

## ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ В СВЯЗИ С ПРОБЛЕМОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

**Б.Т. Кочкин, В.А. Петров**

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
119017, Москва, Старомонетный пер., 35, Россия*

Рассматриваются возможные подходы к долгосрочному прогнозу сейсмической опасности в связи с практической потребностью обоснования безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов. Необходимый период прогноза существенно превышает тот, который отражен в комплексе карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97). Первое в РФ геологическое хранилище планируется создать в Нижнеканском гранитном массиве в Красноярском крае. Этот район является внутриплитной территорией и при этом отличается сравнительно высокой сейсмичностью. Статья суммирует анализ известных эмпирических обобщений и теоретических положений, лежащих в основе прогноза сейсмической опасности. Реальные сейсмические события постоянно нарушают прогнозные оценки даже на сравнительно коротких отрезках времени. Эти и другие аргументы свидетельствуют о том, что гипотеза о стационарности сейсмического режима, являющаяся сегодня основой долгосрочного прогноза, имеет ограниченную и неопределенную во времени применимость. Прогноз внутриплитных землетрясений особенно неопределен из-за неясности причин, формирующих тектонические напряжения в таких районах. Короткий горизонт прогноза, основанного на статистических методах, можно связать с нелинейностью сейсмогеодинамических процессов. В качестве научной основы долгосрочного прогноза сейсмической опасности в районах, выбранных для геологических хранилищ долгоживущих радиоактивных отходов, предлагается использовать фундаментальные закономерности геотектонических процессов. Эти процессы можно отразить в моделях миграции сейсмоактивных границ литосферных плит и возникновения сейсмической активности во внутриплитных областях.

*Сейсмическая опасность, долгосрочный прогноз, радиоактивные отходы, геологическая изоляция, безопасность.*

### LONG-TERM PREDICTION FOR SEISMIC HAZARD FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

**B.T. Kochkin and V.A. Petrov**

We consider possible approaches to the long-term prediction for seismic hazard in relation to the practical need for the safety of geological disposal of long-lived radioactive waste. The required period of prediction significantly exceeds the one reflected in the set of maps of General Seismic Zoning of the territory of the Russian Federation (GSZ-97). The first geological repository in Russia is planned to be set up in the Nizhnii Kan granite massif in the Krasnoyarsk Krai. This region is an intraplate territory with a relatively high seismic activity. We summarize the analysis of the known empirical generalizations and theoretical principles underlying the seismic hazard prediction. Real seismic events constantly violate forward-looking statements even for relatively short periods of time. These and other arguments suggest that the hypothesis of stationarity of the seismic regime, which is the basis of long-term prediction today, has limited and uncertain applicability in time. Intraplate earthquake prediction is especially uncertain because of the uncertainty in the factor responsible for generating tectonic stresses in these regions. The short horizon of the prediction, based on statistical methods, can be attributed to the nonlinearity of seismic geodynamic processes. Fundamental laws of tectonic processes should be used as the scientific basis for long-term predictions for seismic hazard at the sites chosen for geological disposal of long-lived radioactive waste. These processes can be reflected in models for the migration of the seismically active boundaries of lithospheric plates and the occurrence of seismic activity in intraplate regions.

*Seismic hazard, long-term prediction, radioactive waste, geological disposal, safety*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Прогноз землетрясений и составление прогнозных карт сейсмической опасности — проблема, не нашедшая своего окончательного решения.

По продолжительности периода, на который должен осуществляться прогноз землетрясений, обычно выделяют прогнозы долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные [Соболев, 1993]. Каждый

из них основывается на собственных теоретических положениях и формализованных правилах обработки наблюдательных данных.

Согласно мнениям экспертов, более достоверны долгосрочные прогнозы, менее — среднесрочные и еще меньше краткосрочные [Моги, 1988; Соболев, 1993]. Чем продолжительнее период прогноза, тем более это прогноз сейсмической опасности в целом для данного региона, а не прогноз конкретного события. Здесь уместна аналогия с прогнозом климата и погоды. Климат более достоверно прогнозируется на весьма продолжительные периоды, правда с потерей конкретности в указании времени и места наступления отдельных событий.

Для целей долгосрочного прогноза составляются карты сейсмической опасности. Карты сейсмического районирования территории бывшего СССР, составленные в прошлые годы, в той или иной мере оказывались неадекватными реальным природным условиям. Существенный прогресс в детализации и уточнении сейсмической опасности территории страны наблюдается в последнем комплекте карт ОСР-97. Но и здесь возникает целый ряд проблем, связанных с достоверностью прогноза на продолжительные периоды времени [Морозов и др., 2001; Сейсмотектоника..., 2009].

Очевидно, что существующие методы предсказания землетрясений не в полной мере соответствуют продолжительным периодам времени, притом, что потребность в таких прогнозах существует и связана, в частности, с нормативными требованиями по обоснованию безопасности при изоляции радиоактивных отходов (РАО), содержащих долгоживущие радионуклиды. В частности, в российских нормативных документах, которые в целом следуют общепринятым на международном уровне рекомендациям, закреплено требование по обеспечению надежного функционирования геологического хранилища и защиты населения на период потенциальной опасности изолируемых радионуклидов [Захоронение..., 2004]. Для высокоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива (ВАО и ОЯТ) и других видов РАО, содержащих долгоживущие радионуклиды, период потенциальной опасности измеряется миллионами лет. Прогноз, выполняемый для особо опасных объектов, таких как атомные станции и радиоактивные захоронения, с приемлемой вероятностью не превышения установленной балльности рассчитывается на период 10 000 лет и опирается на [Карта ОСР-97D]. Однако стабильность геологической среды, которая будет обеспечивать надежность системы изоляции на протяжении всего срока потенциальной опасности долгоживущих РАО, рекомендуется оценивать на весь этот срок [Considering..., 2009; Methods..., 2012; Кочкин, 2013]. Отсюда вытекает потребность в долгосрочных прогнозах сейсмической опасности на периоды в сотни тысяч и миллионы лет и встает вопрос об инструментах прогноза сейсмотектонической активности на столь продолжительные периоды. Даже по геологическим меркам эти прогнозы следует относить к сверхдолгосрочным и определить инструменты для их составления — основная цель статьи.

## БЕЗОПАСНОСТЬ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАО

Геологическая изоляция РАО — технология, призванная обеспечить надежную защиту населения и биосферы от радиоактивного загрязнения [Falck, Nilsson, 2009]. Такое размещение планируется осуществлять в специальных подземных сооружениях (хранилищах), оборудованных системой многобарьерной защиты окружающей среды от радионуклидов. Во-первых, это матрица, включающая в себя радионуклиды. Она упаковывается в металлическую канистру, которая обеспечивает физическую изоляцию радионуклидов от подземных вод на начальных этапах захоронения. Глинистые заполнители камер и тоннелей используются для сорбционного замедления утечки радионуклидов из-за неизбежной коррозии канистр. Последний барьер в этой системе — геологическая среда. Она призвана минимизировать рассеивание радионуклидов до тех пор, пока они представляют опасность.

