
В.Н. Патрикеев, В.Л. Ломтев

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

РАЗЛОМЫ СЕВЕРНОГО САХАЛИНА: ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ

По данным малоглубинной сейсмоки методом преломленных (продольных и поперечных) волн исследовано строение нескольких разломов Северного Сахалина. Намечены признаки их тектонической активности и связанные с ними сильные землетрясения, например, Нефтегорское катастрофическое событие 27(28).05.1995 г.

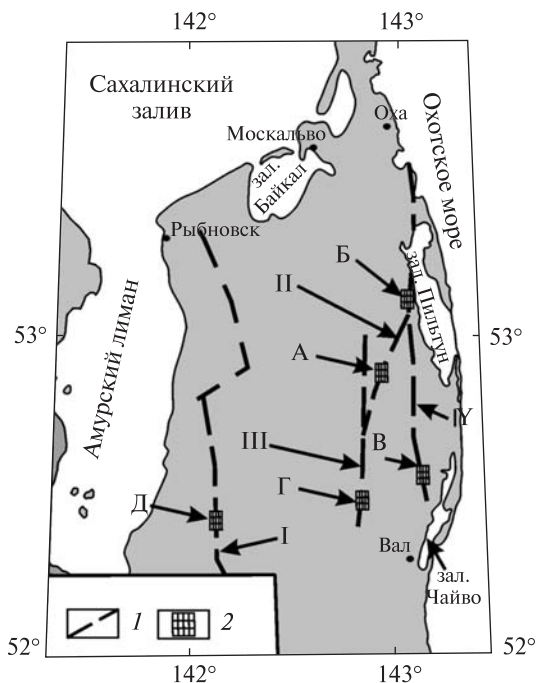
Ключевые слова: Северный Сахалин, метод преломленных волн, скорости сейсмических волн, коэффициент поглощения, активный разлом, землетрясение.

Введение

Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г. на Северном Сахалине снова поставило вопрос о прогнозировании подобных катастрофических явлений. Один из главных признаков, свидетельствующих о сравнительно недавнем проявлении сейсмической активности в конкретном районе, — наличие в нем активных разломов. К ним, согласно определению авторов [4], относятся такие разрывные нарушения, по которым последние подвижки происходили не ранее голоценового времени, и существует вероятность их повторения в ближайшем будущем. То есть активные разломы могут служить индикатором, указывающим местоположение очага потенциально возможного землетрясения, а их присутствие в исследуемом районе свидетельствует о его повышенной сейсмоопасности. Следовательно, один из возможных путей подхода к проблеме прогнозирования землетрясений для конкретного района заключается в том, чтобы: а) установить наличие в нем тектонических нарушений; б) определить, относятся ли эти нарушения к категории активных разломов или нет. Последняя задача наиболее сложная, так как ее решение требует наличия определяющих критериев (признаков), позволяющих устанавливать состояние активности любого исследуемого тектонического нарушения. Естественно, что эти критерии можно выделить

© **В.Н. ПАТРИКЕЕВ**, В.Л. ЛОМТЕВ, 2016

Рис. 1. Схема активных разломов Северного Сахалина (1) и районов сейсмических исследований (2) (по данным отчета Борисова С.А. и др., 2011). *Активные разломы:* I — Западносахалинский, II — Верхнепильгунский, III — Гыргыланы-Дагинский, IV — Эхаби-Паромайский. Районы работ: А — Верхнепильгунский (Нефтегорский), Б — Эхаби-Паромайский, В — Гаромайский, Г — Гыргыланы-Дагинский, Д — Западносахалинский



только на основе анализа данных, полученных при изучении нарушений, уверенно установленных как активные разломы. К их числу несомненно относится Нефтегорский сейсморазрыв, образовавшийся в результате землетрясения 27(28).05.1995 г. (рис. 1), который можно считать эталонным активным разломом * [3—5, 7—9, 12, 14, 16]. Очевидно, что активные разломы проявляются не только в рельефе, но и в геофизических полях, отображающих изменение физических параметров пород вблизи плоскости разрыва (разрыхление, трещиноватость, дробление и т. д.). Причем с течением времени указанные параметры постепенно восстанавливаются и теряют выраженность в геофизических полях. Это свойство (изменение физических характеристик пород в зоне нарушения со временем) можно использовать для приблизительной оценки времени последнего сейсмического события. Такая оценка станет возможной в том случае, если удастся установить закономерность изменения кинематических и динамических сейсмических характеристик волн со временем. По этой причине в комплекс работ, состоящих из сейсмологических, геодезических и геологических методов, а также дешифрирования космических и аэрофотоснимков, проводимых Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН для исследования активных разломов, с 1997 года включена высокоразрешающая малоглубинная сейсморазведка (см. вышеуказанный отчет и [2]).

Ниже представлены результаты исследований, выполненных методом преломленных волн (МПВ) на Нефтегорском сейсморазрыве, Эхаби-Паромайском, Гаромайском, Гыргыланы-Дагинском и Западносахалинском разломах (рис. 1). Выбраны разломы, последние подвижки по которым происходили в разное время, а на первых двух — примерно с одинаковой интенсивностью. По данным [3], магнитуда Нефтегорского землетрясения составляла 7,8, а на исследуемом участке Эхаби-Паромайского разлома, согласно [4], последнее сейсмическое событие имело место ~2600 лет назад с такой же магнитудой.

* Изучение сейсмоакустическими методами проявлений тектонических процессов и геологических структур Сахалино-Курильской зоны перехода и прилегающей части Тихого океана: Отчет о НИР (закл.) / ИМГиГ ДВО РАН; Рук. С.А. Борисов № ГР01200952746. — Ю.-Сахалинск, 2011. 108 с.

Экспериментальные наблюдения выполняли с использованием продольных P и поперечных SH (поляризованных перпендикулярно плоскости падения) волн (см. вышеуказанный отчет) по стандартной методике высокоразрешающей малоглубинной сейсморазведки по системе встречных и нагоняющих годографов с шагом между пунктами приема 1—2 м, между пунктами возбуждения 22 и 46 м и максимальной длине годографа 92 м. Возбуждение сейсмических колебаний производились ударным способом с энергией излучения порядка 300 Дж. Регистрацию сейсмической информации вели на цифровых сейсмостанциях с накоплением до 30 воздействий на одном пункте взрыва. Построение сейсмических разрезов и расчет скоростных параметров выполняли способом математического моделирования с использованием пакета специализированных программ версии SEIS, в основе которых заложен рефлективный метод лучевого трассирования [18]. Это позволило детально дифференцировать сейсмический разрез по скоростным характеристикам и выделить в нем локальные участки пониженных скоростей. Для изучения динамических характеристик волн в зоне разрыва применили специально разработанный способ определения коэффициентов поглощения для приповерхностных слоев [11]. Использование в нем амплитудных графиков, полученных по встречным системам наблюдений (с поправкой на влияние расхождения фронтов волн с учетом выявленных скоростных зависимостей), позволило с высоким разрешением определять коэффициенты поглощения в относительно тонких слоях мощностью несколько метров. При этом в качестве расчетных параметров использовали амплитуды преломленных (рефрагированных) волн, выделенных только вне зоны их интерференции. Значения определяемых коэффициентов поглощения пересчитывали на частоту 1 Гц, а их размерность составляла $(\text{м} \cdot \text{Гц})^{-1}$. Погрешность вычислений оценивали от $0,5 \cdot 10^{-3} (\text{м} \cdot \text{Гц})^{-1}$ для верхней (низкоскоростной) толщи до $0,3 \cdot 10^{-4} (\text{м} \cdot \text{Гц})^{-1}$ — $0,5 \cdot 10^{-4} (\text{м} \cdot \text{Гц})^{-1}$ — в нижней.

