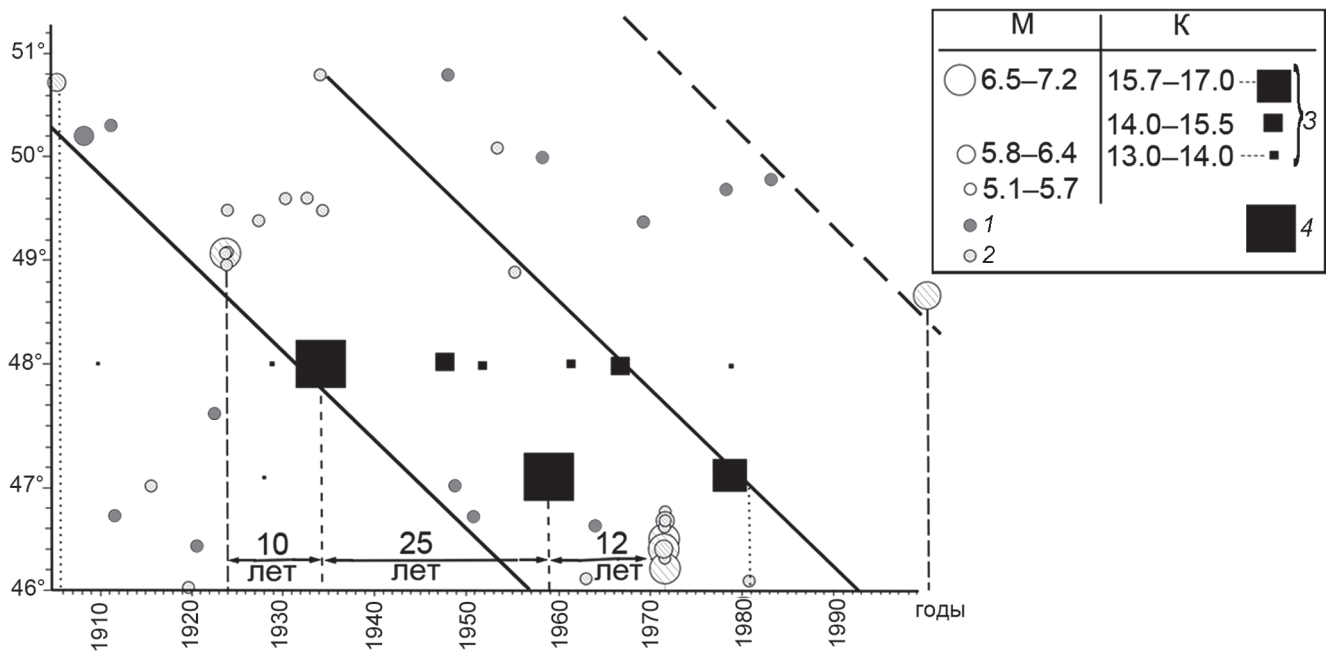
личной 45 мм, а затем эксплозия Южно-Сахалинского грязевого вулкана [6].

В своей монографии Дж. Райс [9] вводит понятие о деформационном фронте, который объединяет как сейсмические, так и несейсмические деформации (крип, грязевой вулканизм). Такой фронт движется с различной скоростью по надвигу и сбросу, и Дж. Райс предложил дифференциальные уравнения для их оценки. Эти уравнения решены им как по скоростям скольжения, так и по временам нагрузки и разгрузки. Если время нагружения и разгрузки надвига принять за 1, то аналогичный интервал в зоне сброса равен  $2/(1-\nu)=2.5$ , где  $\nu$  – коэффициент Пуассона, т.е. в таком фронте сброс нагружается и разгружается гораздо медленнее надвига.

Рис. 1 иллюстрирует распространение деформационного фронта вдоль разломов на Среднем и Южном Сахалине. Он выделяется по событиям с магнитудой  $M \geq 6.0$ . Энергетическая шкала крипа была создана по событию 1979 г., когда зафиксированы левый сдвиг (45 мм) крыла глубинного разлома, а затем эксплозия грязевого вулкана, расположенного в подвижном крыле.