За миллионы лет в хранилище и его окружении произойдут различные события и процессы, скорость протекания и длительность которых может меняться в широких пределах. В частности, к опасным процессам, способным нарушить стабильность изолирующей геологической среды и деформировать инженерные барьеры, относятся геодинамические процессы, проявляющиеся не только вдоль активных краев тектонических плит, но и во внутриплитных блоках [Stein, 2007].

Очевидно, что для размещения геологического хранилища лучше всего выбирать районы, для которых характерна низкая сейсмичность и вообще отсутствуют активные разломы. Однако если район все-таки оказался сейсмоопасным, как в случае с площадкой для российского хранилища в Красноярском крае [Лобанов и др., 2011], то местоположение активных разломов должно быть точно установлено, а их сейсмотектоническая активность предсказана на весь потенциально опасный период. Сейсмическая опасность района будущего могильника в Красноярском крае оценивается в 8 баллов [Карта ОСР-97D] или по уточненной модели зон вероятных очагов землетрясений (ВОЗ) для территории Красноярской агломерации, созданной в соответствии с методикой построения среднемасштабных карт ОСР, в 7 баллов [Сибгатулин и др., 2004].

Опасные последствия сейсмогенной активизации разломов с максимальными для юга Сибирского региона магнитудами ( $M > 8$ ) проявляются главным образом на поверхности и близ нее в виде вторичного разломообразования, склоновых процессов и других явлений на расстояниях до десятков и более километров. При удалении от сейсмогенного источника частота встречаемости опасных геологических процессов убывает по экспоненциальному закону [Лунина и др., 2014]. Известно, что на глубине в сотни метров в скальных породах опасные последствия землетрясений (балльность) проявляются существенно слабее. Это несколько снижает потенциальную опасность высокой сейсмичности для геологических хранилищ.

Согласно действующим нормативным документам, непригодными считаются площадки в зонах с вероятными сейсмическими воздействиями более 9 баллов или с признаками активного разлома. Районы, сейсмичность которых характеризуется интенсивностью максимальных расчетных землетрясений выше 7 баллов, являются неблагоприятными [Захоронение..., 2004]. Таким образом, сейсмогеодинамические процессы на площадке будущего хранилища в Красноярском крае предстоит детально изучить для обоснования его долгосрочной безопасности.

### ЭМПИРИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕОРИЯ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Сейсмичность региона принято оценивать по трем основным параметрам: сейсмическая активность, повторяемость землетрясений и магнитуда максимального возможного землетрясения ( $M_{\max}$ ) [Сейсмическое..., 1980; Комплект..., 1999].

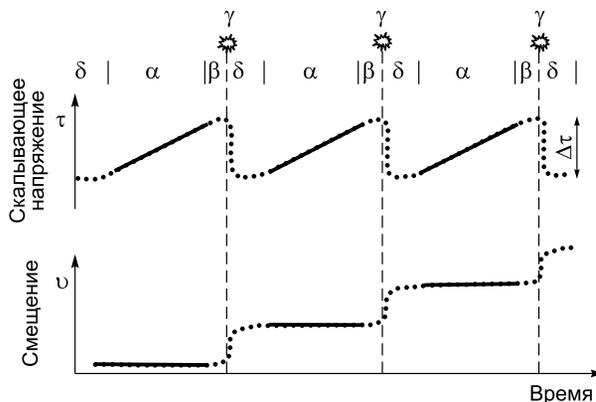
Сейсмическая активность — стохастическая величина. Она непостоянна как во времени, так и в пространстве.

По результатам анализа сейсмической активности в пространстве и времени С.А. Федотов [1968] представил концепцию так называемых «сейсмических брешей». Он показал, что области очагов катастрофических землетрясений, произошедших за период наблюдений, занимают значительную часть определенной сейсмической зоны, но не покрывают ее целиком и не перекрывают одна другую. Те районы, где длительное время сильные землетрясения не отмечались, он рассматривал как возможные места будущих крупных сотрясений. Рано или поздно сильные землетрясения, как полагают, происходят повторно в одних и тех же местах. С.А. Федотов предложил называть ход сейсмического режима в одной и той же точке сейсмогенного разлома в интервале времени между двумя землетрясениями максимальной силы сейсмическим циклом. Так, в Курило-Камчатской зоне средний период повторяемости катастрофических землетрясений  $M > 7^{3/4}$  составляет примерно 140 лет. В менее активных районах он измеряется многими сотнями и тысячами лет. Инструментальные наблюдения для любого региона выполняются лишь в последние 100 или менее лет, поэтому нет данных ни об одном полном сейсмическом цикле. Даже в Курило-Камчатской зоне непрерывные инструментальные наблюдения за сейсмичностью отдельных участков в течение полных циклов закончатся, по всей вероятности, только приблизительно к 2044 г. (1904 г. + 140 лет). С.А. Федотов считал, что сейсмический цикл является общей закономерностью сейсмического процесса. Типичная его особенность — длительный период стабилизации режима, продолжающийся  $3/4$  цикла и больше. В течение этого периода сейсмическая активность колеблется около постоянного уровня и характеризуется только сравнительно слабыми землетрясениями.

Представления С.А. Федотова о сейсмическом цикле и его стадийности получили широкое развитие и использовались при долгосрочном прогнозе землетрясений. Так, по мнению К. Шольца [Scholz, 1990], каждый сейсмический цикл состоит из четырех стадий: досейсмической, косейсмической, постсейсмической и межсейсмической (или «сейсмического покоя») (рис. 1). В досейсмическую стадию происходит стремительное накопление напряжений на фоне нелинейной деформации пород и сейсмических импульсов (форшоков), предшествующих землетрясению. В косейсмическую стадию дефор-

**Рис. 1. Графики «напряжение—время» ( $\tau$ ) и «смещение—время» ( $v$ ) для разломов, локализованных в сейсмогенной зоне верхней части земной коры, по [Scholz, 1990].**

Стадии сейсмического цикла:  $\alpha$  — межсейсмическая или «сейсмический покой»,  $\beta$  — досейсмическая (foreshocks),  $\gamma$  — косейсмическая (mainshock),  $\delta$  — постсейсмическая (aftershocks),  $\Delta\tau$  — разрядка напряжения.