Результаты исследований МПВ на активных разломах Северного Сахалина

Нефтегорский сейсморазрыв образовался в результате Нефтегорского землетрясения 1995 года на месте Верхнепильгунского разлома. В рельефе сейсморазрыв проявился в виде правостороннего взбросо-сдвига с изменяющимися вдоль простирания амплитудами вертикальных и горизонтальных смещений. Сейсмические исследования проводили на двух профилях, расположенных примерно в 4 км друг от друга на участках с разными морфологическими признаками проявления разрыва (рис. 2, а). На первом участке сейсмическая подвижка выразилась в виде вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности на 0,5 и 2 м соответственно. Наблюдения МПВ с использованием продольных (P -волн) по профилю 1 (ПР) выполнили в 1999 и 2004 годах, а с использованием поперечных (S -волн) — только в 2004 г. Сейсмические результаты, полученные по материалам продольных волн в разные годы, не имеют принципиальных отличий и поэтому приводятся в виде сводного разреза на рис. 2, в. Глубинность исследований не превысила 10 м. Выделили две преломляющие границы, разделяющие разрез на три толщи: верхнюю, низкоскоростную ($V_p = 160$ — 220 м/с); промежуточную ($V_p = 320$ — 500 м/с) и нижнюю, высокоскорост-

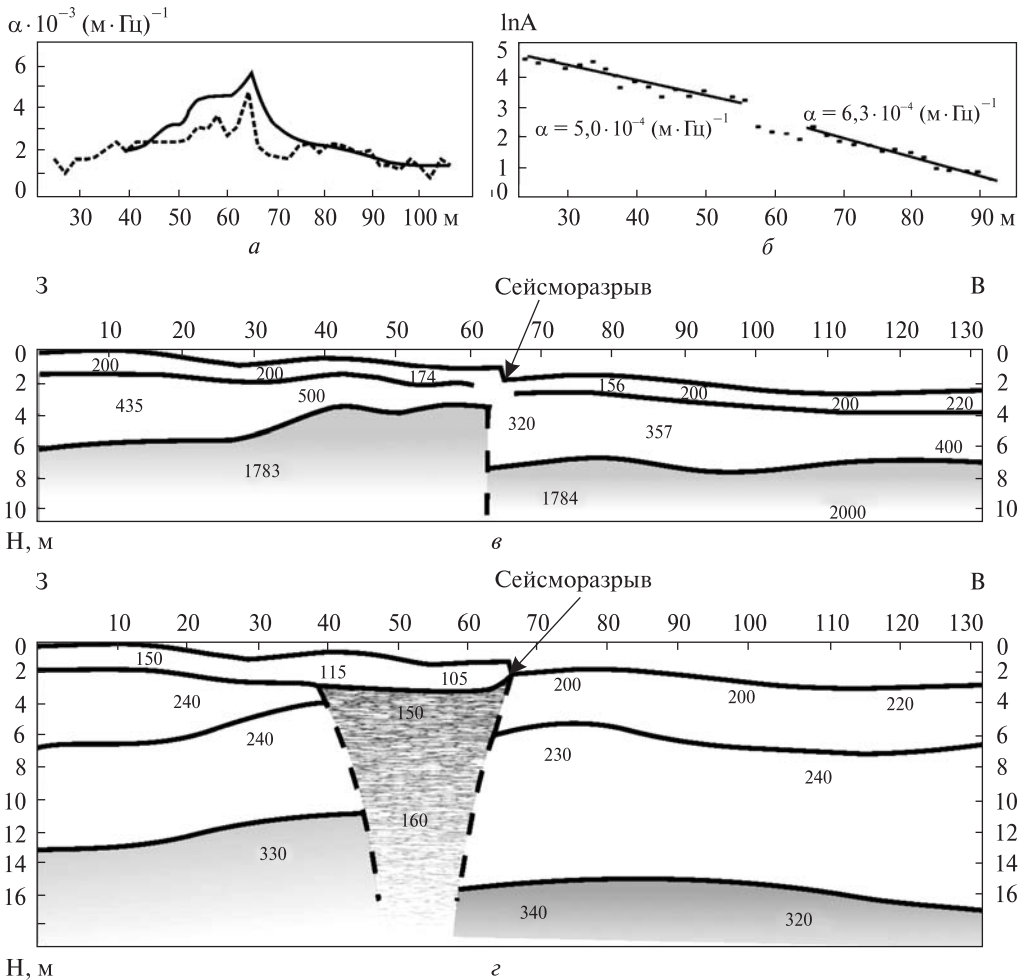


Рис. 2. Результаты МПВ на Верхнепильтунском разломе (профиль 1): *a* — коэффициенты поглощения в верхней, низкоскоростной толще: сплошной линией — 1999 г., пунктиром — 2004 г.; *б* — разностные амплитудные графики и пластовые коэффициенты поглощения в нижней, высокоскоростной толще; *в, г* — сейсмические разрезы, построенные по продольным (*в*) и поперечным (*г*) волнам, цифрами обозначена скорость волн в м/с

ную ($V_p = 1780\text{--}2220$ м/с). Положение сейсморазрыва на разрезе отчетливо обнаруживается вертикальным смещением кровли нижнего слоя на 3,5 м, что примерно в 7 раз превышает высоту уступа, наблюдаемого на земной поверхности.

