

ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 550.834.8 (571.6)

СТРОЕНИЕ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СРЕДНЕАМУРСКОГО ОСАДОЧНОГО БАСЕЙНА (Приамурье) ПО ДАННЫМ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Пупатенко В. В., Рябинкин К. С.

*ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск
E-mail: pvv2.dv@gmail.com*

Представлены первые результаты исследования глубинного строения земной коры юго-западной части Среднеамурского осадочного бассейна с помощью метода микросейсмического зондирования. По данным измерений в 70 точках построены разрезы относительных скоростей поперечных волн по двум вкрест пересекающимся профилям суммарной длиной 90 км. Профили пересекают зону разлома Итунь-Илань, зоны других крупных региональных разломов, а также Башмакский, Преображенковский, Самаро-Дитурский грабены. Разрезы на глубине 4–10 км не содержат скоростных аномалий. Это может объяснить более низкую сейсмичность изученной зоны по сравнению с соседними участками разломной системы Тан-Лу.

Ключевые слова: сейсмическая томография, метод микросейсмического зондирования, Среднеамурский осадочный бассейн, разломные зоны, Итунь-Илань.

DOI: 10.34078/1814-0998-2022-4-3-9

ВВЕДЕНИЕ

Обоснованная оценка сейсмической опасности территории опирается, в первую очередь, на знание разломной тектоники. Именно сведения о глубинном строении крупных разломов позволяют оценить геодинамическую активность тех или иных участков разломных зон. В случае наблюдения феномена сейсмического затишья данные о глубинном строении соответствующих разломов могут помочь объяснить этот феномен, понять, не является ли это затишье следствием общей невысокой геодинамической активности территории. Это особенно важно во внутриплитных областях, в которых период повторяемости сильных землетрясений может достигать многих тысяч лет (Уломов и др., 2016).

Важным источником данных о глубинном строении разломных зон являются геофизические исследования, в том числе сейсмическими методами. Одни из современных перспективных методов сейсморазведки – пассивные. В этих методах зондирующим сигналом служат микросейсм (обычно штормовые), а измеряемыми параметрами – их фазово-частотные и амплитудно-частотные характеристики.

Метод микросейсмического зондирования (МСЗ) – перспективный и в некоторых случаях единственный возможный метод пассивной

сейсморазведки – относится к амплитудным методам. Он все еще используется не так часто, сфера его применения постепенно расширяется. До недавнего времени этим методом чаще всего изучали глубинное строение вулканов (Рогожин и др., 2016; Кугаенко и др., 2018).

МСЗ уже применялся при изучении строения разломных зон. В работе (Овсученко и др., 2019) на примере Керченско-Таманского региона продемонстрировано, как разломные зоны могут быть выделены методом МСЗ. В работе (Пупатенко и др., 2021) исследования участка северного фланга Центрального Сихотэ-Алинского разлома показали, что разломная зона, начиная с глубины 2 км, сейсмически монолитна и не насыщена глубинными флюидами. Полученные данные позволили утверждать, что этот разлом в районе исследований в настоящее время непродуктивен и, вероятно, является «залеченным».

Объект исследования в настоящей работе – юго-западный фрагмент Среднеамурского осадочного бассейна (СОБ) в пределах Ленинского р-на Еврейской автономной области (ЕАО) (рис. 1). Эту структуру пересекает ряд региональных разломов, в том числе Итунь-Илань (другие названия – Илань-Итун, Ишу-Харпийский, Курский) – один из крупнейших разломов Приамурья, протяженностью 680 км. Разлом входит в систему Тан-Лу и по основному кинематическому типу является левым сдвигом (Забродин и др.,