мация пород развивается лавинообразно немедленно вслед за разрядкой накопленных напряжений (землетрясением). В постсейсмическую стадию породы в течение некоторого времени деформируются нелинейно, что сопровождается рядом толчков (афтершоков), которые могут проявляться вдоль зоны сейсмоактивного разрыва на значительном удалении от очага землетрясения. На межсейсмической стадии «сейсмического покоя» деформация массивов пород описывается как линейная.

В большинстве сейсмоопасных районов сильные землетрясения повторяются очень редко. Еще продолжительные периоды повторяемости землетрясений на активных разломах вне сейсмоактивных поясов. Специальные исследования показали, что периоды повторяемости сильных землетрясений на древних платформах континентальных территорий могут составлять 10—100 тыс. лет и более [Crone et al., 1997]. При этом в одном и том же районе повторяемость землетрясений меньшей интенсивности, чем установленная максимальная сейсмичность, измеряется более короткими интервалами. Так, в сейсмической зоне, например, в 9 баллов и повторяемостью 9-балльных землетрясений в среднем через 1200 лет, 8- или 7-балльные землетрясения повторяются в среднем через 230 и 75 лет соответственно [Медведев, 1968].

Повторяемость землетрясений имеет логарифмическую зависимость числа землетрясений от их магнитуды ( $M$ ). Для достаточно больших территорий и времен наблюдения наклон соответствующего графика считался постоянным, что до недавнего времени использовалось для расчета  $M_{\max}$  в той или иной локальной области [Сейсмическое..., 1980]. Оказалось, что эти графики непрямолинейны. Начиная с  $M > 6.5$ , для всех без исключения регионов графики среднегодовой скорости потока событий указывают на более высокую повторяемость таких землетрясений, чем это следовало бы из традиционной линейной экстраполяции графиков. Реальная частота возникновения крупных землетрясений в три и более раз выше, чем это считалось прежде [Комплект..., 1999].

До сегодняшнего времени магнитуа  $M_{\max}$  для той или иной локальной области — наиболее дискуссионный параметр сейсмичности, определение которого непосредственно из наблюдений, выполнявшихся в данной области, лимитируется крайней редкостью событий, близких к максимально возможным. Для оценок  $M_{\max}$  приходится принимать во внимание косвенные данные, связанные с геолого-геофизическими условиями в областях возникновения землетрясений. Учет косвенных факторов делается либо методом экспертных суждений, либо посредством определенных формализованных расчетов. Тем не менее считается, что в случае принятия гипотезы о стационарности сейсмического режима, можно ожидать, что в каждом пункте Земли существует некоторое конечное значение  $M_{\max}$ , которое не может быть неограниченно большим.

Ошибочное определение  $M_{\max}$  в каком-либо районе может сказаться на установлении продолжительности полного сейсмического цикла. Число мест, для которых имеются инструментальные данные за более или менее длительный период, ограничено, а исторические документы охватывают не более чем несколько сотен лет или в лучшем случае первые тысячи [Бюллетень..., 1913; Кондорская, Шеба-лин, 1977]. Поэтому топографические, геоморфологические и геологические методы остаются важными средствами изучения прошлой сейсмической истории. В последнее время значение таких полевых исследований стало вполне понятным, способы выявления активных разломов совершенствуются, данные о сильных землетрясениях прошлого используются для оценки времени повторяемости землетрясений в том или ином районе. Этот и другой эмпирический багаж, обосновывающий устойчивый период повторяемости сейсмических событий, применяется для прогноза землетрясений и составления карт сейсмической опасности. Пополнение инструментальной базы данных сведениями об исторических землетрясениях крайне важно и для решения проблемных вопросов сейсмичности Сибирского региона [Никонов, Флейфель, 2014].

Научная сложность проблемы прогнозирования сейсмической опасности состоит в том, что она принадлежит к категории прогнозов, базирующихся на неполной информации и нечетких методологических позициях. Наблюдательная база слишком ограничена, а теоретические представления не позволяют надежно оценить характеристики сейсмического режима для больших интервалов времени.

В середине прошлого века произошла смена существовавшей до того времени парадигмы «сейсмического актуализма» на новую, предполагавшую сначала выделение не только реальных, но и потенциальных очаговых зон, и только потом оценку сейсмических сотрясений земной поверхности. Новая парадигма стала основой всех последующих карт общего сейсмического районирования, включая современную ОСР-97 [Комплект..., 1999].

Комплект карт ОСР-97 для территории Российской Федерации был составлен с целью осуществления прогноза при строительстве объектов разных категорий ответственности и сроков службы. Для этого был реализован вероятностно-детерминированный прогноз, учитывающий как статистически обоснованный период повторяемости сильных землетрясений, так и предполагаемый срок службы различных типов сооружений. При составлении этих карт сейсмичность рассматривалась как результат деформирования земной коры и всей литосферы с учетом фрактальных особенностей их слоисто-блоко-

вой структуры. Были учтены представления о сейсмических очагах как протяженных (а не точечных) источниках землетрясений, о нелинейном проявлении сейсмогеодинамических процессов и др. [Комплект..., 1999].

Последний комплект карт ОСР-97 включает 4 карты сейсмической опасности с указанием ожидаемой максимальной балльности на периоды повторяемости сотрясений 50, 500, 5000 и 10 тыс. лет<sup>1</sup>. Последняя из них, карта ОСР-97D, была составлена позже других и соответствует повторяемости указанного на карте сейсмического эффекта на земной поверхности на средних грунтах в среднем один раз за 10 000 лет. Вероятность возможного превышения указанного балла в течение 50 лет для этой карты составляет 0.5 %, а в течение одного года —  $10^{-4}$  %. Эта карта предназначена для рекогносцировочной оценки сейсмической опасности в районах расположения чрезвычайно ответственных сооружений, таких как атомные станции, радиоактивные захоронения и другие особо опасные объекты ядерного топливного цикла.

Смена парадигм, развитие теоретических представлений о природе сейсмичности и совершенствование методик прогноза не привело к исключению проявлений новых и неожиданных по масштабу сейсмических событий в том или ином районе. Так, после составления Карты ОСР-78 в течение десятилетия практически ежегодно на территории бывшего СССР возникали разрушительные 8—9- и даже 9—10-балльные землетрясения в зонах, опасность которых по этой карте оказалась заниженной, по меньшей мере, на 2—3 балла. В их число попали такие катастрофические по своим последствиям землетрясения, как Спитакское (1988 г.) в Армении и Нефтегорское (1995 г.) на Сахалине [Комплект..., 1999]. Последние события, например, Калининградское землетрясение (2004 г.), показали, что сейсмичность некоторых платформенных регионов должна быть поднята до уровня 6 и 7 баллов, и их нельзя относить к асейсмическим, как это принимается на карте ОСР-97 [Сейсмотектоника..., 2009]. Признание этой тенденции *de facto* тем не менее обычно не вызывает сомнений в верности гипотезы об устойчивости сейсмического режима, и для объяснения кривизны графика повторяемости могут привлекаться гипотезы *ad hoc*, как в работе [Морозов и др., 2001]. Действительно, представляется вполне разумным, что развитие тектонического процесса и соответствующих деформаций носят унаследованный характер, по крайней мере, на текущем тектоническом этапе, который начался около 25 млн лет тому назад, и, следовательно, можно ожидать стабильности тектонического поля напряжений на некоторый (может быть такой же по продолжительности) период в будущем.

