

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
Итоги Электронного Геофизического Года
3–6 июня 2009 • Переславль-Залесский, Россия

Применение междисциплинарной базы данных для построения геодинамических моделей глубинного строения регионов природных катастроф (Нефтегорское землетрясение, о. Сахалин)

А. Г. Родников,¹ Н. А. Сергеева,¹ и Л. П. Забаринская¹

Получено 12 декабря 2009; принято 19 декабря 2009; опубликовано 3 марта 2010.

На основе геолого-геофизических данных построена геодинамическая модель глубинного строения литосферы Нефтегорского землетрясения, произошедшего на острове Сахалин 28 мая 1995 г., когда был разрушен целый город. Установлено, что под Сахалином расположена древняя субдукционная зона, действовавшая в позднемеловое – раннепалеогеновое время, процессы в которой обусловили формирование Северо-Сахалинской впадины и впадины Дерюгина. На поверхности она проявляется в виде глубинных разломов, простирающихся вдоль Сахалина. Очаг Нефтегорского землетрясения образовался в связи с активизацией этой древней субдукционной зоны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: активные континентальные окраины, субдукционная зона, офиолитовый комплекс, астеносферный диапир, землетрясения.

Ссылка: Родников, А. Г., Н. А. Сергеева, и Л. П. Забаринская (2010), Применение междисциплинарной базы данных для построения геодинамических моделей глубинного строения регионов природных катастроф (Нефтегорское землетрясение, о. Сахалин), *Росс. жс. наук о Земле*, 11, RE3009, doi:10.2205/2009ES000357.

Введение

Современный этап развития наук о Земле характеризуется особым вниманием к исследованию глубинного строения планеты, вызванным необходимостью решения теоретических проблем геодинамики, эффективного прогнозирования скрытых на глубине полезных ископаемых, изучения вопросов сейсмической опасности, предсказания и уменьшения ущерба от стихийных бедствий, в особенности тех, которые обусловлены землетрясениями и извержениями вулканов, а также изучения проблем, связанных с сохранением окружающей среды. Особенно опасными для проживания населения являются континентальные окраины, которые характеризуются высокой сейсмичностью, вулканизмом и другими природными катастрофами. Примерно треть населения Земли живет на территории континентальных окраин, являющихся зонами риска. В связи с этим континентальные окраины яв-

ляются объектами детального изучения по международным и национальным геофизическим проектам [Родников и др., 2002; Сергеев, 2006; Biebow et al., 2000; Rodnikov et al., 2008].

Результаты исследований по проектам являются основой для составления Информационной междисциплинарной базы данных, которая может быть использована для построения геодинамических моделей глубинного строения активных континентальных окраин Земли. База данных включает: геолого-геофизические параметры земной коры и верхней мантии в цифровом виде, пространственно распределенные с географической координатной привязкой. В нее входят данные батиметрии, сейсмологии, глубинного сейсмического зондирования, гравиметрии, теплового потока, магнитометрии, геологии, петрологии, геологических и геофизических съемок, бурения на суше и на морском дне, драгирования, характеристики глубинных разломов, рифтов и палеорифтов, древних и современных субдукционных зон, магматических формаций и вулканов, полезных ископаемых и областей, содержащих нефтяные и газовые месторождения, астеносферных диапиров и зон частичного плавления в верхней мантии, глубинные температуры в литосфере и другие данные [Родников и др., 2009а, 2009б].

¹Геофизический центр РАН, Москва, Россия

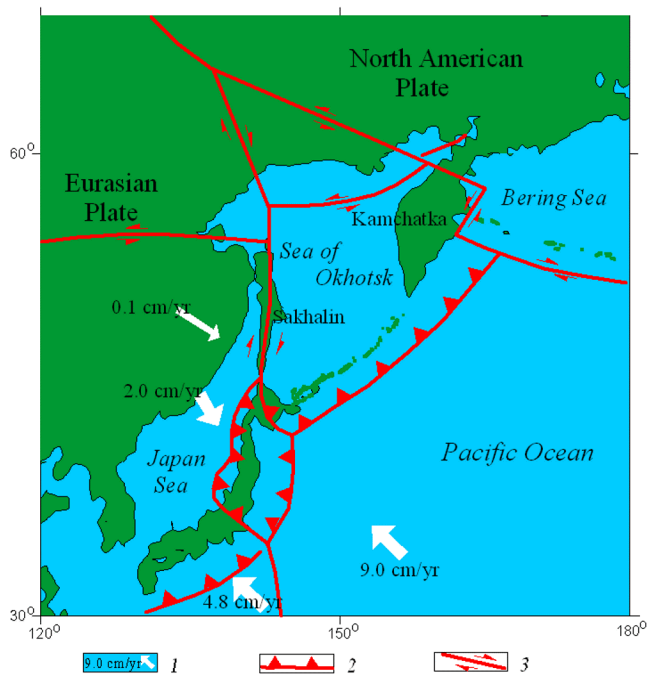


Рис. 1. Тектоническая схема региона Охотского моря [Biebow, 2000; Kiratzi and Papazachos, 1996; Maruyama et al., 1997; Rodnikov et al., 2001]. 1 – скорость движения плит по данным GPS; 2 – зоны субдукции; 3 – разломы.

На основе комплексного анализа всех этих данных разрабатываются геодинамические модели строения активных континентальных окраин, [Rodnikov et al., 2009].

Рассмотрим применение Информационной междисциплинарной базы данных для построения модели глубинного строения литосферы под Нефтегорским землетрясением, произошедшим на острове Сахалин 28 мая 1995 г., когда был разрушен целый город.