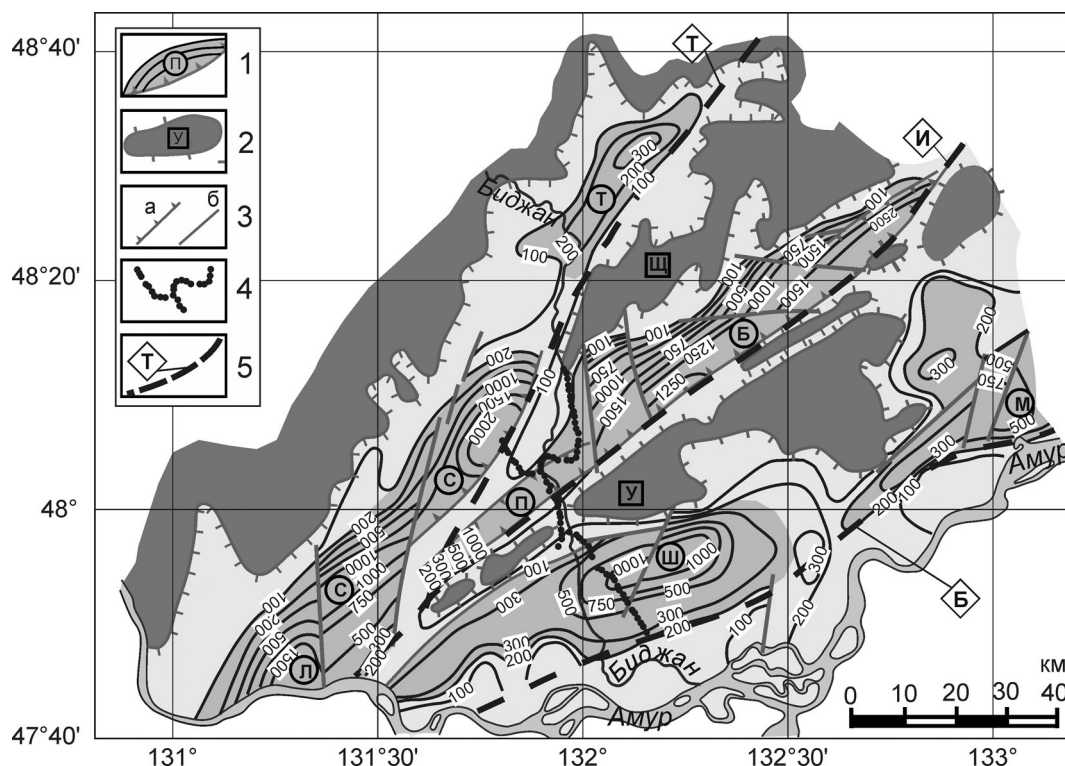


Рис. 1. Структурная схема западной окраины Среднеамурского осадочного бассейна (по данным: Среднеамурский..., 2009; Забродин и др., 2015; Уткин, 2013). Изолиниями показана мощность кайнозойского осадочного чехла по гравиметрическим данным. 1 – грабены: Л – Лобэйский, С – Самаро-Дитурский, Т – Тайменский, П – Преображенковский, Б – Бирофельдский, Ш – Башмакский, М – Мориловецкий; 2 – поднятия: У – Ульдуро-Чуркинское, Щ – Щуки-Поктойское; 3 – разломы-сбросы с амплитудой: а – менее 500 м, б – более 500 м; 4 – точки микросейсмических зондирований; 5 – оси основных разломов: И – Итунь-Илань, Т – Тайменский, Б – Башмакский

Fig. 1. Structural scheme for the western margin of the Middle Amur sedimentary basin (Middle Amur Sedimentary Basin..., 2009; Zabrodin et al., 2015; Utkin, 2013). Isolines show the thickness of the Cenozoic sedimentary cover according to gravimetric data. 1 – grabens: L – Lobey, S – Samaro-Ditursky, T – Taimensky, P – Preobrazhenovsky, B – Birofeldsky, Sh – Bashmaksky, M – Morilovetsky; 2 – uplifts: U – Ulduro-Churkinskoye, S – Shchuki-Poktoyskoye; 3 – faults with an amplitude: a – under 500 m, б – over 500 m; 4 – points of microseismic soundings; 5 – axes of the main faults: I – Itun-Yilan, T – Taimensky, B – Bashmaksky

2015). Некоторые исследователи даже считают Итунь-Илань восточной границей Амурской плиты (Ашурков и др., 2016; Li et al, 2020). В районе исследования этот разлом проходит по юго-западным бортам Преображенковского и Бирофельдского грабенов. Некоторые исследователи (Уткин, 2013) указывают названия других разломов, прослеживаемых по юго-западным бортам одноименных грабенов: Тайменский, Башмакский. В работе (Забродин и др., 2015), напротив, Тайменский разлом обозначен как ветвь разлома Итунь-Илань.