Два характерных времени отмечаются на рис. 1 – интервал между землетрясением 1924 г. ( $M \geq 6.8$ ) и

\*По мнению рецензентов, проведенный автором анализ, результаты которого отражены в схеме разломов о. Сахалин (рис. 1), в связи с очевидной неоднозначностью выводов в отношении отнесения разломов к запертым и свободным, может быть использован при сейсмическом районировании Сахалина, но только с осторожностью и в составе комплексного подхода при решении этой проблемы.



**Рис. 1.** Последовательность и энергетика сейсмичности и крипа в недрах Среднего и Южного Сахалина в координатах “географическая широта – время”.

Эпицентры землетрясений, приуроченные к: 1 – Центрально-Сахалинскому, 2 – Западно-Сахалинскому глубинным разломам, 3 – энергетическая шкала крипа, 4 – эксплозии грязевых вулканов (1934 г. – Пугачевского, 1959 г. – Южно-Сахалинского). Наклонные линии – деформационные фронты.

начальной эксплозией Пугачевского грязевого вулкана в 1934 г. (10 лет) и следующий интервал между эксплозиями вулканов в 1934 и 1959 гг. (25 лет). Оба интервала фиксируют прохождение деформационного фронта вначале через зону надвига, а затем сброса, т.е. налицо хорошее согласие модели Дж. Райса с наблюдениями.

Итак, если использовать кинематические параметры разломов, то надо привлекать различные инструментальные наблюдения, которых мало на остальной территории Сахалина, исключая сейсмические данные. Поэтому требуется иной подход, учитывающий поведение того или иного разлома в региональном поле напряжений.

D.L. Turcotte [20], используя многолетние геодезические наблюдения на разломе Сан-Андреас, выделил в его зоне запертые и свободные отрезки. На первых с интервалом 50–60 лет происходили сильнейшие землетрясения, на вторых крылья разлома Сан-Андреас непрерывно смещались, препятствуя накоплению опасных напряжений. Эта ситуация повторилась и на Сахалине: Верхне-Пильтунский разлом был заперт в течение 1941–1970 гг. [2], что привело к катастрофическому Нефтегорскому землетрясению 1995 г. Примером свободного разлома служит Южно-Сахалинский,

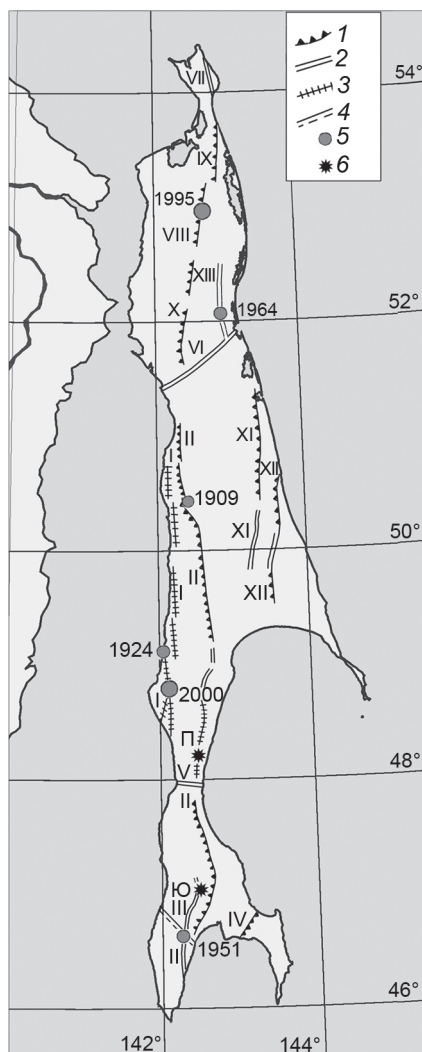
проходящий в субширотном направлении через асейсмичный перешеек Поясок [16].

Итак, перед нами задача – распространить подобную оценку на другие разломы Сахалина, используя различные геолого-геофизические данные. Расположение основных разломов взято из работ [4, 13] и показано на рис. 2.

Рассмотрим разломы, являющиеся границей Евразийской и Охотоморской плит на Сахалине [15].

Вдоль Лонгрийского сдвига на п-ове Шмидта простирается зона пластичных пород (серпентинитовый меланж), исключая накопление опасных напряжений. Поэтому этот разлом следует считать свободным.