Тектоническое положение региона Нефтегорского землетрясения

Современные тихоокеанские окраины включают островную дугу и сопровождающие ее глубоководный желоб, субдукционную сейсмоактивную зону и задуговой бассейн. Основным элементом активных окраин является субдукционная зона, определяющая формы рельефа, глубинное строение, тектонику, сейсмичность, магматизм и формирование полезных ископаемых. Магматизм островных дуг – одно из наиболее важных проявлений глубинных процессов в зонах субдукции, дает возможность наиболее полно изучить строение древних субдукционных зон. Известна пространственная взаимосвязь поясов современного вулканизма островных дуг с субдукционными зонами. Активная цепь вулканов андезитового состава обычно размещается над сейсмофокальными зонами, где глубина достигает 70–100 км. Поэтому, чем боль-

ше угол наклона субдукционной зоны, тем ближе к глубоководному желобу проявляется вулканизм.

По аналогии с современными сейсмофокальными зонами древние субдукционные зоны являются структурными элементами активных окраин древних океанов и в настоящее время представлены офиолитовыми швами или сутурами. Такие древние офиолитовые комплексы обнаружены на п-ове Шмидта и вдоль восточного побережья Сахалина [Алексейчик и др., 1963; Рождественский, 2000]. Здесь они отделяют Северо-Сахалинский бассейн от впадины Дерюгина в Охотском море.

Остров Сахалин находится в западной части Охотского моря, образующего литосферную плиту, расположенную между Северо-Американской, Евразийской и Тихоокеанской плитами (Рис. 1).

Плита Охотского моря ограничена глубинными разломами, в основном сдвигами, а на юго-востоке современной субдукционной зоной – зоной Беньюфа. Фундамент плиты разнородный, от кристаллического палеозойско-мезозойского, изученного на материке, Сахалине и Камчатке, до мезозойского, развитого в акватории Охотского моря [Родников и др., 1996]. Окончательно плита сформировалась в поздне меловую эпоху, а в кайнозойскую эру была перекрыта чехлом осадочных и вулканогенно-осадочных пород. Мощность коры примерно составляет 25–30 км, увеличиваясь до 35–40 км под Сахалином. Скорости по поверхности Мохоровичича варьируют от 7.8 до 8.3 км с⁻¹ [Косминская и др., 1987; Piip and Rodnikov, 2004].

Верхняя мантия под Охотским морем характеризуется как горизонтальными, так и значительными вертикальными неоднородностями. Астеносфера, выделенная по геотермическим данным и данным сейсмической томографии [Родников и др., 1996; Смирнов, 1986; Bijwaard et al., 1998], располагается в верхней мантии в Охотском море на глубине 50–70 км, а под впадиной Дерюгина, где отмечается высокий тепловой поток [Смирнов и Сугробов, 1980], достигает подошвы земной коры, обуславливая активный тектонический режим, проявляющийся в вулканической, сейсмической и гидротермальной деятельности. Под Северо-Сахалинской осадочной впадиной, содержащей почти все нефтегазовые месторождения Сахалина, астеносфера расположена на глубине около 70 км [Родников и др., 2002].

Сейсмичность

Расположение Охотоморской плиты в зоне контакта трех литосферных плит обусловило на ее границах высокую сейсмичность (Рис. 2). Наиболее высокая сейсмическая активность отмечена вдоль Курильской островной дуги. Здесь Тихоокеанская плита погружается под континент, образуя сейсмофокальную зону, которая прослеживается до глубины 700 км. На западе Охотоморская плита ограничена глубинными разломами, простирающимися вдоль Сахалина. Здесь землетрясения локализируются, в основном, в коре [Рогожин, 1996; Юнга и Рогожин, 2000]. Сейсмичность Сахалина связана с субме-