Итунь-Илань относится к наиболее сейсмически активной северо-западной части системы разломов Тан-Лу, с ним связан ряд наиболее сильных землетрясений на территории Приамурья (Сафонов, 2018), хотя распределение эпицентров землетрясений вдоль разлома крайне неравномерное. В пределах изучаемого фрагмента СОБ современная сейсмическая активность

разломов, включая Итунь-Илань, значительно ниже, чем на других участках системы Тан-Лу к юго-западу и северо-востоку.

Основная цель работы – изучение методом МСЗ глубинного строения разломных зон юго-западного фрагмента СОБ. Изучение того, как отображаются зоны разломов в поле скоростей поперечных сейсмических волн, может помочь пониманию причин различий в уровне сейсмичности разных участков разломов системы Тан-Лу и в дальнейшем адекватной оценке сейсмического потенциала этой разломной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод МСЗ – пассивный сейсмический метод, в нем изучаются вариации спектрально-амплитудных характеристик низкочастотных микросейсмических колебаний (Горбатиков и др., 2008; Горбатиков, Цуканов, 2011; Жостков и др., 2015). Метод основан на существовании

зависимости между амплитудой поверхностных волн Рэлея и скоростью распространения поперечных волн в среде. Каждой длине волны Рэлея соответствует некоторая глубина, на которой влияние скоростных неоднородностей на амплитуду волны максимально. Предполагается, что, во-первых, микросейсмическое поле на периодах 1–30 с создается многочисленными и удаленными источниками, а во-вторых, основной вклад в вертикальные колебания вносит фундаментальная мода волн Рэлея. Эти предположения позволяют считать микросейсмическое поле однородным на масштабах до нескольких десятков километров.

Метод МСЗ появился и развивался как эмпирический. Впоследствии его справедливость была подтверждена сначала результатами численного моделирования (Горбатилов, Цуканов, 2011; Цуканов, Горбатилов, 2015), а после и теоретически (Яновская, 2017). Появление результатов моделирования и развитие теоретической базы принципиально не изменили первоначальные эмпирические предпосылки метода МСЗ, а также связанные с ними технологии полевых измерений и обработки результатов. Более того, было показано, что качественно верный результат получается даже в случае преобладания в микросейсмическом поле объемных волн (Цуканов, Горбатилов, 2020).

Метод МСЗ позволяет получить глубинные разрезы относительных значений скоростей поперечных волн, т. е. отклонений скоростей от некоторой средней региональной модели. Они могут использоваться для качественной геологической интерпретации и наилучшим образом подходят для выделения субвертикальных неоднородностей. Получаемые разрезы характеризуются горизонтальным разрешением в 0.25–0.3 длины волны (Горбатилов, Цуканов, 2011; Цуканов, Горбатилов, 2015; Яновская, 2017), что в несколько раз превышает возможности фазовых методов (Горбатилов, Цуканов, 2011; Жостков и др., 2017). Изолированные неоднородности остаются различимы, даже если они имеют размер менее 0.1 от длины волны (Горбатилов, Цуканов, 2011).

Полевые работы проводились в октябре 2019 г. и в июле 2020 г. по двум вкрест пересекающимся профилям в окрестностях населенных пунктов Башмак, Биджан, Преображеновка, Новотроицкое. Использовались три комплекта сейсмического оборудования: широкополосные сейсмометры REFTEK 151-120 и регистраторы REFTEK 130-01. Измерения продолжительностью от полутора до трех часов производились последовательно на 70 точках со средним шагом 1 км.

Для учета изменений микросейсмического поля во времени использовались непрерывные записи с базовой станции, которая располагалась

в непосредственной близости от места измерений. Обработка измерений сводилась к расчету спектров, их корректировке на записи, полученные базовой станцией.