Таким образом, принято считать, что статистический анализ имеющихся данных по сейсмичности того или иного района показывает, что землетрясения максимальной интенсивности, возможной в данном районе, имеют определенный период повторяемости. Последний объясняется сейсмическим циклом накопления и разрядки тектонических напряжений в условиях постоянства сейсмического режима. Считается, что наличие сейсмического цикла согласуется (по крайней мере, неразрывно связано) с гипотезой о стационарности сейсмического режима в конкретном районе. В самом деле без этой гипотезы невозможно обосновать виртуальность стохастической по своей сути константы продолжительности сейсмического цикла и вообще наличие периодичности в проявлениях наиболее крупных сейсмических событий.

Тем не менее установленная кривизна графиков повторяемости землетрясений в области экстремально сильных событий, а также отсутствие непрерывных инструментальных наблюдений за сейсмичностью на отдельных участках в течение полного цикла составляют эмпирическую основу сомнений в действительности гипотезы о стационарности сейсмического режима применительно к отдаленному будущему. Отсутствует эмпирическое подтверждение устойчивости периода повторяемости на протяжении нескольких циклов. Гипотеза о стационарности сейсмического режима в данном регионе, справедливая на сравнительно короткие периоды, очевидно, имеет ограничение по времени своей применимости. Стационарность сейсмического режима на отдаленное будущее является экстраполяцией геодинамических и исторических данных за предшествующие периоды времени. Неопределенность заключается в том, насколько далеко в будущее такая экстраполяция допустима.

## ПРИРОДА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В ПРОГНОЗЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Основной подход к прогнозу землетрясений основан на стохастических закономерностях, извлекаемых из наблюдательных данных. Примеры, приведенные выше, показывают, что новое сейсмическое событие может легко перечеркнуть подобные прогнозы и их теоретические основы. К сожалению, многие научные неопределенности, касающиеся прогноза, выполняемого при оценке безопасности хранилищ долгоживущих РАО, относятся к типу неустраняемых [Кочкин, 2004].

Так, закон больших чисел, на котором основано практическое применение теории вероятностей в прогнозе землетрясений, бесполезен для прогноза событий, случающихся через периоды времени не-

<sup>1</sup> В настоящее время обсуждается комплект карт ОСР-2012 (<http://seismos-u.ifz.ru/2012.htm>).

сравненно большие, чем опыт человечества. Сильнейшие землетрясения как раз относятся к таким редким событиям. Нужная информация может быть получена в принципе, но решение по прогнозу не может ждать, пока эти данные будут получены реально (если когда-нибудь будут). В таких условиях исследователь не располагает объективными сведениями для обоснования достаточности всех проведенных наблюдений, их корректности и представительности результата для области, описываемой моделью, а также в правильности всех модельных предположений. Более того, в отношении оценки адекватности модели (верна/неверна), выбранной для прогноза, вообще не может быть никакой статистики. С одной стороны, очевидно, что в последней ситуации увеличение периода наблюдений (сколько бы времени он не длился) не имеет отношения к увеличению размера выборки (числу испытаний), используемой в теории вероятностей. С другой, — новое наблюдение, выходящее за пределы ранее известных параметров, может в корне изменить мнение исследователя о пригодности модели [Apostolakis, 1990]. Неопределенности, связанные с последней ситуацией, неустранимы в принципе.

Объективная неопределенность долгосрочного сейсмического прогноза, основанного на стохастических моделях, диктует необходимость обращения к детерминированным моделям сейсмогеодинамического процесса, однако на этом пути встают свои препятствия.

Считается, что землетрясение связано с разрывом сплошности вещества земной коры, происходящим при относительном смещении отдельных участков по некоторой более или менее протяженной плоскости. Разрыв происходит под действием упругих напряжений, которые накапливаются в процессе тектонической деформации этого вещества, и снимает эти напряжения полностью или частично на плоскости разрыва. Разрыв возникает на ограниченной площади (гипоцентре) и распространяется от нее с ограниченной скоростью. Так, средняя длина разрывов при землетрясениях с  $M = 7.5$  достигает 100 км, при  $M = 8.5$  — 300 км [Сейсмическое..., 1980]. Землетрясение 24 мая 2013 г. под Охотским морем с  $M = 8.3$  развивалось со скоростью около 4 км/с при длине разрыва ~180 км [Ye et al., 2013].

Структурные обстановки, способные обеспечить накопление упругих напряжений для последующей их разрядки, поддаются моделированию [Barbot et al., 2012], но эта тема выходит за рамки настоящей статьи.

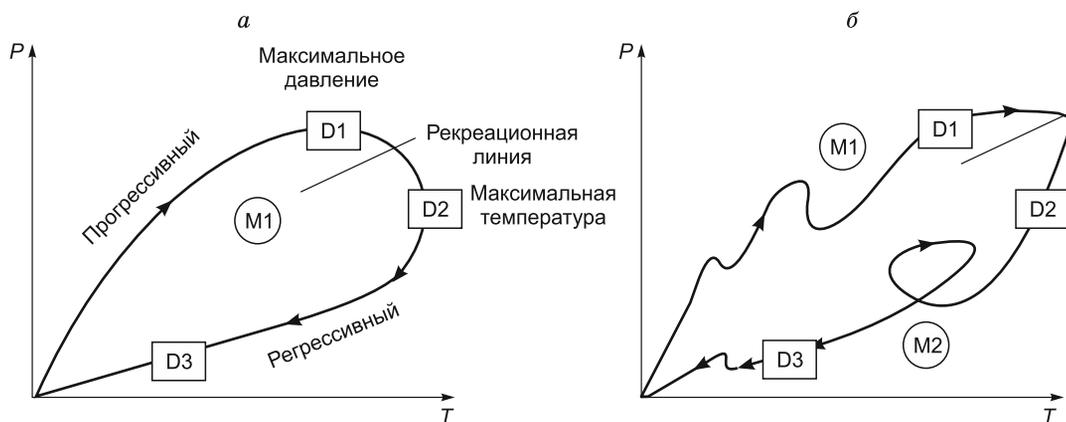
Принятый сегодня механизм возникновения землетрясений объясняет периодичность этих событий в одном месте и, соответственно, сейсмический цикл, поскольку условия для возникновения разрывов поддерживаются благодаря устойчивости поля тектонических напряжений в гораздо большем объеме земной коры, чем занимает гипоцентр. Тем не менее очевидно, что после каждого разрыва среды накопление напряжений будет протекать в условиях, когда некоторая часть факторов сейсмогеодинамической системы уже изменилась, и новый цикл будет иметь параметры, отличные от предыдущего. Прежде всего, например, изменится геометрия сейсмогенерирующего разлома (очаговой зоны), степень флюидо- и газонасыщенности пород, их реология и т.д. Это значит, что даже при условии сохранения в целом магнитуды действующих в районе тектонических сил и общих характеристик поля напряжений развитие системы может пойти несколько иным путем. Вопрос состоит в том, насколько другим будет этот путь и как долго эти отличия не скажутся принципиально на сейсмическом режиме и значениях константы повторяемости землетрясений в данном районе. Можно предположить, что именно эти небольшие отличия и являются в конечном счете причиной искривления графика повторяемости в области сильных землетрясений, которая отражает физическую нелинейность в системе.