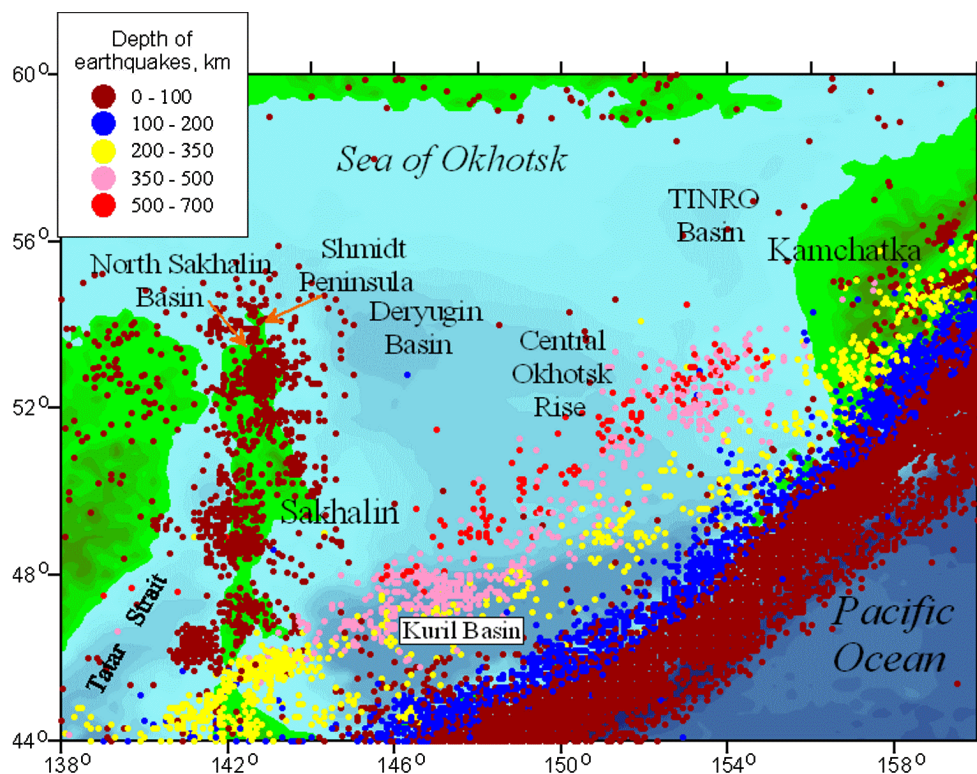


Рис. 2. Сейсмичность региона Охотского моря (по данным Геофизической службы РАН). На активной континентальной окраине Дальнего Востока регулярно происходит большое количество землетрясений. На нее приходится 80 Северной Евразии. К наиболее крупным землетрясениям, происшедшим за последние 10 лет, отнесены Шикотанское на южных Курилах в 1994 г. ($M_s = 8.4$), Нефтегорское на Сахалине в 1995 г. ($M_s = 7.2$), Кроноцкое на восточной Камчатке в 1997 г. ($M_s = 7.9$), Невельское в Татарском проливе в 2007 г. ($M_w = 6.2$) [Василенко и др., 2008; Левин и Тихонов, 2009; Юнга и Рогожин, 2000].

риональными глубинными разломами [Родников и др., 1996], разделяющими Охотоморскую литосферную плиту от Евразийской. Движение этих плит друг относительно друга, а также развитие спрединговых процессов в рифтовой структуре Татарского пролива приводят к активной сейсмичности.

Нефтегорское землетрясение 28 мая 1995 г.

Нефтегорское землетрясение произошло на Северном Сахалине 28 мая 1995 г. (координаты 52.60 с.ш. и 142.80 в.д.). Очаг землетрясения находился на глубине около 18 км, магнитуда $M_s = 7.2$ по шкале Рихтера [Рогожин, 1996]. В результате землетрясения образовался сейсморазрыв север-северо-восточного простирания протяженностью около 40 км (Рис. 3).

Разлом представляет собой правосторонний сдвиг, перемещение по которому достигало 8.1 м, а вертикальная составляющая 1.5 – 2 м. Пространственно Нефтегорский сейсморазрыв связан с Верхне-Пильтунским разломом, осложняющим на севере Сахалина неогеновые и

четвертичные преимущественно песчано-глинистые отложения мощностью до 6 и более километров. Верхне-Пильтунский разлом составляет северное звено крупного глубинного Центрально-Сахалинского разлома, прослеживающегося вдоль всего острова. Многочисленные сейсмогенные подвижки по Верхне-Пильтунскому разлому, как показали исследования [Рогожин, 1996; Семенов и др., 1996], происходили, неоднократно в голоцене. Нефтегорское землетрясение 1995 г. – лишь одна из многих сейсмодатасроф, связанных с подвижками по этому разлому.

Древняя субдукционная зона – граница между впадиной Дерюгина и Северо-Сахалинским осадочным бассейном

Северный Сахалин состоит из Северо-Сахалинского бассейна, западного обрамления впадины Дерюгина и разделяющего их офиолитового комплекса. Расположенный на п-ове Шмидта офиолитовый комплекс сложен перидотитами, гарцбургитами и дунитами. С гипербазита-