Спектры записей рассчитывались с использованием алгоритма, похожего на алгоритм Уэлча. Вся сейсмическая запись разбивалась на фрагменты длиной 2 мин., перекрывающиеся на 75 %. Рассчитанные для каждого фрагмента зависимости спектральной плотности мощности (СПМ) от частоты усреднялись скользящим средним шириной, обеспечивающей получение пяти точек на октаву. После усреднения проводилось деление СПМ, полученной на точке, на СПМ, полученной за тот же промежуток времени на базовой станции. Результат (частное от деления или, иначе, разность логарифмов) записывался в выборку, формируемую по всем фрагментам, полученным на этой точке. Окончательный результат – разность логарифмов СПМ – определялся как медианное значение в этой выборке. Именно эти значения, которые являются относительными интенсивностями микросейсмического шума, наносятся на разрез и качественно интерпретируются в методе МСЗ как вариации скоростей поперечных волн.

Пересчет значений спектральной частоты в значения глубины выполнен стандартным образом, использовался усредненный скоростной разрез, рассчитанный по результатам сейсморазведочных работ, проводимых в регионе в 2011 г. (заказчик – ООО «Совекс Трейд», подрядчик – ООО «Сигма Нефтегаз Сервис»).

Описанный алгоритм обработки данных был реализован в виде набора скриптов, написанных в программной среде Matlab.

Необходимо отметить, что получаемые разрезы построены на неравномерной сетке по обеим осям. Неравномерность сетки по длине профиля связана с тем, что каждая ячейка построена вокруг точки, на которой проводились измерения, а расстояния между точками были непостоянны и зависели от расположения благоприятных мест наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены полученные обработкой микросейсмических зондирований сейсмические разрезы. Профиль первого разреза (рис. 2, а) идет практически линейно с северо-запада на юго-восток. Профиль второго разреза (рис. 2, б) расположен преимущественно субмеридионально, но с изгибом в центральной части. Оба профиля имеют общую часть протяженностью около 12 км в районе пересечения с разломом Итунь-Илань. Это пересечение находится на 15–16 км первого профиля и на 30–31 км второго профиля, если считать с севера на юг