Согласно GPS наблюдениям 2003–2006 гг., крылья Верхне-Пильтунского сдвига смещались со скоростью 5–6 мм/год [2], т.е. в настоящее время этот разлом является свободным. Если повторяемость сильных землетрясений на нем 400 лет [10], то пока неясно, какое время Верхне-Пильтунский разлом был заперт, а какое – свободен. Можно только предположить, что в условиях субширотного горизонтального сжатия каркаса острова [15] запертое состояние этого разлома будет более продолжительным. И поскольку это состояние является опасным, разряжаясь сильными землетрясения-



**Рис. 2.** Схема разломов Сахалина.

Разломы: 1 – запертые, 2 – свободные, 3 – волноводы, 4 – обводненные; 5 – эпицентры сильных землетрясений: Онорское 1909 г., Лесогорско-Углегорское 1924 г., Анивское 1951 г., Ногликское 1964 г., Нефтегорское 1995 г. и Углегорское 2000 г.; 6 – грязевые вулканы: П – Пугачевский, Ю – Южно-Сахалинский.

Разломы: I – Западно-Сахалинский, II – Центрально-Сахалинский, III – Лютогский, IV – Мерейский, V – Южно-Сахалинский, VI – Тымский, VII – Лонгрийский, VIII – Верхне-Пильтунский, IX – Эхабинско-Пильтунский, X – Дывыкский, XI – Центральный, XII – Прибрежный, XIII – сегмент Северо-Сахалинской сдвиговой зоны.

ми, то на региональной схеме надо показывать Верхне-Пильтунский разлом запертым.

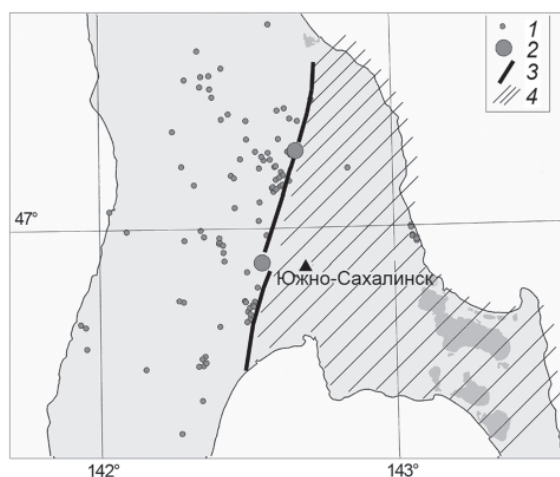
Продолжающие Верхне-Пильтунский сдвиг к северу Эхабинско-Пильтунский и к югу Дывыкский разломы дислоцированы взбросами амплитудой от 750 до 1500 м. Они заслуживают такой же оценки, т.е. на нашей схеме их надо обозначать запертыми.

Диагональный разлом, половина длины которого приходится на долину р. Тымь, назван Тымским [3]. Он продолжается подводными ложбинами на западном и восточном шельфе острова. Крылья этого разлома непрерывно смещаются, иначе подводные ложбины были бы замкнуты в условиях интенсивной здесь абразии. Тымский разлом отнесен нами в категорию “свободных”, хотя очаг Ногликского землетрясения 1977 г. ( $M = 5.0$ ) находился в его зоне [8]. Но оно было единственным с 1928 г., когда события такой силы стали регистрировать без пропусков.

В монографии [7] приведена схема изосейст в результате Ногликского землетрясения 1964 г. с  $M = 5.8$ , показавшая, что изосейсты 7 и 8 баллов ориентированы вдоль Северо-Сахалинской сдвиговой зоны, а более низких (6, 5, 4) баллов – вдоль Тымского разлома. Таким образом, тектонический импульс распространился из продольного разлома в поперечный, подчеркивая макросейсмическими наблюдениями свободное состояние зон обоих разломов.

Сильные землетрясения 1924 и 2000 гг. произошли в зоне Западно-Сахалинского глубинного разлома, простирающегося меридионально. Такое простираение указывает, что этот разлом заперт при субширотном горизонтальном сжатии.

Следует обсудить еще одну механическую особенность разломов. Упругие напряжения распространяются так же, как и сейсмические волны, следуя принципу Ферма и “выбирая” такую трассу в земной коре, которую они пройдут за наименьшее время.