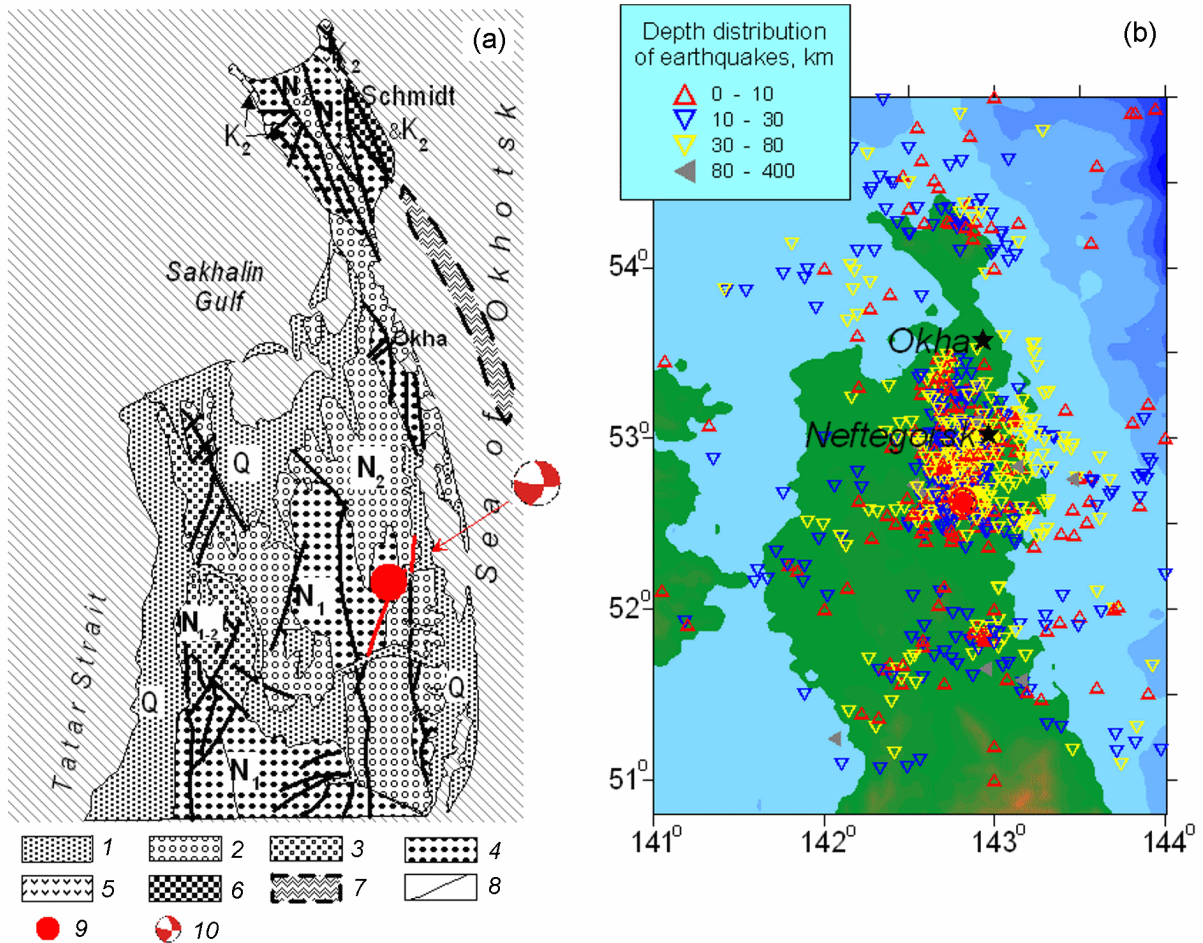


Рис. 3. Геологическая карта (а) и сейсмичность (б) Северного Сахалина. 1 – Кватер; 2 – Плиоцен; 3 – Неоген; 4 – Миоцен; 5 – Верхний мел; 6 – Офиолиты на п-ове Шмидта; 7 – Офиолиты, простирающиеся вдоль восточного побережья Сахалина; 8 – разломы; 9 – землетрясения; 10 – фокальный механизм Невтегорского землетрясения 25 мая 1995 года.

ми по тектоническому контакту, выраженному зоной серпентинитов, соприкасается толща шаровых лав базальтов, андезитов-базальтов, кератофиров и туфов мощностью до 600 м с линзами яшм, кремнистых туфоалевролитов и известняков. Кремнистые породы содержат меловые радиолярии [Алексейчик и др., 1963; Рождественский, 1988, 2000]. Среди вулканических пород выделены бониниты, характерные для фронтальной части островных дуг [Высоцкий и др., 1998]. На толщу шаровых лав надвинута чешуя габбро и габбро-диабазов мощностью до 900 м, прорванных дайками диабазов и плагиигранитов. В зоне разлома, ограничивающего перидотитовый массив с запада, встречаются крупные блоки габбро, диоритов и плагиигранитов, возраст которых (К-Аг метод) 87.1 млн. лет [Рождественский, 2000]. Перидотиты вдоль контакта с габбро сильно серпентинизированы, а габбро превращены в родингиты.

По данным аэромагнитной съемки массив гипербазитов п-ова Шмидта прослеживается в Охотском море в юго-восточном направлении вдоль восточного побере-

жья Сахалина на 1200 км при ширине до 30 км [Корнев, 1990] и связан с глубинным разломом, перекрытым в настоящее время кайнозойскими отложениями. В магнитном поле эта зона представляет собой пояс высокоградиентных аномалий, интенсивность которых достигает 1300 нТл [Родников и др., 1996].

Предполагается, что офиолитовый комплекс фиксирует положение древней сейсмофокальной зоны – позднемезозойской зоны субдукции океанической коры Охотского моря под структуры Сахалина [Гранник, 1991; Родников и др., 2002].

Подтверждением развития в позднем мезозое субдукционной зоны служит выделенная на Восточном Сахалине позднемеловая-палеогеновая Восточно-Сахалинская вулканическая дуга, состоящая из фрагментов вулканических островов, сложенных андезитами, дацитами, риолитами и их туфами известково-целочной серии [Гранник, 1999]. Распространение андезитовой цепи вулканов вдоль восточного Сахалина свидетельствует о том, что глубина до субдукционной зоны, где располагались в то