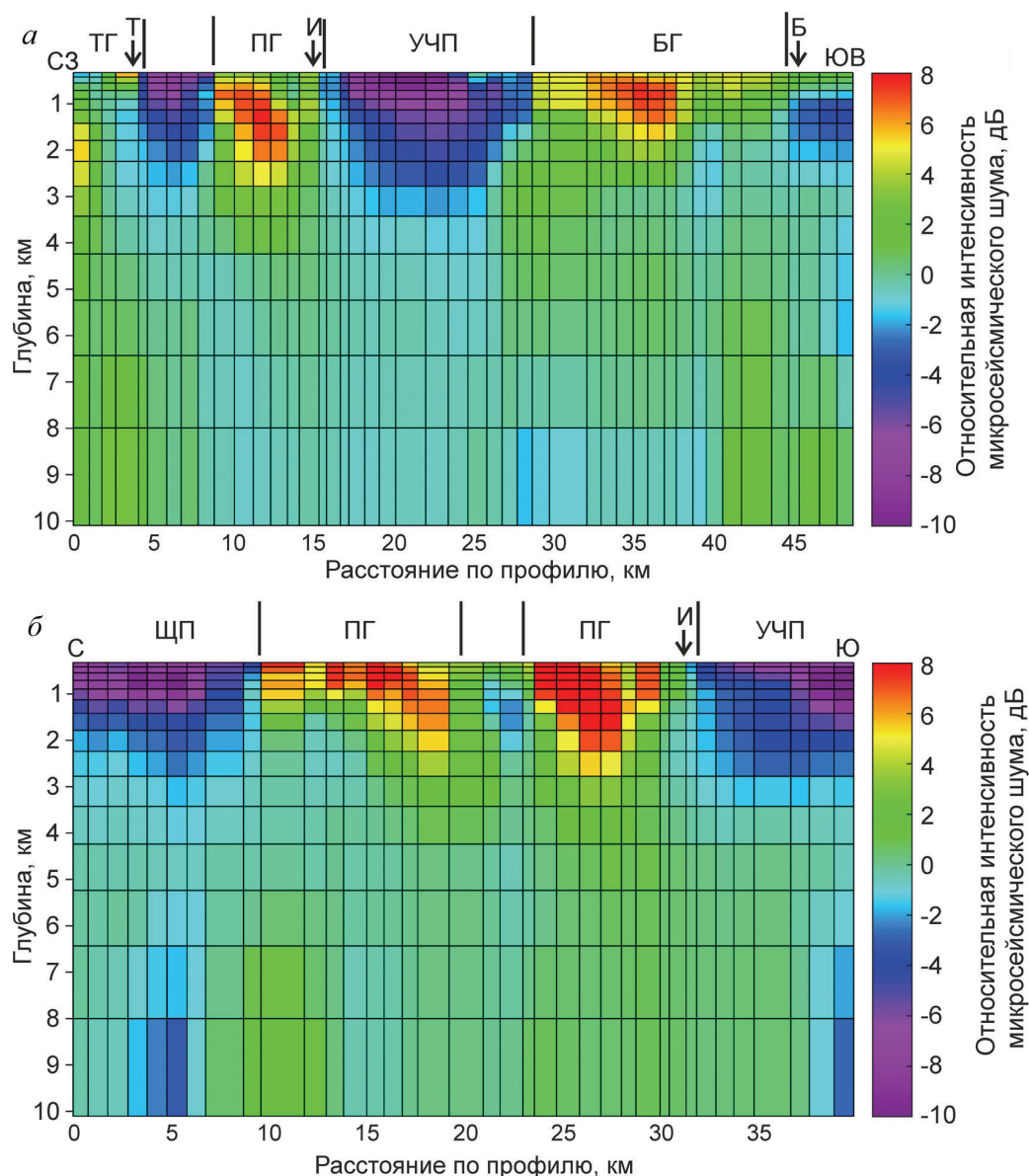


Рис. 2. Разрезы (а – СЗ–ЮВ; б – С–Ю) относительных скоростей поперечных волн. Грабены: БГ – Башмакский, СДГ – Самаро-Дитурский, ПГ – Преображенковский; поднятия: УЧП – Ульдура-Чуркинское, ЩП – Щуки-Поктойское; разломы: И – Итунь-Илань, Т – Тайменский, Б – Башмакский

Fig. 2. Sections (a – NW–SE; б – N–S) of transverse wave relative velocities. Grabens: БГ – Bashmaksky, СДГ – Samaro-Ditursky, ПГ – Preobrazhenovskiy; uplifts: УЧП – Uldura-Churkinskoe, ЩП – Shchuki-Poktoiskoe; faults: И – Itun-Yilan, Т – Taimensky, Б – Bashmaksky

(Забродин и др., 2015). Приведенные на разрезах значения представляют собой относительную интенсивность микросейсмического шума, выраженную в дБ, разница в 6 дБ соответствует приблизительно двукратному изменению интенсивности шума. Меньшие, в том числе отрицательные значения, обозначенные синим и фиолетовым цветами, соответствуют зонам повышенных скоростей поперечных волн, более высокие значения, обозначенные желтым и красным цветами – зонам пониженных скоростей. Из-за особенностей метода и ограничения частотного диапазона рассматриваемых колебаний отсутствует информация о самой

верхней части разреза, наблюдения начинаются на глубине порядка 400 м.