Исследованиями, проведенными на этом же профиле с использованием поперечных (*S*) волн, глубинность удалось увеличить до 18—20 м. Полученный разрез имеет более сложное строение и существенно дополняет разрез, построенный по *P*-волнам (рис. 2, *в*). Выделено четыре слоя с увеличивающимися с глубиной значениями скоростей: $V_s = 105\text{--}220$ м/с в приповерхностной и до $V_s = 320\text{--}340$ м/с — в нижней толще, кровлю которой можно принять за поверхность условного фундамента. Следует отметить, что эта поверхность, выделенная в интервале 12—17 м, залегает на 7—8 м ниже кровли выделенного по *P*-волнам высокоскоростного нижнего слоя (рис. 2, *в*). Судя по значениям скоростей

продольных $V_p = 1780\text{--}1850$ и поперечных $V_s = 230\text{--}240$ м/с (на разрезе рис. 2, в, з), а также величины отношения $V_p/V_s \approx 8$, можно утверждать, что этот слой представлен водонасыщенными отложениями, а его кровля в большей степени обусловлена не литологией разреза, а водонасыщением. Данное обстоятельство послужило причиной невысокой глубинности исследований P -волнами, поскольку водонасыщение нижних слоев способствовало уменьшению преломляющих свойств границ раздела для этого типа волн. В связи с этим большей информативностью обладают разрезы, построенные по S -волнам (рис. 2, з). Подтверждение этого — более детальное отображение Нефтегорского сейсморазрыва на разрезе, полученном при исследовании с помощью S -волн. Здесь он (в отличие от разреза P -волн, рис. 2, в), характеризуется не только вертикальным смещением преломляющих горизонтов, но и зоной аномального понижения скорости до $150\text{--}160$ м/с (ПК 40—65, рис. 2, з). Понижение скорости связано с разуплотнением отложений нутовской свиты (поздний миоцен—плиоцен), возникшем в зоне тектонической подвижки, вероятно, в результате последнего сейсмособытия. При этом наибольшему разуплотнению подвергся участок западного приподнятого крыла. Амплитуда вертикального смещения кровли условного фундамента и поверхности покрывающей толщи составляет $4\text{--}5$ м, что примерно на порядок больше вертикальной подвижки на земной поверхности. Если учесть, что мощность верхней осадочной толщи в этом месте не превышает $6\text{--}7$ м, то такой значительный разброс в амплитудах вертикальных смещений земной поверхности и сейсмических границ сложно увязать с Нефтегорским землетрясением. По всей видимости, смещение сейсмических горизонтов происходило в несколько этапов и было связано с разными по времени подвижками. Данный вывод подтверждает мнение о том, что сейсмическая активность в этом районе имела место и в более отдаленное время, а Нефтегорский сейсморазрыв образовался в зоне Верхнепильгунского разлома [4, 6, 12, 14].

Особый интерес вызывают данные по поглощающим свойствам отложений нутовской свиты, которые были получены на этом профиле по P -волнам в разные годы наблюдений. Расчетные графики поглощения представлены отдельно для верхней (рис. 2, а) и нижней (рис. 2, б) частей разреза. Как видно из этого графика, наиболее интенсивное поглощение в верхней толще (рис. 2, а) по результатам измерений 1999 и 2004 г. отмечается в поднятом крыле разлома (ПК 50—65), а пик максимальных значений (ПК 65) точно соответствует положению плоскости сместителя. Из этого следует, что отложения верхнего слоя западного поднятого крыла подверглись большему разрушению по сравнению с восточным, опущенным. Максимальное разрушение пород произошло непосредственно вблизи плоскости разрыва. Необходимо подчеркнуть отмеченное здесь уменьшение коэффициентов поглощения P -волн с $5 \cdot 10^{-3}$ (м · Гц) $^{-1}$ в 1999 до $4,5 \cdot 10^{-3}$ (м · Гц) $^{-1}$ в 2004 г. То есть, за 5 лет, вероятно, вследствие восстановления физических параметров среды, или т. н. залечивания разлома, поглощение энергии сейсмических волн в зоне разрыва уменьшилось на 10 %. Динамические измерения в нижней толще (рис. 2, б) показывают, что в целом она характеризуется более низким (в 3—5 раз меньшим, чем в верхней толще) поглощением. Его пластовые коэффициенты, определенные по методике [10], имеют разные значения по разные стороны сместителя. Следовательно, в нижней высокоскоростной толще сейсморазрыв выделяется как зона контакта пород с разными физическими

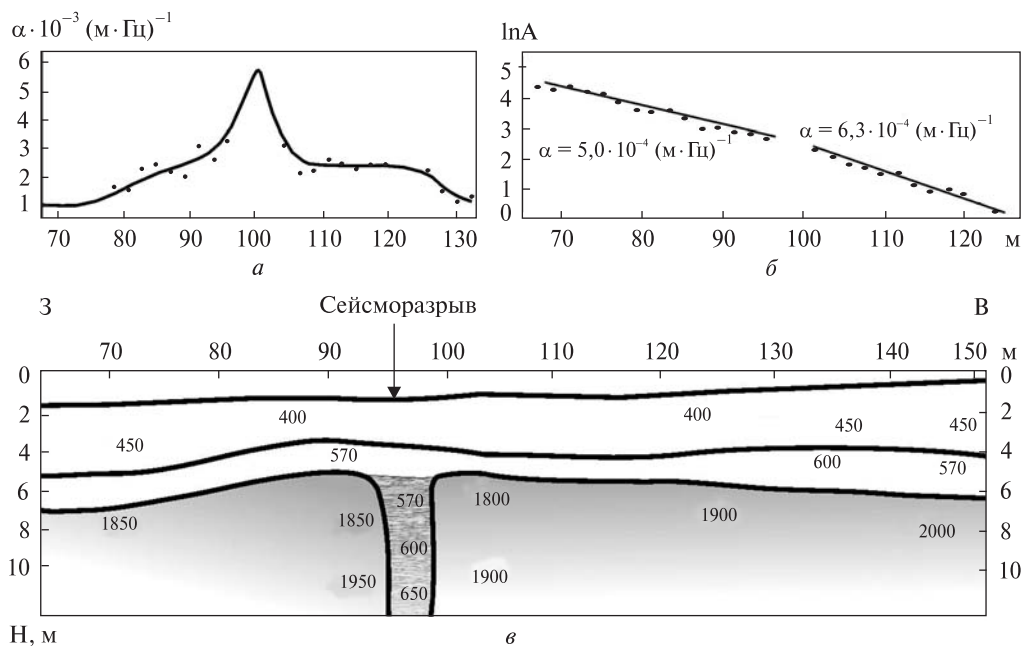


Рис. 3. Результаты МПВ по P -волнам на Верхнепильтунском разломе (профиль 2): a — коэффициенты поглощения в верхней, низкоскоростной толще, b — разностные амплитудные графики и пластовые коэффициенты поглощения в нижней, высокоскоростной толще, v — сейсмический разрез на P -волнах; цифрами обозначена скорость P -волн, м/с

свойствами, а общее уменьшение коэффициентов поглощения — косвенное подтверждение ее полного водонасыщения.

Профиль 2 отработан на участке, где Нефтегорский разрыв проявился как сдвиг с амплитудой около 2 м. Наблюдения с использованием продольных волн здесь удалось выполнить только в 1999 г. По кинематическим характеристикам на полученном разрезе (рис. 3, v) сейсморазрыв уверенно выделяется в отложениях нижней высокоскоростной ($V_p = 1800\text{—}2000$ м/с) толщи узкой зоной аномального понижения скорости до $570\text{—}650$ м/с (ПК 95—100). А по динамическим параметрам данное разрывное нарушение в верхнем слое выделяется аномально высоким поглощением до $5,7 \cdot 10^{-3} \text{ (м} \cdot \text{Гц)}^{-1}$ (рис. 3, a). Однако, в отличие от профиля 1, график кривой здесь имеет более симметричную форму, что можно объяснить разными типами подвижек на участках обоих профилей. Нижняя высокоскоростная толща, как и на первом профиле, характеризуется меньшим поглощением; также отмечаются его разные значения на крыльях разлома.