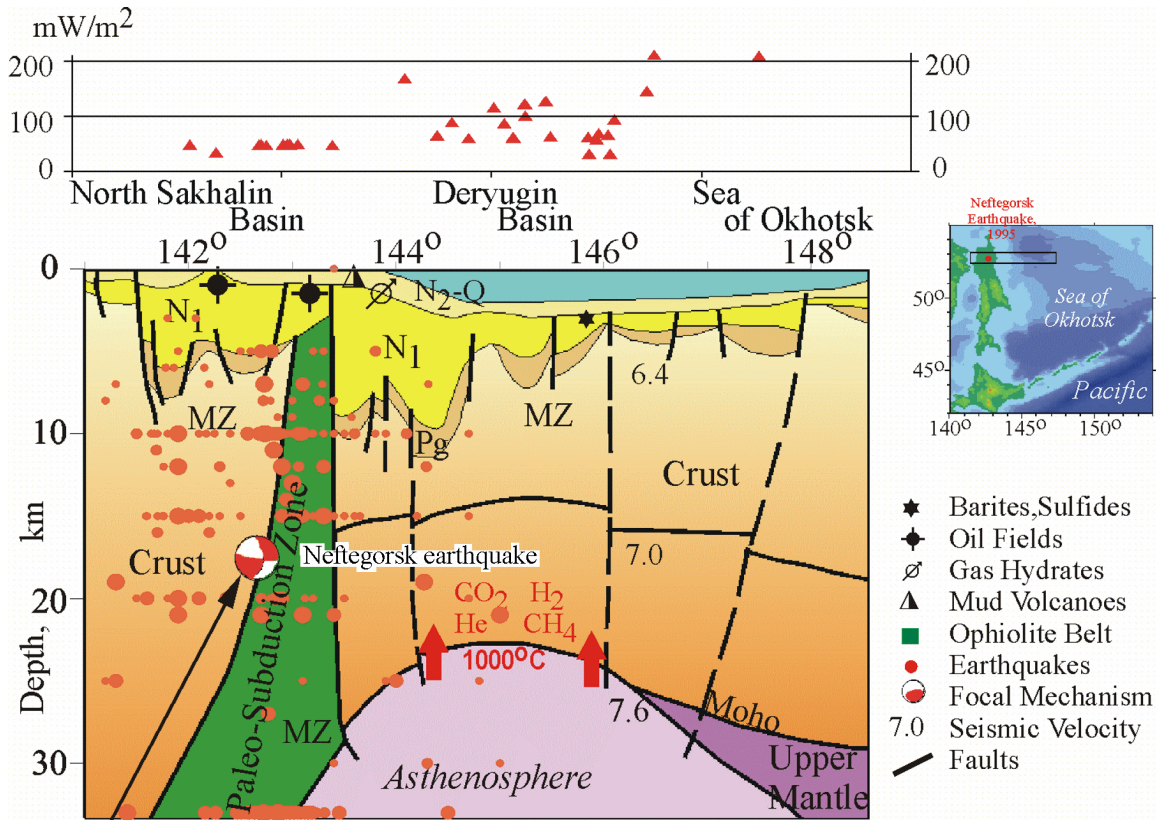


Рис. 4. Геодинамическая модель глубинного строения региона Нefтегорского землетрясения. Справа: карта-схема расположения профиля. Вверху: распределение измеренных значений теплового потока (мВт м^{-2}) вдоль профиля. Очаг Нefтегорского землетрясения связан с подвижками, происходящими в древней субдукционной зоне. Геологический возраст: MZ – мезозой, Pg – палеоген, N – неоген, Q – четвертичные отложения.

время магматические очаги, составляла 70–100 км. Толщина реконструированной сейсмофокальной зоны примерно составляет 80 км, а угол наклона около 450 [Гранник, 1999]. За вулканической дугой в позднем мелу на Северном Сахалине располагался задуговой бассейн, сложенный терригенными, кремнистыми и карбонатными породами, а перед дугой располагался глубоководный желоб, фиксирующий субдукцию плиты Охотского моря под Сахалин.

Геодинамическая модель глубинного строения региона

Через древнюю субдукционную зону, вулканическую островную дугу, впадину Дерюгина и Северный Сахалин был построен глубинный геолого-геофизический разрез (Рис. 4). Геологическое строение дано по [Богданов и Халин, 2000; Родников и др., 1996; Viebow, 2000; Rodkin and Rodnikov, 1996; Rodnikov et al., 2001, 2008], строение коры по [Косминская и др., 1987; Piip and Rodnikov, 2004], строение верхней мантии по [Родников и др., 1996, 2002], значения теплового потока по [Смирнов, 1986; Смирнов и

Сугробов, 1980; Pollak et al., 1991], сейсмичность по ежегоднику *Землетрясения Северной Евразии, 1992–2003*, (ред. О. Е. Старовойт), а также по [Юнга и Рогожин, 2000].

Построенная модель глубинного строения литосферы под Нefтегорским землетрясением показала, что Северный Сахалин состоит из Северо-Сахалинской осадочной впадины, западного обрамления впадины Дерюгина и разделяющего их офиолитового комплекса [Родников и др., 2002; Rodnikov et al., 2008].

Впадина Дерюгина образовалась на месте древнего глубоководного желоба, после того как в позднемеловое-палеогеновое время плита Охотского моря субдуцировала под вулканическую дугу [Гранник, 1999; Родников и др., 2002]. Она выполнена кайнозойскими, преимущественно глубоководными, морскими терригенными и кремнисто-терригенными отложениями толщиной до 12 км. В неогене в результате раскрытия рифтовой структуры Татарского пролива субдукция прекратилась, а желоб превратился в осадочный бассейн [Родников и др., 1996; Rodnikov et al., 2001]. Олигоцен-нижнемiocеновый комплекс составляет нижнюю часть осадочной толщи. Он слагает отдельные изолированные рифтовые грабены, сформировавшиеся в условиях глубоководного желоба.

Мощность этих отложений составляет 3–5 км. Верхняя основная часть разреза сложена миоцен-четвертичными осадками, выполняющими крупные прогибы, отделенные от поднятий листрическими сбросами. Верхи разреза сложены диатомовыми пелитами с прослоями пирокластических пород.

Слоистая толща впадины Дерюгина повсеместно смята в складки и разбита разломами, осложняющими борта впадины [Biebow et al., 2000]. Разломы отражают современную тектоническую обстановку региона, обусловленную, по-видимому, глубинными процессами. Активная современная тектоника подчеркивается высокими значениями теплового потока, достигающими 200 мВт м^{-2} [Смирнов, 1986], гидротермальной деятельностью [Обжиров и др., 1999] и сейсмическими проявлениями, приуроченными в основном к западному борту впадины Дерюгина [Рогожин, 1996], где выходит на поверхность древняя сейсмофокальная зона.