На первом разрезе, если рассматривать его с юго-востока на северо-запад, можно выделить следующие элементы. С 29 по 45 км на глубинах до 2 км располагается зона пониженных скоростей, соответствующая Башмакскому грабену. Ее южная граница совпадает с положением Башмакского разлома, который на разрезе отображается как контраст скоростей. Также локальное понижение скоростей поперечных волн наблюдается около 39 км, где расположен выделяемый по геофизическим данным разлом (Среднеамурский..., 2009). Севернее, с 16 по 29 км выделяет-

ся зона повышенных скоростей, ассоциируемая с Ульдура-Чуркинским поднятием, переходящая в расположенную с 9 по 15 км следующую зону пониженных скоростей, соответствующую Преображенскому грабену. Расположенному между ними разлому Итунь-Илань соответствует на разрезе резкий контраст скоростей поперечных волн, который прослеживается, как и Преображенский грабен, до глубины порядка 3 км. Первые 4 км профиля заходят в Самаро-Дитурский грабен, на разрезе это сопровождается понижением скорости, глубина аномалии повышается и достигает 3 км. Юго-восточный борт грабена совпадает с положением Тайменского разлома, который также маркируется резким перепадом скоростей поперечных волн.

Второй разрез на юге с 32 до 40 км представлен зоной повышенных скоростей, соответствующей Ульдура-Чуркинскому поднятию. Как и на первом профиле, севернее располагается низкоскоростная аномалия, соответствующая Преображенскому грабену, отделенная разломом Итунь-Илань. На 24 км профили расходятся. Второй профиль изгибается к востоку, выходит в районе 23–24 км из Преображенского грабена и заходит обратно около 20 км. Низкоскоростная аномалия, соответствующая Преображенскому грабену, прослеживается к северу еще на 10 км. Начиная с 9–10 км профиль входит в Щуки-Поктойское поднятие, которое на разрезе отображается как зона высоких скоростей.

Разрезы на глубине 4–10 км не содержат скоростных аномалий, достаточно значительных, чтобы их можно было надежно зарегистрировать с имеющейся точностью измерений.

Необходимо заметить, что приведенные на разрезах относительные скорости поперечных волн нормировались на среднее по профилю значение. По этой причине общие для двух профилей участки выглядят не идентично, но принципиально схожим образом.

Погрешность значений, приведенных на разрезах, оценивалась по внутренней сходимости результатов на каждой точке. Это было нужно не только для проверки необходимости отбраковки измерений, но и для того, чтобы оценить уровень значимости наблюдаемых аномалий. Среднеквадратические ошибки (СКО) значений на разрезе составляют 0.3–1 дБ для узкой трехкилометровой зоны вокруг базовой станции и 1.1–2.5 дБ со средним 1.4 дБ – для точек на большем удалении. Это означает, что абсолютные величины аномалий в верхней части разрезов превышают СКО их определения в 5–9 раз и являются достоверными.

На известных структурных схемах изучаемые разломы представляют собой борта грабенов. Полученные в работе результаты это подтверждают,

но также показывают, что разломы прослеживаются на глубину не более 2–3 км, т. е. не глубже подошвы кайнозойского осадочного чехла. У низкоскоростных аномалий, ассоциируемых с грабенами, наблюдаются преимущественно субвертикальные границы. Исключение составляет юго-восточная зона, соответствующая юго-восточному борту Башмаковского грабена, мощность кайнозойского осадочного чехла которого меняется сильнее. Соответственно, как минимум, два исследованных разлома (Итунь-Илань, Тайменский) имеют крутое или даже близкое к вертикальному падение.

Эти выводы, как и результаты исследования в целом соответствуют результатам интерпретации аудиомагнитотеллурических зондирований (Каплун, 2018).

Полученные особенности отображения участков разломных зон в поле скоростей поперечных волн показывают возможные причины низкой современной сейсмической активности изученного района СОБ, в сравнении с другими участками системы разломов Тан-Лу. Сюда относятся и малая глубина заложения разломов, и отсутствие ярко выраженных обособленных низкоскоростных аномалий в зонах разломов.

ВЫВОДЫ

В работе приведены результаты исследования строения участков крупных региональных разломов, не проявляющих значительной сейсмической активности.

Для СОБ такие данные опубликованы впервые и показывают то, как разлом Итунь-Илань выглядит в поле скоростей поперечных волн.

Все пересеченные в СОБ разломы не прослеживаются на больших глубинах и представляют собой лишь границы грабенов. Это может быть причиной низкой современной сейсмической активности изученного района СОБ.