Нелинейность сейсмогеодинамических процессов рассматривается в качестве обоснования принципиальной невозможности даже для краткосрочных прогнозов конкретных событий [Короновский, Наймарк, 2012].

В основе представлений о нелинейных системах лежит идея И. Пригожина [1960] о принципиальной нестабильности процессов, протекающих в сложных, открытых для энерго- и массообмена системах. Общая реакция такой системы не равна сумме реакций на отдельные воздействия.

Представления о нелинейности процессов, протекающих в горных породах, были оформлены в трудах М.А. Садовского, выполненных в 70—80-х годах прошлого века [Николаев, 1998]. Им было сформулировано понятие геофизической среды, перенесшее на себя упомянутую идею И. Пригожина. Физическая нелинейность — фундаментальное свойство горных пород. Реальные породные среды являются иерархически неоднородными. Физические свойства горных пород изменяются на относительно коротких интервалах времени под воздействием эндогенных геодинамических и экзогенных процессов, включая лунно-солнечные приливы и другие явления внеземной природы, а также техногенных факторов. Коренный пересмотр представлений о свойствах горной породы заложил основы нелинейной геофизики и, в частности, нелинейной сейсмологии.

Согласно постулатам классической науки, точность прогноза ограничивается только чисто математическими сложностями. В последние 30—40 лет было показано, что траектории будущего состояния систем описываются не только точкой, как у механического маятника, или кругом, как в обратимых системах, но и довольно прихотливыми кривыми, называемыми странными аттракторами. Формально



**Рис. 2. Постулируемое (а) и реальное (б) поведение пород в процессе метаморфизма, по [Passchier, Trouw, 2005].**

*P* — давление, *T* — температура, M1, M2 — метаморфические циклы, D1—D3 — деформационные события.

системы, которые они описывают, являются детерминированными, но предсказывать их поведение можно лишь в течение ограниченного времени. Здесь можно привести пример из петрологии, который иллюстрирует фигура (рис. 2), заимствованная из статьи [Passchier, Trouw, 2005]. Так, реальный ход давления и температуры в недрах, а следовательно, и ответная реакция пород в процессе метаморфизма описывается более сложной кривой, чем представляется. Единый метаморфический цикл может включать в себя циклы второго порядка. Неравновесность необратимых систем открывает возможность для возникновения уникальных событий. В любой момент времени — в точке бифуркации — может произойти смена пространственно-временной организации системы [Пригожин, 1991]. Неопределенность в знании исходных данных или деталей динамического процесса рано или поздно вырастает до огромнейшей неопределенности в прогнозе, если экстраполировать текущее состояние системы на продолжительное время. Стало понятно, что во многих случаях, когда требуется прогноз развития сложной системы, существует горизонт предсказуемости, за которым господствует полная неопределенность [Капица и др., 2003]. Это в полной мере относится и к прогнозу сейсмических событий.

Тем не менее в странных аттракторах довольно много порядка, что открывает некоторые перспективы для успешного прогноза. Хаос на микроуровне может приводить к упорядоченности на макроуровне. Ведущую роль в самоорганизации необратимых систем наравне с главными факторами, действующими в системе, играют диссипативные процессы, связанные с рассеиванием энергии. К ним относятся теплопроводность, трение, вязкость. Некоторые из таких второстепенных факторов, влияющие на рассеивание энергии в очаге землетрясения, например, водо- или газонасыщенность сейсмогенерирующего разлома, давно обратили на себя внимание исследователей.

Примером появления порядка на макроуровне в хаосе множества микрособытий можно считать феномен сейсмического цикла, возникающего под действием устойчивых геодинамических сил, действующих в пределах определенного сейсмического пояса. Правда, из-за иерархичности геофизической среды возникновение любого события с некоторым *M* допустимо интерпретировать двояко: либо считать это событие неординарным, т.е. точкой бифуркации (завершением старой пространственно-временной организации системы и началом новой истории), либо считать его все-таки ординарным проявлением разрядки напряжений в более обширной системе. Неопределенность с  $M_{\max}$  остается, а реальный ответ можно получить только спустя продолжительный интервал времени. Взамен эта неопределенность дает основания для выделения в потоке сейсмических событий циклов разных порядков и продолжительности. Тогда любое событие завершает один из субциклов. Формирование квазипериодичности наступления событий одного порядка может быть следствием факторов, дополнительных к собственно геодинамическим силам — приливные, солнечные, галактические и т.п. циклические процессы. Им посвящены многочисленные исследования [Хаин, Халилов, 2009]. Для нашей статьи важно отметить, что цикличность сейсмогеодинамической активности с разными периодами повторения могла бы быть полезна для долгосрочного прогноза сейсмобезопасности геологических хранилищ РАО как фактор понижения или повышения уровня сейсмической активности в заданном районе относительно современного. Интерес представляют циклы, которые связаны с изменением параметров вращения Земли и носят долгопериодический характер. Наклон земной оси изменяется с периодом в 40 тыс. лет, прецессия со-

вершает полный круг за 20 тыс. лет, а цикл колебаний эксцентриситета — 100 тыс. лет. Правда возможность получения в обозримом будущем эмпирического материала для обоснования циклов сейсмической активности такой продолжительности вызывает большие сомнения.