Мощный осадочный чехол впадины залегает на неровной поверхности акустического фундамента со скоростями сейсмических волн $6.2\text{--}6.4 \text{ км с}^{-1}$. Скорости по поверхности Мохо пониженные до 7.6 км с^{-1} [Piip and Rodnikov, 2004]. Толщина фундамента незначительная – не больше 10 км, обусловленная процессами растяжения и последующего прогибания. Тектоническая активность, проявившаяся в регионе Охотского моря, в частности во впадине Дерюгина, обусловлена процессами, протекающими в верхней мантии. Здесь на небольшой глубине (25–30 км) после завершения процессов субдукции возник астеносферный диапир, содержащий магматические очаги с высокими температурами, достигающими $11,000^\circ\text{C}$ [Родников и др., 2002].

Над древней субдукционной зоной располагается Северо-Сахалинский осадочный бассейн, сформировавшийся на месте позднемереловой задуговой впадины. Протяженность его в северо-западном направлении составляет 900 км при ширине в 80–120 км. Фундамент сложен триасо-раннемереловыми вулканогенно-кремнистыми и, в отдельных случаях, позднемереловыми вулканогенными отложениями. Он расположен на глубине до 5–12 км, а на обрамляющих и внутренних поднятиях до 1.5–3 км [Родников и др., 1996].

Образование задугового бассейна связывается с аппеллингом астеносферного диапира к коре, расчленением коры в конце позднего мела на систему узких горстов и грабенных и накоплением фаций начального рифтогенеза [Родников и др., 2005; Rodnikov et al., 2001]. Породы бассейна представлены переслаиванием терригенных, кремнисто-терригенных и карбонатно-вулканогенно-кремнистых пород [Родников и др., 1996].

Магматические породы, связанные с развитием задугового бассейна, относятся к известково-щелочным и щелочным сериям. Они представлены габбро, гранодиоритами и толитами, сходными с океаническими оливковыми базальтами, андезитами, сменяющимися вверх по разрезу дацитами и риолитами. Возраст осадочных пород устанавливается по фауне иноцерамов и аммонитов, а также по радиоляриям, как верхнемереловой [Гранник, 1999]. В олигоценовую эпоху продолжалось заполнение грабенных терригенными, а затем кремнисто-глинистыми

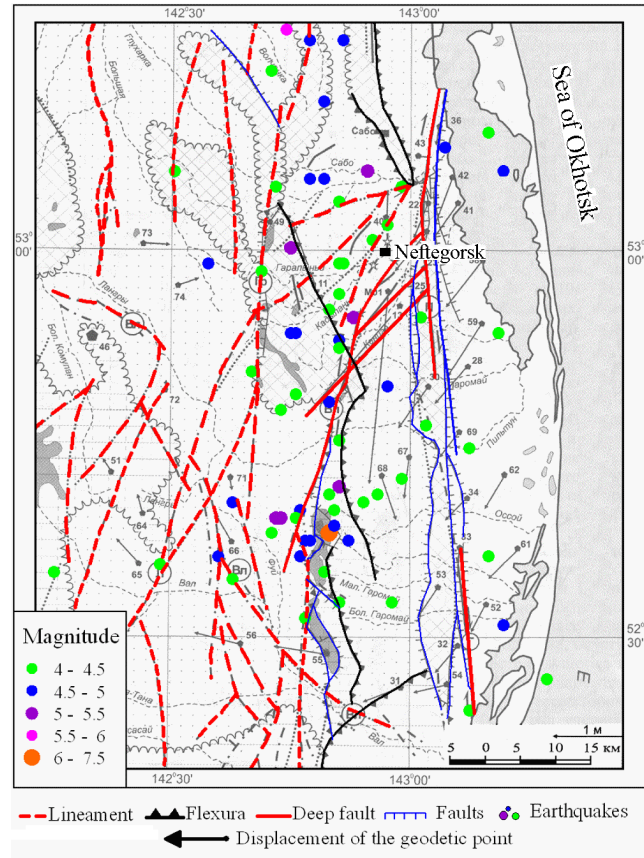


Рис. 5. Схема горизонтальных деформаций земной поверхности региона Нefтегорского землетрясения за период 1970–1997 гг. [Василенко и др., 2001; Воейкова и др., 2007], дополненная эпицентрами землетрясений. Линеаменты, флексуры, глубинные разломы, разломы, очаги землетрясений, смещение пункта геодезической сети.

отложениями мощностью до 3.5 км. Следующему миоценовому этапу максимального расширения в Северо-Сахалинском бассейне соответствует мощный (до 10 км в отдельных грабенах) комплекс пород – сначала глубоководные, а потом все более мелководные песчано-глинистые отложения. Для плиоценового этапа развития бассейна, как и предыдущих, характерно накопление песчано-глинистых осадков. В результате плиоценово-четвертичной тектонической активизации сформировались слабо интенсивные пологие пликативные структуры. Тепловой поток в этом бассейне характеризуется средними значениями, а астеносфера по данным электромагнитных исследований расположена в настоящее время на глубине около 70 км [Родников и др., 1996].

В результате подвижек, происходящих по древней субдукционной зоне, расположенной под Сахалином, в земной коре происходят значительные перемещения по многочисленным разломам и деформация земной поверхности. Образовалась система разломов в коре, включающая линеаменты, глубинные разломы, сбросы, взбросы, сдвиги и флексуры (Рис. 5). Вдоль разломов образовались приразломные впадины и блоки. Кора региона находится

в постоянном движении. Отмечаются как горизонтальные, так и вертикальные перемещения [Воейкова и др., 2007].