Эхаби-Паромайский разлом — один из главных разломов Северного Сахалина, входящий в так называемую Северосахалинскую сдвиговую зону, которая прослеживается в субмеридиональном направлении вдоль восточного побережья острова. Зона Эхаби-Паромайского разлома объединяет несколько крупных субмеридиональных разрывов сдвигового типа и сопровождается полосой интенсивной складчатости шириной порядка 5 км [17]. Судя по абсолютному возрасту приуроченных к разлому изверженных пород (29—75 млн лет), он был заложен не позднее позднего мела, а надвиги по нему происходили в конце позднего мела — начале палеогена и в неогене. Но наиболее интенсивные под-

вижки произошли в конце плиоцена, когда были созданы основные формы современного структурного плана региона [1, 13, 17]. По данным [4], последняя подвижка с магнитудой землетрясения 7,8 здесь имела место 2600 лет назад.

Сейсмические исследования Эхаби-Паромайского разлома выполняли в разное время на двух его участках: северном, Эхаби-Паромайском (рис. 1, район работ Б) и южном, Гаромайском (рис. 1, район работ В). В 1999 г. исследования проводили только с использованием продольных волн на северном участке по двум профилям, расположенным на расстоянии 1,5 км один от другого, на южном — по одному профилю. В 2011 г. вдоль этих профилей проведены работы на *P*-волнах.

Разрезы, построенные по *P*-волнам (рис. 4, 5), как и следовало ожидать, характеризуются довольно сложным строением и значительно отличаются от полученных на Нефтегорском полигоне. По скоростным параметрам каждый из них можно разделить на две толщи — верхнюю, состоящую из нескольких низкоскоростных слоев (V_p — от 350 до 700 м/с) и нижнюю, высокоскоростную (V_p — 1700—2000 м/с). В верхней толще сейсмические скорости характеризуются наибольшей дисперсией, хаотичным распределением по латерали и незначительным изменением с глубиной. Отсутствие определенной закономерности в распределении скоростных значений не позволяет хотя бы приблизительно установить местоположение разрывного нарушения. В общей геометрии сейсмических границ этой толщи также не отмечены характерные признаки, свидетельствующие о воздействии на них тектонических подвижек. Их морфология, скорее, предполагает активное вмешательство разных аккумулятивно-денудационных процессов. Вероятное положение сместителя разлома намечается только на южном профиле 3 (рис. 4), где в интервале пикетов 100—130 он выделяется пологим уступом в кровле нижней толщи высотой до 6 м. В то же время на северном профиле 4 (рис. 5) сместитель разлома однозначно не выделяется в рельефе, геометрии сейсмических горизонтов, включая кровлю нижней толщи. Скоростные параметры, полученные по всему разрезу, также не свидетельствуют о наличии здесь разрывных нарушений.

По динамическим характеристикам участок предполагаемого тектонического нарушения на каждом из профилей отмечается аномальным повышением коэффициентов поглощения в отложениях верхней толщи. Но проявляются эти аномалии по-разному, в зависимости от рельефа и геометрии сейсмических границ. На профиле 3 (рис. 4, в), где предполагаемая подвижка обнаруживается пологим уступом в рельефе и кровле высокоскоростной толщи (ПК 90—120), график поглощения (рис. 4, а) имеет трапецевидную форму, достигает ширины 20 м, а уровень его максимальных значений находится вблизи отметки $2 \cdot 10^{-3} (\text{м} \cdot \text{Гц})^{-1}$, что, примерно, в два раза превышает фоновые значения на удалении. На профиле 4 (рис. 5), где по кинематическим параметрам явных признаков тектонического нарушения не обнаружено, участок предполагаемой дислокации (установлено по дешифрированию аэрофотоснимков) отмечается резким всплеском значений коэффициентов поглощения для верхней толщи: до $3,1 \cdot 10^{-3} (\text{м} \cdot \text{Гц})^{-1}$, что значительно больше фоновых величин на западном (порядка $1,0 \cdot 10^{-3} (\text{м} \cdot \text{Гц})^{-1}$) и восточном ($1,5 \cdot 10^{-3} (\text{м} \cdot \text{Гц})^{-1}$) удалениях. Пластовые коэффициенты поглощения в нижней толще имеют характеристики, схожие с теми, что получены на разрезах Нефтегорского полигона. Наблюдается та же тенденция общего пони-

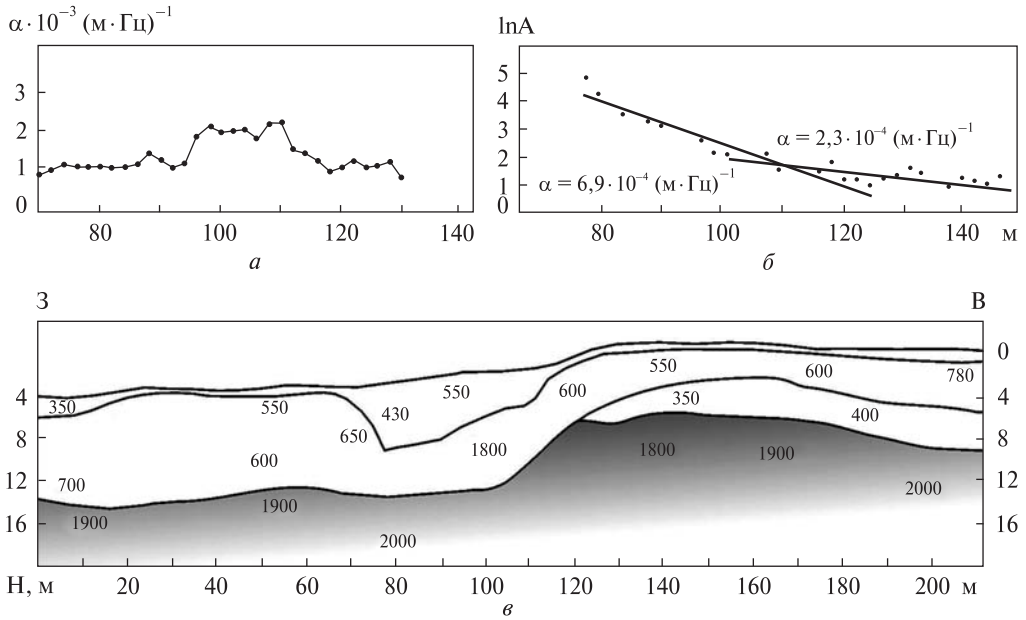


Рис. 4. Результаты МПВ с использованием P -волн на Эхаби-Паромайском разломе (профиль 3): обозначения см. на рис. 3