Таким образом, нелинейность сейсмогеодинамических процессов в очаговых зонах может рассматриваться как теоретическое ограничение, накладываемое на гипотезу о стационарности сейсмического режима. Неустойчивость системы, эволюцию которой необходимо предсказать, из-за неопределенностей в исходных данных порождает неизбежный хаос в описании системы и, как следствие, короткий горизонт прогноза. Необходимость выполнить долгосрочное предсказание сейсмичности в том или ином районе вынуждает переходить от моделей конкретных сейсмических очагов к общим моделям все более мелкого масштаба, но охватывающих все более продолжительные периоды геологического времени и большие объемы геологического пространства.

## **ГЕОТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ ПЛОЩАДКИ МОГИЛЬНИКА И ПРОГНОЗ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ**

Определенную ясность в отношении сил, приводящих в действие механизм землетрясения, дала тектоника плит [Моги, 1988]. Согласно этой теории, вещество мантии, благодаря устойчивой сети конвективных ячеек, поднимается из глубин Земли по узким каналам вдоль срединно-океанических хребтов, а также в некоторых участках в пределах континентальной коры. При этом океаническое дно наращивается в обе стороны от хребтов, увеличивая площадь океанических плит земной коры, которые движутся так, что сталкиваются с континентальными плитами и пододвигаются под них. Согласно этим представлениям, именно столкновения плит, происходящие при непрерывном их перемещении, приводят к появлению вдоль границ плит протяженных областей с очень высоким уровнем тектонических напряжений, которые рано или поздно разряжаются в виде землетрясений.

В распределении землетрясений по земной поверхности имеются вполне определенные закономерности, прямо коррелирующие с природой этого явления. По современным представлениям очаги землетрясений расположены вдоль протяженных и относительно узких зон активных разломных структур земной коры и литосферы, в которых происходят сейсмогеодинамические взаимодействия плит. Последние подразделяются на три основных типа: рифтовые зоны расширяющейся океанической коры, зоны субдукции или поддвига океанической коры под континентальную и зоны трансформных перемещений литосферных плит. Наиболее активными в сейсмическом отношении являются конвергентные структуры литосферы. Они представлены дугообразными границами между литосферными плитами, расположенными по периферии океанов в виде погружающихся под континенты зон субдукции, а также реликтами древних зон субдукции на самих континентах [Комплект..., 1999]. Более сложный, по мнению многих исследователей, вопрос связан с объяснением механизма внутриплитной сейсмичности, которая проявляется эпизодически, развивается в различных участках коры и имеет тенденцию мигрировать от участка к участку [Kenner, Segall, 2000; Gangopadhyay, Talwani, 2003; Schulte, Mooney, 2005].

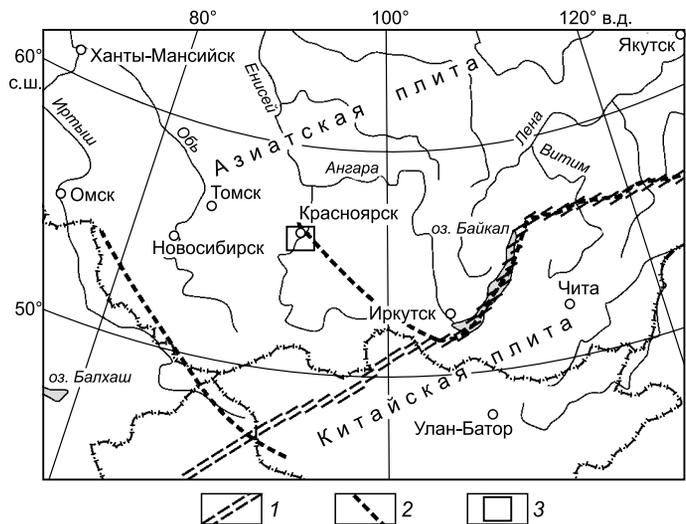
Что касается Российской Федерации и сопредельных территорий, то всегда считалось, что чаще всего очаги землетрясений приурочены к областям интенсивных и контрастных новейших тектонических движений, которые по современным представлениям как раз и являются структурами сейсмогеодинамического взаимодействия плит. В области континентальной коры такие движения и землетрясения приурочены к альпийским складчатым зонам (Карпаты, Крым, Кавказ и Памир), а также к участкам платформ, испытавшим новейшую тектоническую активизацию (Тянь-Шань и Прибайкалье). В зонах конвергентного сочленения океанов и материков, расположенных в районе Камчатки и Курильских островов, мелкофокусные землетрясения происходят на тихоокеанской части, а в сторону континента их глубина постепенно увеличивается, обрисовывая глубинные плоскости поддвига Заварицкого-Беньофа [Сейсмическое..., 1968, 1980].

В прежние годы при составлении карт сейсмической опасности для территории СССР алгоритм выделения сейсмоактивных структур не предусматривал доминирования какой-либо одной из существовавших общетеоретических тектонических парадигм. И только при составлении карты ОСР-97 в ее структурную основу впервые была положена единственная парадигма, а именно теория тектоники литосферных плит. Согласно этой парадигме, сейсмичность Северной Евразии, на которой расположена РФ, обусловлена интенсивным сейсмогеодинамическим взаимодействием нескольких крупных литосферных плит: Европейской, Азиатской, Аравийской, Иранской, Индийской, Китайской, Тихоокеанской, Охотской и Северо-Американской [Комплект..., 1999].

Напротив, относительной тектонической стабильностью и малым числом землетрясений отличаются щиты и плиты древних платформ на континентах. Это делает их наиболее привлекательными для размещения геологических хранилищ долгоживущих РАО. Тем не менее сильные разрушительные землетрясения в них также происходят. Оценки вероятностей экстремальных событий ( $M \geq 7$ ) для площа-

**Рис. 3. Литосферные плиты юга Сибири (фрагмент карты В.И. Уломова (<http://seismorus.ru/hazards/russia>)).**

1 — границы литосферных плит; 2 — реликты конвергентных сейсмоактивных структур (зон субдукции); 3 — контур карты на рис. 4.