Повторные GPS-измерения в эпицентральной зоне Нефтегорского землетрясения выполнялись в 1995–1997 гг. В результате землетрясения в эпицентральной зоне произошли значительные правосторонние смещения земной поверхности. В окрестностях Нефтегорска величина правостороннего сдвига составила 4 м, а амплитуда взброса составила 75 см [Василенко и др., 2001; Воейкова и др., 2007].

Формирование и дальнейшее развитие осадочных бассейнов, расположенных на Северном Сахалине, таких как впадина Дерюгина, образовавшаяся на месте глубоководного желоба, или Северо-Сахалинский осадочный бассейн, наследовавший структуры задуговой впадины, обусловлено субдукционными процессами, протекавшими в позднемеловую-раннепалеогеновую эпоху и активизированными в последующее время, о чем свидетельствует непрекращающиеся сейсмические подвижки в регионе [Rodnikov, 2007]. Расположение древней субдукционной зоны под Сахалином, являющейся причиной сильных землетрясений, делает этот регион одним из сейсмоопасных на территории России.

Выводы

1. Построенная модель глубинного строения литосферы региона Нефтегорского землетрясения показала, что Северный Сахалин состоит из Северо-Сахалинской осадочной впадины, западного обрамления впадины Дерюгина, и разделяющего их офиолитового комплекса. Впадина Дерюгина образовалась на месте древнего глубоководного желоба, после того как в позднемеловое-палеогеновое время плита Охотского моря субдуцировала под вулканическую дугу, расположенную вдоль Сахалина, а Северо-Сахалинский бассейн сформировался в то время на месте задуговой впадины. Офиолитовый комплекс, сложенный ультраосновными породами, фиксирует положение древней субдукционной зоны, действующей примерно 100–60 млн. лет назад. На поверхности субдукционная зона проявляется в виде глубинных разломов, простирающихся вдоль Сахалина. Очаг Нефтегорского землетрясения непосредственно образовался в связи с активизацией этой древней субдукционной зоны. Расположение под Сахалином древней субдукционной зоны, являющейся причиной сильных землетрясений, делает этот регион одним из сейсмоопасных на территории России.

2. Построение геодинамических моделей активных континентальных окраин дает возможность:

- изучить глубинное строение недр Земли под сейсмоопасными зонами, вулканическими областями, регионами минерализации и осадочными впадинами;
- исследовать роль глубинных процессов, протекающих в мантии, в формировании структур земной коры, представить динамику развития континентальных окраин;

- провести корреляцию между геологическими структурами, тектоно-магматической активностью, гидротермальными проявлениями и строением верхней мантии;

- выделить зоны повышенного риска с тем, чтобы предотвратить активное строительство или другую экономическую деятельность в таких опасных регионах.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ. Гранты № 09-05-00406-а и № 09-01-90435_Укр_ф_а.

Литература

- Алексейчик, С. Н., С. Д. Гальцев-Безюк, В. С. Ковальчук, П. М. Сычев (1963), *Тектоника, история геологического развития и перспективы нефтегазоносности Сахалина*, Гостоптехиздат, Ленинград.
- Богданов, Н. А., В. Е. Хаин, (ред.), (2000), *Тектоническая карта Охотоморского региона, Масштаб 1: 250,000*, Институт литосферы РАН, Москва.
- Василенко, Н. Ф., и др. (2001), Деформации земной поверхности в эпицентральной зоне Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г., *Динамика очаговых зон и прогнозирования сильных землетрясений северо-запада Тихого океана*, 39–57, ИМГиГ, Южно-Сахалинск.
- Василенко, Н. Ф., Б. В. Левин, А. С. Прытков, Ч. У. Ким, Х. Такахаша (2008), Дислокационная модель Невельского землетрясения 02.08.2007 г. *M = 6.2, ДАН*, 422(3), 386–390.
- Воейкова, О. А., С. А. Несмеянов, Л. И. Серебрякова (2007), *Неотектоника и активные разрывы Сахалина*, Наука, Москва.
- Высоцкий, С. В., Г. И. Говоров, И. В. Кемлин, В. И. Сапин (1998), Бонинит-офиолитовая ассоциация Восточного Сахалина: геология и некоторые особенности петрогенеза, *Тихоокеанская геология*, 17(6), 3–15.
- Гранник, В. М. (1991), Петрохимическая характеристика магматических пород Восточно-Сахалинской позднемезозойской островодужной системы, *Тихоокеанская геология*, No. 6, 67–86.
- Гранник, В. М. (1999), Реконструкция сейсмофокальной зоны Восточно-Сахалинской вулканической палеодуги по распределению редкоземельных элементов, *ДАН*, 366(1), 79–83.
- Корнев, О. С. (1990), Геомангнитные формации фундамента Охотоморской плиты, *Тихоокеанская геология*, No. 2, 33–39.
- Косминская, И. П., А. Г. Родников, Г. И. Семенова, (ред.), (1987), *Глубинное сейсмическое зондирование. Данные по Тихому океану*, Советский геофизический комитет АН СССР, Москва.
- Левин, Б. В., И. Н. Тихонов, (ред.), (2009), *Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин*, Янус-К, Москва.
- Обжиров, А. И., Н. В. Астахова, М. И. Липкина, О. Ф. Верецагина, Г. И. Мишукова, А. В. Сорочинская, И. Г. Югай (1999), *Газо-геохимическое районирование и минеральные ассоциации дна Охотского моря*, Дальнаука, Владивосток.
- Рогожин, Е. А. (1996), Тектоника очаговой зоны Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. на Сахалине, *Геотектоника*, No. 2, 45–53.
- Родников, А. Г., И. К. Туезов, В. В. Харахинов, (отв. ред.), (1996), *Структура и динамика литосферы и астеносферы Охотоморского региона*, Геофизический комитет, Москва.
- Родников, А. Г., Н. А. Сергеева, Л. П. Забаринская (2002), Глубинное строение впадины Дерюгина (Охотское море),