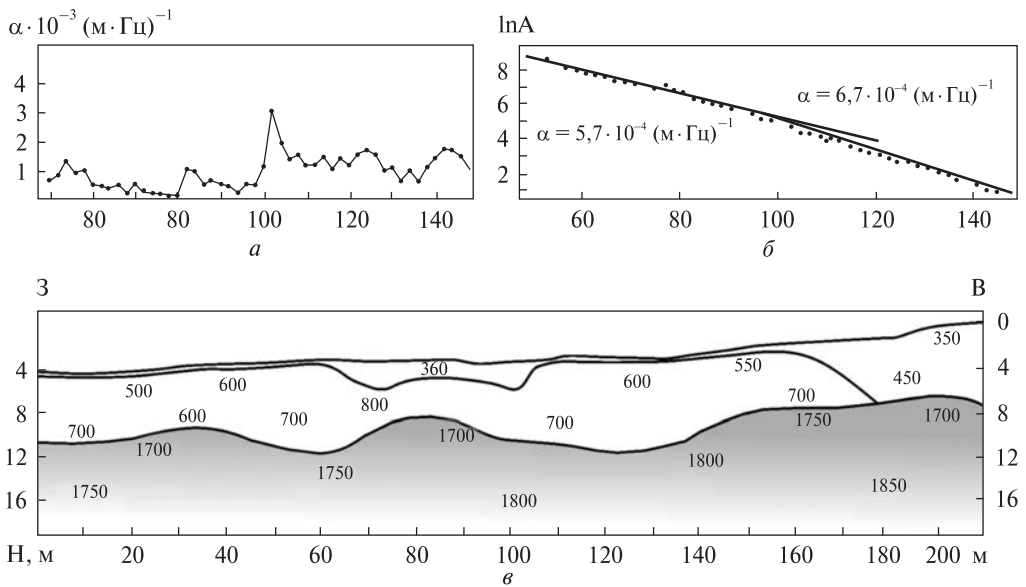


Рис. 5. Результаты МПВ по P -волнам на Эхаби-Паромайском разломе (профиль 4): обозначения см. на рис. 3

жения по сравнению с коэффициентами, установленными для верхней толщи, и отмечаются их разные значения на противоположных крыльях разлома.

В 2010 г. на Эхаби-Паромайском разломе в его северной и южной частях проведены сейсмические исследования с использованием поперечных волн. В северной части разлома получен разрез, представленный на рис. 6. По обе сто-

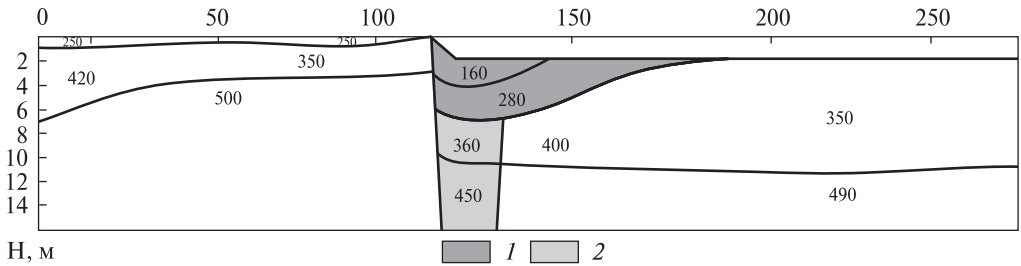


Рис. 6. Сейсмический разрез по S -волнам Эхаби-Паромайского разлома: 1 — голоценовые осадки, 2 — зона anomalно низких скоростей; цифрами обозначена скорость S -волн, м/с

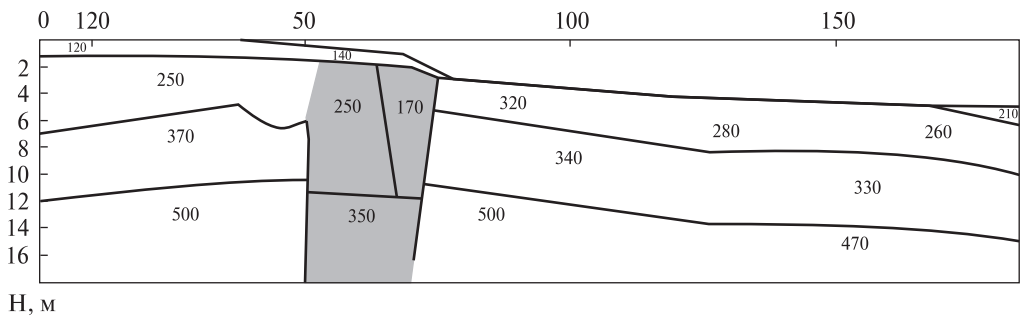


Рис. 7. Сейсмический разрез по S -волнам через Гаромайский разлом: серым цветом выделена зона anomalно низких скоростей; цифрами обозначена скорость S -волн, м/с

роны от разлома он имеет практически плоскострое строение: трехслойное на востоке и двухслойное на западе. В зоне разлома, а точнее в пределах его западного, опущенного крыла выделяется низкоскоростная, выклинивающаяся в западном направлении линза мощностью около 5 м. По-видимому, эта линза образовалась в результате заполнения рыхлыми голоценовыми осадками приразломной депрессии, сформированной за счет многократного смещения крыльев разлома суммарной амплитудой более 6 м. Поскольку она более чем в три раза превышает высоту уступа, то можно полагать, что данная депрессия образовалась в результате как минимум трех сейсмических событий. В отличие от Верхнепильтунского разлома зона anomalно низких скоростей поперечных волн в поднятом крыле отсутствует. Ее можно предполагать лишь в опущенном крыле разлома, а уменьшение скоростей в ней — в пределах точности измерений. Эти данные показывают, что скоростные параметры грунтов в разломных зонах Северного Сахалина практически восстанавливаются после сейсмических событий за 2500 лет.

Интересный разрез, существенно отличный от предыдущего, получили в южной Гаромайской ветви Эхаби-Паромайского разлома (рис. 7). В приподнятом крыле на пикетах 50—75 выделяем субвертикальную зону anomalно низких скоростей поперечных волн, в пределах которой наиболее низкие скорости установлены вблизи основания уступа до глубины 10 м. Разлом здесь располагается на пикете 75 и маркируется не только расположенной с запада от него зоной anomalно низких скоростей, но и противоположным наклоном преломляющих границ по разные стороны от него. Значительное понижение скоростей в ано-

мальной зоне, сопоставимое с таковым в Верхнепильгунском разломе, свидетельствует о том, что последнее сейсмическое событие, сопровождавшееся подвижками в Гаромайской ветви разлома, в отличие от Эхаби-Паромайской ветви, произошло не так давно — первые сотни лет назад.