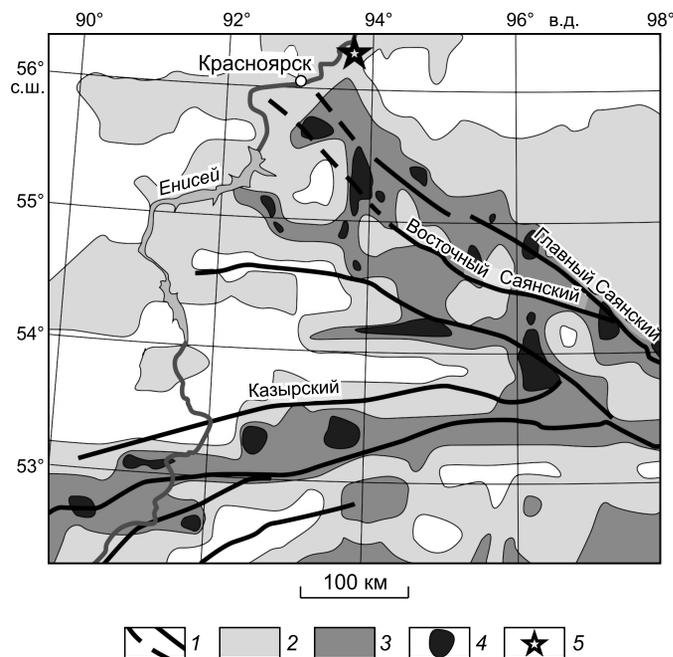


док, рекомендуемых под изоляцию РАО на щитах древних платформ, хотя и неопределенные, но все-таки крайне низкие [Fenton et al., 2006]. Время существования поясов высокой сейсмичности вдоль границ тектонических плит и, соответственно, областей с низкой сейсмичностью, расположенных между этими поясами внутри плит, измеряется интервалами в сотни миллионов лет (геотектонические мегациклы), что намного превосходит разумный период прогноза безопасности хранилищ долгоживущих РАО. Феномен мегацикличности геотектонических процессов, на наш взгляд, подводит фундаментальную геологическую базу под долгосрочное обоснование безопасности геологических хранилищ, размещаемых вне сейсмических поясов на древних платформах и щитах. Главное при изоляции долгоживущих РАО на древних платформах — это исключить размещение площадок на потенциально активных разломах, для которых, как указывалось выше, период повторяемости может превышать десятки тысячи лет.

К сожалению, оценка сейсмотехнической безопасности площадок, приуроченных к внутриплитным поясам повышенной сейсмичности, вызывает серьезные проблемы. Так, район размещения хранилища под Красноярском, если судить по карте сейсмогеодинамической регионализации (рис. 3), располагается в пределах Азиатской плиты к северу от границы с Китайской плитой на расстоянии около 1000 км. Район относится к Альпийско-Гималайскому поясу высокой сейсмичности и приурочен к зоне 7-балльной (или даже 8-балльной) сейсмической опасности. При этом площадка под Красноярском располагается вблизи сейсмоактивных разломов (рис. 4), наследующих древнюю зону субдукции (см. рис. 3). Такая позиция не исключает сценария активизации этой древней границы литосферных плит в отдаленном будущем, что сразу вызывает необходимость оценить такую вероятность.

Согласно теории, литосферные плиты перемещаются относительно друг друга и активные границы плит меняют свое положение и сейсмическую активность. В геологической перспективе позиция того или иного района в системе сейсмогеодинамических взаимодействий не остается постоянной. Это положение следует распространить и на площадки для хранилищ РАО.

Приложение современных механизмов конвективного режима в мантии к теории тектоники плит позволяет осуществить прогноз перемещения плит и, соответственно, положения поясов сейсмичности на отдаленное будущее. Так, в работе Р.Н. Митчела с соавторами [Mitchell et al., 2012] на основе одного из возможных сценариев осуществлен прогноз перемещения современных материков и их слияние в единый суперматерик на месте Северно-



**Рис. 4. Схема элементов сейсмораионирования юга Красноярского края (прогноз ВОЗ), по [Сигбатулин и др., 2004].**

1 — сейсмоактивные разломы; 2 — области умеренной сейсмоактивности; 3 — области повышенной сейсмоактивности; 4 — ВОЗ; 5 — район размещения хранилища РАО.

го Ледовитого океана примерно через 200 млн лет. Современные методы моделирования позволяют осуществлять прогнозы перемещения литосферных плит, используя различные гипотетические сценарии. Подобные упражнения могут стать основой для предсказания перемещения сейсмоактивных областей в весьма отдаленном будущем. Несмотря на отсутствие единых взглядов на динамику литосферных плит, теоретически возможно (причем детерминированно!) предсказать миграцию района размещения хранилища РАО вместе с плитой, на которой оно находится, на сверхдолгосрочные в обычном смысле периоды. Неопределенность в таком прогнозе связана с эволюцией сейсмического режима района по мере миграции плиты или с перспективой раскола плиты на отдельные фрагменты.

Хотя предсказание пространственного положения границ литосферных плит возможно с геодинамических позиций на очень отдаленные периоды, притом что эти самые границы всегда будут поясами высокой сейсмической активности, сегодня мало что можно сказать об эволюции сейсмичности в отдельных районах этих поясов или о возможности заложения новых поясов. Тем не менее именно теория литосферных плит предоставляет самые общие основания для сверхдолгосрочного предсказания сейсмичности, в том числе для районов размещения подземных хранилищ РАО.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейсмичность района, в котором намечено устроить могильник РАО в Красноярском крае, характеризуется интенсивностью максимальных расчетных землетрясений 7—8 баллов, что, согласно действующим нормативным документам, считается неблагоприятным фактором. Сейсмобезопасность будущего могильника, заполняемого РАО с долгоживущими радионуклидами, период потенциальной опасности которых измеряется миллионами лет, должна быть обоснована на весь потенциально опасный период. Общепризнанных индикаторов сейсмобезопасности, адекватных этой задаче, на сегодняшний день нет.

Прогноз сейсмической опасности, основанный на стохастических моделях сейсмического режима отдельных регионов, остается (с определенными оговорками относительно дальнего действия гипотезы о стационарности этого режима) пригодным на долгосрочную перспективу в тысячи лет. На сверхдолгосрочную перспективу прогноз сейсмической опасности следует заменить сейсмогеодинамическим прогнозом. Такой прогноз может опираться на детерминированные модели миграции литосферных плит, границы которых всегда будут отличаться повышенной сейсмичностью.

Прогноз сейсмобезопасности геологической изоляции долгоживущих РАО в конкретном районе, основанный на любой модели, является экстраполяцией геодинамических и сеймотектонических закономерностей, выявленных при анализе данных, характеризующих развитие района в предшествующие периоды времени. Несмотря на неопределенность в вопросе, насколько далеко в будущее такая экстраполяция останется приемлемой для той или иной методологии прогноза, фундаментальные геологические закономерности остаются единственной гарантией его достоверности.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН.

## ЛИТЕРАТУРА

**Бюллетень ПЦСК.** СПб., Типография Императорской Академии наук, 1913.

**Захоронение** радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-04 / Г.П. Заручевская, В.Т. Сорокин, К.П. Захарова, О.Л. Масанов, Ю.Н. Зубков, В.М. Ирюшкин, Б.Т. Кочкин, А.И. Рыбальченко, А.Г. Левин, А.А. Сметник, Р.Б. Шарафутдинов. М., Ростехнадзор, 2004, 21 с.

**Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г.** Синергетика и прогнозы будущего. М., Едиториал УРСС, 2003, 288 с.

**Карта ОСР-97D.** <http://seismos-u.ifz.ru/ocp-97d>.

**Комплект карт** общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. М-б 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах / В.И. Уломов, Л.С. Шумилина. М., ОИФЗ РАН, 1999, 57 с. <http://seismos-u.ifz.ru/pdf/explanatory-notes-ocp-97.pdf>.

**Кондорская Н.В., Шебалин Н.В.** Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М., Наука, 1977, 506 с.

**Короновский Н.В., Наймарк А.А.** Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейности геодинамических систем // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2012, № 6, с. 3—12.

**Кочкин Б.Т.** Геологические неопределенности в оценке безопасности систем захоронения отходов // Геоэкология, 2004, № 2, с. 142—153.

- Кочкин Б.Т.** Обоснование долгосрочной безопасности геологических хранилищ высокоактивных отходов // *Геозкология*, 2013, № 4, с. 342—352.
- Лобанов Н.Ф., Бейгул В.П., Камнев Е.Н., Лопатин П.В., Ревенко Ю.А., Шрамко И.В.** Федеральный объект окончательной подземной изоляции долгоживущих РАО на горно-химическом комбинате // *Безопасность ядерных технологий и окружающей среды*, 2011, № 1, с. 10—23. <http://www.atomic-energy.ru/articles/2011/06/15/23447>.
- Лунина О.В., Андреев А.В., Гладков А.А.** Закономерности проявления и модели локализации опасных геологических процессов при сейсмогенной активизации разломов на юге Сибири и в Монголии // *Геология и геофизика*, 2014, т. 55 (8), с. 1294—1313.
- Медведев С.В.** Сейсмическое районирование территории СССР // *Сейсмическое районирование СССР*. М., Наука, 1968, с. 3—10.
- Моги К.** Предсказание землетрясений. М., Мир, 1988, 382 с.
- Морозов В.Н., Родкин М.В., Татаринов В.Н.** К проблеме геодинамической безопасности объектов ядерно-топливного цикла // *Геозкология*, 2001, № 3, с. 227—238.
- Николаев А.В.** Проблемы нелинейной сейсмологии // *Вопросы нелинейной геологии и геодинамики* (материалы III семинара по нелинейной геологии и геодинамике, ноябрь 1998 г.). М., ГЕОС, 1998, с. 65—69.
- Никонов А.А., Флейфель Л.Д.** Забытые сведения И.Г. Гмелина о землетрясениях Сибири (XVII—XVIII вв.) // *Геология и геофизика*, 2014, т. 55 (4), с. 669—677.
- Пригожин И.** Введение в термодинамику необратимых процессов. М., ИЛ, 1960, 150 с.
- Пригожин И.** Философия неустойчивости // *Вопросы философии*, 1991, № 6, с. 46—52.
- Сейсмическое районирование СССР** / Ред. С.В. Медведев. М., Наука, 1968, 476 с.
- Сейсмическое районирование территории СССР.** Методические основы и региональное описание карты 1978 г. / Под ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшкова. М., Наука, 1980, 285 с.
- Сейсмо тектоника** плит древних платформ в области четвертичного оледенения / Ред. Р.Г. Гарецкий. М., «Книга и Бизнес», 2009, 228 с.
- Сибгатулин В.Г., Симонов В.В., Перетокин С.А.** Оценка сейсмической опасности юга Центральной Сибири. Красноярск, КНИИГиМС, 2004, 196 с.
- Соболев Г.А.** Основы прогноза землетрясений. М., Наука, 1993, 313 с.
- Федотов С.А.** О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // *Сейсмическое районирование СССР*. М., Наука, 1968, с. 121—150.
- Хаин В.Е., Халилов Э.Н.** Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М., Научный мир, 2009, 520 с.
- Apostolakis G.** The concept of probability in safety assessment of technological systems // *Science*, 1990, v. 250, № 4986, p. 1359—1364.
- Barbot S., Lapusta N., Avouac J-P.** Under the hood of the earthquake machine: toward predictive modeling of the seismic cycle // *Science*, 2012, v. 336, № 6082, p. 707—710.
- Considering** timescales in the post-closure safety of geological disposal of radioactive waste. Paris, OECD/NEA, 2009, 159 p.
- Crone A.J., Machette M.N., Bowman J.R.** Episodic nature of earthquake activity in stable continental regions revealed by paleoseismicity studies of Australian and North American Quaternary faults // *Aust. J. Earth Sci.*, 1997, v. 44, p. 203—214.
- Falck W.E., Nilsson K.-F.** Geological disposal of radioactive waste: moving towards implementation. Luxembourg, Eur. Comm., 2009, 52 p.
- Fenton C.H., Adams J., Halchuk S.** Seismic hazards assessment for radioactive waste disposal sites in regions of low seismic activity // *Geotech. Geol. Engin.*, 2006, v. 24, p. 579—592.
- Gangopadhyay A., Talwani P.** Symptomatic features of intraplate earthquakes // *Seismol. Res. Lett.*, 2003, v. 74, p. 863—883.
- Kenner S.J., Segall P.** A mechanical model for intraplate earthquakes: Application to the New Madrid seismic zone // *Science*, 2000, v. 289, p. 2329—2332, doi: 10.1126/science.289.5488.2329.
- Methods** for safety assessment of geological disposal facilities for radioactive waste. Paris, OECD/NEA, 2012, 240 p.
- Mitchell R.N., Kilian T.M., Evans D.A.D.** Supercontinent cycles and the calculation of absolute palaeo-longitude in deep time // *Nature*, 2012, v. 482, p. 208—212.
- Passchier C.W., Trouw R.A.J.** *Microtectonics*. 2nd revised and enlarged edition. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2005, 366 p.

**Scholz C.H.** The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge Univ. Press, 1990, 439 p.

**Schulte S.M., Mooney W.D.** An updated global earthquake catalogue for stable continental regions: Re-assessing the correlation with ancient rifts // Geophys. J. Int., 2005, v. 161, p. 707—721.

**Stein S.** Approaches to continental intraplate earthquake issues // Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 425, 2007, p. 1—16.

**Ye L., Lay T., Kanamori H., Koper K.D.** Energy release of the 2013  $M_w$  8.3 Sea of Okhotsk earthquake and deep slab stress heterogeneity // Science, 2013, v. 341, № 6152, p. 1380—1384.

*Рекомендована к печати 8 декабря 2014 г.  
В.С. Селезевым*

*Поступила в редакцию  
16 декабря 2013 г.*