- Тихоокеанская геология*, No. 4, 3–8.
- Родников, А. Г., Л. П. Забаринская, В. Б. Пийп, В. А. Рашидов, Н. А. Сергеева, Н. И. Филатова (2005), Геотраверс региона Охотского моря, *Вестник КРАУНЦ, серия "Науки о Земле"*, No. 5, 45–58.
- Родников, А. Г., Н. А. Сергеева, Л. П. Забаринская (2009a), Геодинамическая модель глубинного строения литосферы региона Нefтегорского землетрясения (о. Сахалин), *Геологические опасности*, ред. Ф. Н. Юдахин, 379–382, Институт экологических проблем Севера, Архангельск.
- Родников, А. Г., Н. А. Сергеева, Л. П. Забаринская (2009b), Применение междисциплинарной базы данных для построения геодинамических моделей активных континентальных окраин Земли, *Материалы международной конференции "Итоги электронного геофизического года"*, 84, Геофизический центр РАН, Москва.
- Рождественский, В. С. (1998), Геологическое строение и тектоническое развитие полуострова Шмидта (о. Сахалин), *Тихоокеанская геология*, No. 3, 62–71.
- Рождественский, В. С. (2000), Микроплита Сахалин–Хоккайдо, *Объяснительная записка к Тектонической карте Охотоморского региона, масштаб 1 : 2,500,000*, ред. Н. А. Богданов, В. Е. Хаин, 60–71, ИЛОВМ РАН, Москва.
- Семенов, Р. М., В. А. Павленов, В. В. Харахинов (1996), Катастрофическое землетрясение на севере Сахалина (краткая сейсмологическая характеристика), *ДАН*, 351(4), 535–538.
- Сергеев, К. Ф., (ред.) (2006), *Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря*, Наука, Москва.
- Смирнов, Я. Б. (1986), *Геотермическая карта Северной Евразии и методы анализа термической структуры литосферы*, Геологический институт, Москва.
- Смирнов, Я. Б., В. М. Сугробов (1980), Земной тепловой поток в Курило-Камчатской и Алеутской провинциях, *Вулканология и сейсмология*, No. 2, 3–17.
- Юнга, С. Л., Е. А. Рогожин (2000), Сейсмичность, механизмы очагов землетрясений и сеймотектонические деформации в пределах активных блоков литосферы, *Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии*, ред. А. Ф. Грачев, 412–417, Пробел, Москва.
- Bijwaard, H., W. Spakman, E. R. Engdahl (1998), Closing the gap between regional and global travel time tomography, *J. Geophys. Res.*, 103(B12), 30,055–30,078. doi:10.1029/98JB02467
- Biebow, N., T. Ludmann, B. Karp, R. Kulinich, (eds.), (2000), *Cruise Reports: Komex V and VI. Kuril Okhotsk Sea Marine Experiment*, Kiel, Germany.
- Kiratzis, A., C. Papazachos (1996), Moment-tensor summation to derive the active crustal deformation in Japan, *BSSA*, 86(3), 821–831.
- Maruyama, S., Y. Isozaki, J. Kimura, M. Terabayashi (1997), Paleographic maps of the Japanese Islands: Plate Tectonic Synthesis from 750 Ma to the present, *The Island Arc*, 6(1), 91–120. doi:10.1111/j.1440-1738.1997.tb00042.x
- Piip, V. B., A. G. Rodnikov (2004), The Sea of Okhotsk crust from deep seismic sounding data, *Russ. J. Earth Sci.*, 6(1), 1–14. doi:10.2205/2003ES000140
- Pollack, H. N., S. J. Hurter, J. R. Johnson (1991), *The new global heat flow compilation*, Department of Geological Sciences University of Michigan, USA.
- Rodkin, M. V., A. G. Rodnikov (1996), Origin and structure of back-arc basin: new data and model discussion, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 93(0), 123–131. doi:10.1016/0031-9201(95)03092-1
- Rodnikov, A. G. (2007), *Ancient subduction zone in the Sakhalin Island (the Sea of Okhotsk)*, IUGG, Perugia, Italy.
- Rodnikov, A. G., N. A. Sergeeva, L. P. Zabarinskaya (2001), Deep structure of the Eurasia-Pacific transition zone, *Russ. J. Earth Sci.*, 3(4), 293–310. doi:10.2205/2001ES000061
- Rodnikov, A. G., N. A. Sergeeva, L. P. Zabarinskaya, N. I. Filatova, V. B. Piip, V. A. Rashidov (2008), The deep structure of active continental margins of the Far East (Russia), *Russ. J. Earth Sci.*, 10(4), ES4002. doi:10.2205/2007ES000224
- Rodnikov, A. G., N. A. Sergeeva, L. P. Zabarinskaya (2009), Informational Interdisciplinary database for the construction of the geodynamic models of the active continental margins of the Earth, *Proceedings of EUREGEO*, vol. 1, 260–262, Munich, Bavaria, Germany.

Л. П. Забаринская, А. Г. Родников, и Н. А. Сергеева, Геофизический центр РАН, ул. Молодежная 3, 119296 Москва, Россия. (a.rodnikov@gcras.ru)