Здесь уместно сделать замечание, что характер расслоенности на разрезах МПВ на продольных и поперечных волнах не всегда соответствует характеру литологической расслоенности. Например, на обнажении недалеко от сейсмического профиля геологи установили субвертикальное залегание слоев в поднятом крыле Гаромайского разлома [14]. На разрезе МПВ на обоих бортах разлома, за исключением разломной зоны шириной 25 м, наблюдается субгоризонтальное залегание скоростных слоев (слоев с одинаковой скоростью распространения сейсмических волн). Следовательно, для данной среды скорость в большей степени определяется не литологией отложений, а глубиной их залегания, характером уплотнения или разуплотнения. Поэтому судить о вертикальных амплитудах смещения в разломных зонах по разрезам МПВ можно только в том случае, когда будет показано соответствие скоростной и литологической расслоенности в исследуемой среде.

Гыргылань-Дагинский разлом согласно [8] представляет собой взбросо-надвиг, состоящий из основного и нескольких боковых ответвлений. Основной разрыв субмеридиональный, синусоидальноволнистый, протягивается параллельно Эхаби-Паромайскому взбросо-надвику от берега залива Байкал до устья р. Ныш. Он имеет шарнирно-клавишный характер. В северной и южной частях плоскость сместителя у него наклонена на запад и западные блоки взброшены или надвинуты на восточные, а в центральной части плоскость сместителя наклонена на восток и восточный блок надвинут на западный. Сейсмические исследования с использованием продольных и поперечных волн выполнены в центральной части Гыргылань-Дагинского разлома (см. рис. 1). Отработанный профиль МПВ длиной 600 м располагается в долине ручья Нилау. Он начинается на его восточном берегу в 30 м от русла, проходит по крутому правому борту с выходом на его бровку (рис. 8). Разрез по поперечным волнам сложен тремя слоями. Верхний слой характеризуется скоростью 130—200 м/с, на большей части профиля имеет мощность до 1 м и лишь в долинах ручьев — от 4 до 11 м. Второй сверху слой мощностью от 3 до 5 м распространен в средней и верхней частях правого борта ручья. Он имеет линзовидное строение. Линзы сложены двумя типами отложений, характеризующимися относительно низкими (230—270 м/с) и высокими (330—370 м/с) скоростями. Низкоскоростные линзы тяготеют к средней части склона, высокоскоростные — к верхней. В основании разреза залегает высокоскоростной слой с очень широким диапазоном — от 420 до 830 м/с.

В основании разреза по продольным волнам залегает высокоскоростная толща со скоростями 1500—2000 м/с. Судя по величине скоростей поперечных волн в ней $V_s = 400—600$ м/с, а также отношения $V_p/V_s > 3$, можно утверждать, что эта толща сложена водонасыщенными отложениями, а ее кровля соответствует уровню грунтовых вод. Залегающая выше толща на разрезе продольных волн имеет довольно сложное линзовидное строение. Скорости волн в линзах изменяются в широких пределах — от 250 до 1150 м/с. Значения скоростей определяются литологическим составом, плотностью грунтов и степенью их водонасыщения.

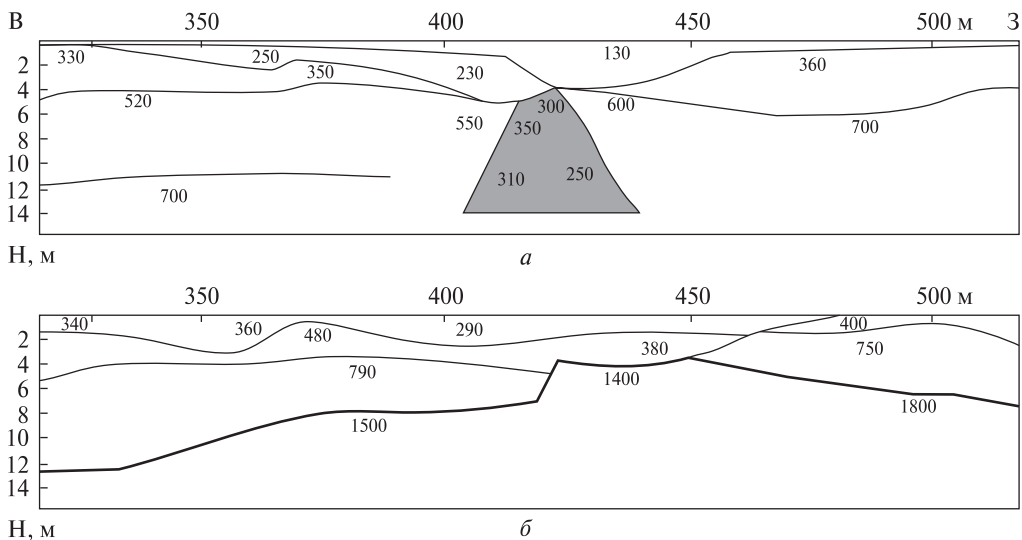


Рис. 8. Фрагменты сейсмических разрезов по S (а) и P (б) волнам через Гыргылань-Дагинский разлом: серым цветом выделена зона anomalously низких скоростей, цифрами обозначена скорость S -волн, м/с

На разрезе по поперечным волнам (рис. 8, а) на ПК 410—430 м в пределах высокоскоростной толщи обнаружена субвертикальная зона anomalously низких скоростей. Скорости в ней уменьшаются на 200—400 м/с. Выше нее располагается эрозионная промоина, компенсированная рыхлыми, по-видимому, голоценовыми отложениями. В центральной части разреза по продольным волнам (рис. 8, б) наблюдается повышение уровня грунтовых вод, которое сопровождается на ПК 420 м трехметровым уступом в кровле толщи полного водонасыщения. Таким образом, на ПК 410—430 м обнаруживаются основной (субвертикальная зона anomalously низких скоростей поперечных волн) и дополнительный (уступ в кровле толщи полного водонасыщения) сейсмические критерии активных разломов, что дает основание утверждать о его наличии здесь. Следует отметить, что представленные разрезы характеризуются многими сходными особенностями строения с разрезами на Нефтегорском сейсморазрыве. Главная особенность этих разрезов — наличие субвертикальной зоны anomalously низких скоростей поперечных волн вблизи разломов с примерно одинаковым до 50 % уменьшением скоростей в ней. Кроме того, на тех и других разрезах отмечается крутой уступ в кровле толщи водонасыщенных отложений. Характер и параметры этих особенностей свидетельствуют о недавней (десятки—первые сотни лет) сейсмической подвижке по Гыргылань-Дагинскому разлому.