**Рис. 3.** Сейсмичность вблизи г. Южно-Сахалинска.

1 – эпицентры землетрясений 1992–1998 гг., зарегистрированные системой IRIS-2; 2 – эпицентры землетрясений: южный – Владимирское 1960 г., северный – главный толчок Такойского роя 2001 г.; 3 – Апрельский разлом; 4 – область сейсмического затишья.

Последнее означает также выбор наиболее высоко-скоростной трассы или наиболее плотной среды вдоль нее. Такую трассу называют волноводом.

Классический вариант волновода реализуется в горных породах высокой плотности, например, в пластовой интрузии долеритов, залегающей среди осадочных пород. Такие тела закартированы в зонах Западно- и Центрально-Сахалинского глубинных разломов. Их протяженность от 2–3 до 7–12 км, а мощность – от 50 до 300 м [5]. Интрузивные тела состоят в основном из долеритов и габбродиабазов, плотность которых 2.98 г/см<sup>3</sup>, а вмещающих пород – 2.15–2.30 г/см<sup>3</sup>. Это отвечает скорости распространения продольных волн 7 км/с в интрузивах и 1.85–2.70 км/с во вмещающих породах [1]. Итак, названные глубинные разломы и приуроченные к ним интрузии долеритов и габбродиабазов – основные волноводы в недрах Среднего Сахалина. Эти структуры наиболее благоприятны для распространения деформационного фронта благодаря минимальной диссипации напряжений.

Следующим важным объектом является г. Южно-Сахалинск. Западнее его простирается зона Апреловского разлома, где в 1960 г. произошло Владимирское землетрясение, давшее сотрясения 7 баллов в пос. Дальнем. На рис. 3 вынесены эпицентры землетрясений с  $M = 2.1–4.4$ , зафиксированные в 1992–1998 гг. системой IRIS-2, каталог которых составила Н.В. Краева. Почти 95 % эпицентров находится западнее Апреловского разлома, более того, сейсмический фронт как бы остановлен на этом разломе, ограничивая тектонический блок с областным центром, где в указанный период не происходили землетрясения с  $M > 2.1$ , т.е. этот разлом был заперт. Северная часть его зоны разрядилась в 2001 г. Такойским роом землетрясений, главный толчок в котором имел  $M = 5.6$ .

Если привлечь более поздние каталоги землетрясений, составленные Ким Чун У за 2003–2006 гг. по сети станций “Datamark” и “DAT” и по данным системы “IRIS-2” за 1993–2005 гг. и графически систематизированные в [18], то зона сейсмического затишья сохранилась в тех же границах (рис. 3).

Группа эпицентров землетрясений закартирована по линии Анива-Холмск, из них самым сильным было Анивское 1951 г., давшее сотрясения 7–8 баллов [17]. Его эпицентр совпал с Анивским месторождением минеральных вод. Вблизи его, в правом борту р. Лютога наблюдалась зона сдвига, простирающие которого северо-западное и аналогичное простирающие изосейст Анивского землетрясения. Очевидна гипотеза, объясняющая повышен-

ную сотрясаемость от этого землетрясения: этот разлом является водоносным, его сдвиговая прочность намного меньше, чем у “сухих” разломов. В подобной ситуации упругие напряжения будут “стекать” в среду с ослабленной прочностью, что и вызвало ее сейсмический пробой. Таким образом, обводненный разлом генерирует повышенную сейсмичность, и этот факт надо принимать во внимание при разработке залежей нефти и газа на сахалинском шельфе, в ходе которой будет происходить обводнение разломов [14].

Еще одну категорию разрывов представляет Мерейский разлом в пос. Пригородное, где уже действует завод по сжижению природного газа (СПГ). О разломе известны лишь геологические данные: это – голоценовый надвиг [12]. Учитывая важность завода СПГ, первого химического предприятия на Сахалине, нами предлагается считать Мерейский разлом опасным (запертым).

На Центральном и Прибрежном сдвигах в Восточно-Сахалинских горах происходили землетрясения в 1964–1973 гг., вызвавшие сотрясения до 7 баллов [17]. Но геологические наблюдения, сделанные В.П. Бевза на Прибрежном разломе (р. Малиновка), показали, что в этом разломе присутствует слой пластичных глин, исключающий накопление здесь опасных напряжений. Таким образом, отдельные сегменты этих сдвигов временами могут быть запертыми, а другие – свободными.