Западносахалинский разлом — довольно крупный, региональный, но наименее изученный (см. вышеуказанный отчет) и [5, 7, 8, 10, 17]. Отсутствие данных о точном его положении потребовало заложения, по крайней мере, двух достаточно протяженных профилей длиной 900 и 300 м. По данным МПВ на P - и S -волнах на первом профиле сейсмических признаков активных разломов не обнаружено. Разрезы по второму профилю (рис. 9) свидетельствуют о наличии активного разлома с признаками недавних сейсмических подвижек. Так, на разрезе по поперечным волнам (рис. 9, а) на глубинах более 10 м наблюдается субвертикальная

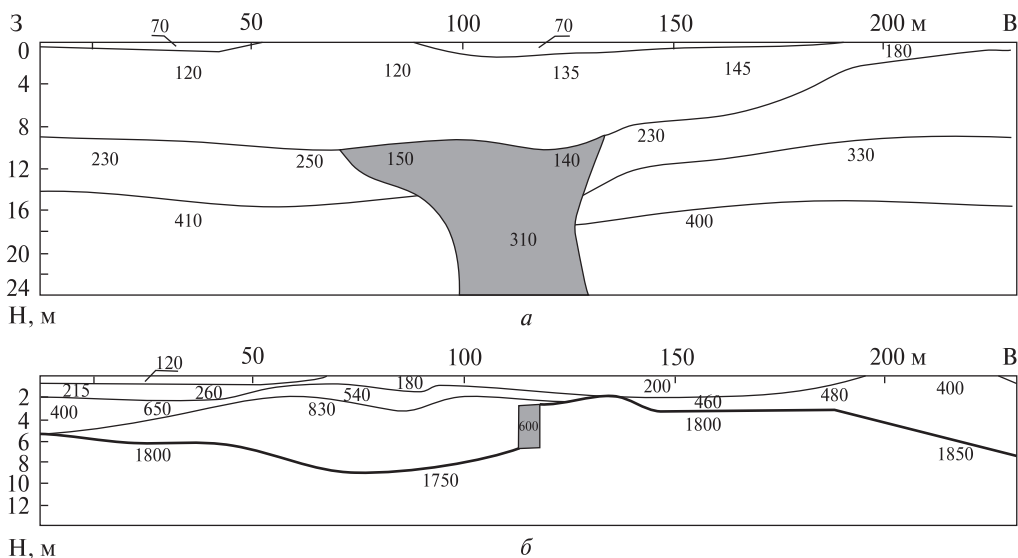


Рис. 9. Фрагменты сейсмических разрезов по S (а) и P (б) волнам через Западносахалинский разлом: серым цветом выделена зона anomalно низких скоростей, цифрами обозначена скорость S -волн, м/с

зона anomalно низких скоростей с примерно 30 % уменьшением значений. Выше залегает выклинивающаяся на восток толща рыхлых, переотложенных, по видимому, в голоцене отложений.

На разрезе по продольным волнам (рис. 9, б) в районе ПК 115 м и далее на восток наблюдается резкое повышение уровня грунтовых вод, которое отмечается трехметровым уступом в кровле толщи полного водонасыщения. Кроме того, в районе этого уступа предполагается узкая зона пониженной скорости продольных волн. Следовательно, на представленных разрезах фиксируются основной и дополнительный сейсмические признаки активных разломов. Характер и параметры зоны anomalно понижения скоростей и уровня грунтовых вод свидетельствуют о недавней (первые сотни лет) сейсмической подвижке в данной ветви Западносахалинского разлома.

Обсуждение результатов

Результаты малоуглубленного МПВ на активных разломах Северного Сахалина показывают, что они достаточно уверенно выделяются по сейсмическим характеристикам. При этом в зависимости от типа подвижки и времени ее образования эти характеристики проявляются по-разному. Так, Нефтегорский сейсморазрыв устойчиво обнаруживается по динамическим характеристикам продольных и кинематическим — поперечных волн, а нарушения, по которым последние подвижки происходили в сравнительно отдаленное время (северная часть Эхаби-Паромайского разлома), выделяются по тем же параметрам менее уверенно.

Как и следовало ожидать, наибольшее расхождение сейсмических параметров наблюдаем на разломах, образовавшихся в разное время. Например, разница коэффициентов поглощения в зонах Нефтегорского и Эхаби-Паромайского

разломов (временной интервал между проявлениями их активности 2000 лет) достигает $3,0 \cdot 10^{-3} (\text{м} \cdot \text{Гц})^{-1}$, тогда как на разных участках одного, например Нефтегорского разлома, это расхождение не превышает $0,7 \cdot 10^{-3} (\text{м} \cdot \text{Гц})^{-1}$. При этом форма графиков на разных участках этого сейсморазрыва изменяется в зависимости от типа подвижки. Так, на участке с вертикальной составляющей смещения кривая поглощения характеризуется асимметричной формой с более высокими значениями в приподнятом крыле, а в случае преимущественно горизонтальной подвижки аномалия поглощения приобретает практически симметричную форму. Если принять, что наибольшему разуплотнению подвергается активное крыло разлома, то при вертикальных подвижках, судя по величине поглощения, таковым следует считать приподнятое. По-видимому, этот факт заслуживает внимания, так как определение активного и пассивного крыла разлома всегда вызывает значительные затруднения. В целом же критериями определения активного разлома по динамическим характеристикам (вне зависимости от времени его образования) служат аномально высокие значения коэффициентов поглощения вблизи сместителя и резкое изменение пластовых коэффициентов поглощения в нижней высокоскоростной толще по разные стороны от сместителей.

На примере Нефтегорского сейсморазрыва показано, что при землетрясении с магнитудой 7,8 значения коэффициентов поглощения в его зоне за 5 лет уменьшились на 10 %. Эти данные, явно свидетельствующие о восстановлении физических свойств среды после воздействия сейсмического процесса, могут в дальнейшем послужить основой для расчетных оценок времени последней подвижки. По результатам настоящих исследований такую оценку можно выполнять весьма приближенно, и ее суть сводится к следующему. Поскольку аномалии поглощения в Северосахалинском разломе значительно превышают фоновые значения, то можно предположить, что восстановление физических свойств среды после подвижки с магнитудой 7,8 составляет не менее 2600 лет (время последней подвижки по Северосахалинскому разлому). Этот период времени, согласно [4, 12], сопоставим с периодом повторяемости сейсмособытий большинства активных разломов Северного Сахалина. Следовательно, если величина аномалии коэффициентов поглощения исследуемого нарушения в районе его предполагаемого сместителя превышает фоновые значения, то данная структура может быть отнесена к категории активного разлома. Время последней подвижки этого разлома можно приблизительно оценить по величине превышения коэффициентов поглощения в зоне разлома относительно фоновых значений.

Другая важная особенность активных разломов Северного Сахалина — наличие субвертикальной зоны пониженных скоростей поперечных волн, смещенной относительно сместителя разлома в сторону активного, висячего крыла. Это означает, что эти разломы — взбросо-сдвиговые, возникающие в условиях бокового сжатия аллохтонной континентальной коры [7, 10]. Ширина зоны пониженных скоростей обычно не превышает 30—50 м, а уменьшение в ней скоростей достигает 50—60 % при относительно недавней подвижке. Если же последняя подвижка по разлому произошла давно (порядка 2500 лет назад), то аномальная зона выделяется неуверенно, поскольку уменьшение скорости в ней не превышает 10 %. Эти данные свидетельствуют о восстановлении физических свойств среды после воздействия сейсмического процесса и также, как и коэффициенты поглощения, могут послужить основой для расчетных оценок времени

последней тектонической подвижки (залечивание разломов). Такую приближенную оценку уже можно сделать для разломов Севера Сахалина и их отдельных ветвей, где выполнены сейсмические исследования. Ее можно получить по величине уменьшения скоростей в аномальных зонах относительно фоновых значений на тех же глубинах.

Совершенствование методики определения скоростей поперечных волн в аномальных зонах позволит уверенно разделять крупные и довольно протяженные разломы на отдельные сегменты, подвижки в которых происходили в разное время. Такое разделение позволит оценить длину сейсморазрывов во время отдельных сейсмических событий, сейсмический потенциал каждого сегмента разлома [15] и максимальную магнитуду землетрясения. Тем самым должны существенно уточняться параметры зон возможных очагов землетрясений, что обеспечит более точную оценку сейсмической опасности территории.

По кинематическим характеристикам продольных волн обнаружить единые критерии выделения активных разломов оказалось довольно сложной задачей, так как даже на одном разломе морфология преломляющих границ и скорости сейсмических волн значительно изменяются по его простиранию. Это находит объяснение в том, что скорости распространения продольных волн в значительной степени определяются содержанием в грунтах воды. На многих сейсмических разрезах по продольным волнам отмечается следующая особенность в морфологии кровли толщи полного водонасыщения: так, в висячем крыле разлома происходит резкий, на 3—5 м, подъем уровня грунтовых вод, который с удалением от сместителя разлома плавно понижается (рис. 2, *в*; 4; 8, *б*; 9, *б*). Такое поведение уровня грунтовых вод наблюдается на тех участках активных разломов, где устанавливается взбросовый тип подвижки. Поскольку данная особенность разрезов *P*-волн установлена не на всех сейсмопрофилях, то ее следует рассматривать в качестве дополнительного критерия для выделения активных разломов и достаточного при определении взбросового типа подвижки и соответственно активного крыла разлома.

Выводы

По данным МПВ на активных разломах Северного Сахалина выявлены основные и дополнительные критерии активных разломов. К основным критериям относятся те, которые установлены на всех сейсмопрофилях через активные разломы; к дополнительным — те, которые выполнялись на многих, но не на всех сейсмических разрезах. Основные сейсмические критерии выделения активных разломов: *субвертикальная зона аномально низких скоростей поперечных волн*, располагающаяся преимущественно в пределах активного крыла вблизи сместителя разлома; *аномальные значения коэффициентов поглощения продольных волн в разломной зоне*. Дополнительным признаком активных разломов следует считать *резкий подъем уровня грунтовых вод в его висячем крыле*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексейчик С.Н., Гальцев-Безюк С.Д., Гнедин К.И. и др. Геологическое строение и газонефтеносность северного Сахалина. Л.: Гостоптехиздат, 1959. 233 с.
2. Аргентов В.В., Жигулев В.В., Патрикеев В.Н., Соловьев В.Н. Исследование активных разломов Сахалина сейсмическими методами. Строение земной коры и перспективы нефте-

- газоносности в регионах северо-западной окраины Тихого океана. Ю.-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2000. Т. 2. С. 75—103.
3. Арефьев С.С., Дорбат К. Нефтегорское землетрясение 1995 г.: томография очаговой зоны. *Физика Земли*. 2001. № 2. С. 56—68.
 4. Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У. и др. Активные разломы Северо-Восточного Сахалина. *Геотектоника*. 2002. № 3. С. 66—86.
 5. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. Неотектоника и активные разрывы Сахалина. М.: Наука, 2007. 186 с.
 6. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2014. 252 с.
 7. Ломтев В.Л., Жердева О.А. К сейсмотектонике Сахалина: новые подходы. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2015. № 3. С. 56—68.
 8. Мельников О.А. Структура и геодинамика Хоккайдо-Сахалинской складчатой области. М.: Наука, 1987. 96 с.
 9. Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. М.: Наука, 2004. 779 с.
 10. Паровышний В.А. Надвиговые системы в прогибах Чукотки и Сахалина: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.01; 25.00.10. Ю.-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2005. 23 с.
 11. Патрикеев В.Н. Возможности определения поглощения упругих волн при малоглубинных сейсмических исследованиях. Динамика очаговых зон и прогнозирования сильных землетрясений Северо-запада Тихого океана. Ю.-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. Т. 2. С. 58—66.
 12. Рогожин Е.А. Тектоника очаговой зоны Нефтегорского землетрясения 27 (28) мая 1995 г. на Сахалине. *Геотектоника*. 1996. № 2. С. 45—53.
 13. Рождественский В.С. Тектоническое развитие острова Сахалин. *Тихоокеанская геология*. 1987. № 3. С. 42—51.
 14. Стрельцов М.И. Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 года на Сахалине. М.: Янус-К, 2005. 180 с.
 15. Трифонов В.Г., Кожурин А.И. Проблемы изучения активных разломов. *Геотектоника*. 2010. № 6. С. 79—98.
 16. Харахинов В.В. Нефтегазовая геология Сахалинского региона. М.: Научный мир, 2010. 276 с.
 17. Харахинов В.В., Гальцев-Безюк С.Д., Терешенков А.А. Разломы Сахалина. *Тихоокеанская геология*. 1984. № 2. С. 77—86.
 18. Cervený V., Prcenk I. Seismic ray package, FORTRAN program. Prague. 1982.

Статья поступила 16.04.2016

В.М. Патрикеев, В.Л. Ломтев

РОЗЛОМИ ПІВНІЧНОГО САХАЛІНУ: ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ ТА СЕЙСМІЧНА НЕБЕЗПЕКА

За даними малоглибинної сейсміки методом заломлених (поздовжніх і поперечних) хвиль досліджено будову декількох розломів Північного Сахаліну. Намічено ознаки їхньої тектонічної активності і пов'язані з ними сильні землетруси, наприклад, Нефтегорська катастрофічна подія 27(28).05.1995 р.

Ключові слова: Північний Сахалін, метод заломлених хвиль, швидкості сейсмічних хвиль, коефіцієнт поглинання, активний розлом, землетрус.

V.M. Patrikeev, V.L. Lomtev

NORTH SAKHALIN FAULTS: STRUCTURE PECULIARITIES AND SEISMIC HAZARD

The structure of some North Sakhalin faults is studied by refraction (P-S waves) method. Signs of their tectonic activity and strong earthquakes, connected with them, for example, Neftegorsk catastrophic event 27(28).05.1995, are outlined.

Key words: North Sakhalin, seismic refraction method, seismic wave velocities, absorption coefficient, active faults, earthquake.