Выше обсуждались основные разломы Сахалина, зоны которых впервые охарактеризованы по их поведению в региональном поле напряжений. Выделены запертые, свободные, разломы-волноводы и обводненные разломы. Такая характеристика разломов подчеркивает различие их сейсмической опасности и наиболее пригодна для целей сейсмического районирования.

Автор признателен А.С. Прыткову за компьютерное оформление графики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков В.Г. Сейсмические волны в пористых насыщенных породах. Владивосток: Дальнаука, 1999. 108 с.
2. Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Сапрыгин С.М. Горизонтальные движения и генерация сильных землетрясений в недрах Северного Сахалина // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 3. С. 76–79.
3. Гальцев-Безюк С.Д., Соловьев В.В. Тымовский диагональный разлом на Сахалине // Геология и геофизика. 1965. № 5. С. 131–136.
4. Гальцев-Безюк С.Д. К вопросу о разрывных дислокациях Сахалина и подвижках по ним в четвертичное время. Л., 1969. С. 31–45. (Тр. ВНИГРИ. Вып. 255).
5. Геология СССР. Т. 33. Сахалин / Ред. В.Н. Верещагин. М.:

- Недра, 1970. 431 с.
6. Косыгин Ю.А., Сергеев К.Ф., Сапрыгин С.М., Василенко Н.Ф. Взаимодействие литосферных блоков на Центрально-Сахалинском разломе 7–13 апреля 1979 г. // Докл. АН СССР. 1980. Т. 254, № 3. С. 707–712.
  7. Оскорбин Л.С., Поплавский А.А., Занюков В.Н. Ногликское землетрясение 2 октября 1964 г. Южно-Сахалинск: Дальневост. кн. изд-во, 1967. 85 с.
  8. Оскорбин Л.С., Сапрыгин С.М., Волкова Л.Ф. Второе Ногликское землетрясение 25 июля 1977 г. М.: Наука, 1981. С. 99–103.
  9. Райс Дж. Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. 217 с.
  10. Рогожин Е.А. Нефтегорское землетрясение 27 (28) мая 1995 г. // Спец. вып. МЧС России и РАН. М., 1995. С. 80–93.
  11. Рождественский В.С. О сдвиговых смещениях вдоль зоны Тымь-Поронайского разлома на Сахалине // Докл. АН СССР. 1976. Т. 230, № 3. С. 678–680.
  12. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. Активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине // Тихоокеан. геология. 1999. № 6. С. 59–70.
  13. Рождественский В.С. Активный рифтинг в Японском и Охотском морях и тектоническая эволюция зоны Центрально-Сахалинского разлома в кайнозойе // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 17–28.
  14. Сапрыгин С.М. Динамические системы сахалинских нефтяных месторождений. Новосибирск: Наука, 1975. 103 с.
  15. Сапрыгин С.М., Кононов В.Э., Сеначин В.Н. Горизонтальные движения и граница плит на Сахалине и Хоккайдо // Докл. РАН. 2004. Т. 398, № 4. С. 538–541.
  16. Сапрыгин С.М. О детальном сейсмическом районировании Сахалина // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 2. С. 72–79.
  17. Соловьев С.Л., Оскорбин Л.С. Схема сейсмического районирования Сахалина. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 52–63.
  18. Тихонов И.Н. Прогноз сильного землетрясения на юго-западном шельфе о. Сахалин и его реализация в результате Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 5. С. 22–29.
  19. Tobita M., Fujiwara S., Ozawa S. et al. Deformation of the 1995 North Sakhalin earthquake detected by JERS – 1 SAR interferometry // Earth Planets Space. 1998. V. 50. P. 313–325.
  20. Turcotte D.L. Stress accumulation and release on the San Andreas fault // Pure and Appl. Geophys. 1977. V. 115, N 1–2. P. 413–427.

*Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым*

### *S.M. Saprygin*

#### **Faults and seismicity of Sakhalin**

Main faults of Sakhalin which differ in their behavior in the regional field of stresses are discussed for the first time. Locked, free, fault waveguides, and water-bearing faults have been distinguished. Such a description of faults stresses the difference of their seismic hazard and appears to be more suitable for seismic zoning.

**Key words:** faults of Sakhalin; regional field of stresses; locked, free, fault waveguides and water-bearing faults; seismic zoning.