Результаты исследований также показывают, что метод МСЗ может быть успешно использован для изучения осадочных бассейнов, поскольку позволяет определять положение и субвертикальные границы грабенов с точностью порядка 1–2 км.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН. Полевые работы методом микросейсмического зондирования были выполнены при финансовой поддержке РНФ (проект 16-17-00015). Авторы признательны Е. П. Развозжаевой за ценные советы, Е. С. Ступаковой за помощь в оформлении рисунков.

ЛИТЕРАТУРА

Аишурков С. В., Саньков В. А., Серов М. А., Лукьянов П. Ю., Гриб Н. Н., Бордонский Г. С., Дембелов М. Г. Современные деформации Амурской плиты и

окружающих структур по данным GPS измерений // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 12. С. 2059–2070. DOI: 10.15372/GiG20161108

Горбатилов А. В., Степанова М. Ю., Кораблев Г. Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66–84.

Горбатилов А. В., Цуканов А. А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–112. DOI: 10.1134/S0002333711040077

Жостков Р. А., Преснов Д. А., Собисевич А. Л. Развитие метода микросейсмического зондирования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. 26. С. 11–19.

Жостков Р. А., Преснов Д. А., Шуруп А. С., Собисевич А. Л. Сравнение микросейсмического зондирования и томографического подхода при изучении глубинного строения Земли // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2017. Т. 81, № 1. С. 72–75. DOI: 10.7868/S036767651701029X

Забродин В. Ю., Рыбас О. В., Гильманова Г. З. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России. Владивосток : Дальнаука, 2015. 132 с.

Каплун В. Б. Строение северо-западного борта Среднеамурского осадочного бассейна по данным аудиоманнитотеллурических зондирований (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37, № 2. С. 76–86. DOI: 10.30911/0207-4028-2018-37-2-76-86

Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А., Горбатилов А. В., Степанова М. Ю. Особенности глубинного строения зоны трещинных Толбачинских извержений по комплексу геолого-геофизических данных // Физика Земли. 2018. № 3. С. 60–83. DOI: 10.7868/S0002333718030055

Овсяченко А. Н., Горбатилов А. В., Рогожин Е. А., Андреева Н. В., Степанова М. Ю., Ларьков А. С., Сысолин А. И. Микросейсмическое зондирование и активные разломы Керченско-Таманского региона // Физика Земли. 2020. № 6. С. 84–95. DOI: 10.31857/S0002-33372019684-95

Пупатенко В. В., Рябинкин К. С., Бронников А. К., Верхотуров А. Л. Опыт комплексирования микросейсмического и магнитотеллурического зондирования на участке северного фланга Центрального Сихотэ-

Алинского разлома // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021, № 2. Вып. 50. С. 84–94. DOI: 10.31431/1816-5524-2021-2-50-84-94

Рогожин Е. А., Горбатилов А. В., Харазова Ю. В., Степанова М. Ю., Николаев А. В. Особенности глубинного строения и геологической активности горы Эльбрус и участка ущелья Эльбрус–Тырныауз по комплексу геолого-геофизических данных // Доклады РАН. 2016. Т. 471, № 3. С. 350–353. DOI: 10.7868/S0869565216330203

Сафонов Д. А. Сейсмическая активность Приамурья и Приморья // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2, № 2. С. 104–115. DOI: 10.30730/2541-8912.2018.2.2.104-115

Среднеамурский осадочный бассейн: геологическое строение, геодинамика, топливно-энергетические ресурсы. – Владивосток : ДВО РАН, 2009. 424 с. (серия «Осадочные бассейны Востока России»; т. 3)

Уламов В. И., Богданов М. И., Трифонов В. Г., Гусев А. А., Гусев Г. С., Акактова К. Н., Антикаев Ф. Ф., Данилова Т. И., Кожурин А. И., Медведева Н. С., Никонов А. А., Перетокин С. А., Пустовитенко Б. Г., Стром А. Л. Пояснительная записка к комплексу карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–122.

Уткин В. П. Сдвиговой структурный парагенезис и его роль в континентальном рифтогенезе восточной окраины Азии // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32, № 3. С. 21–43.

Цуканов А. А., Горбатилов А. В. Исследование влияния вклада объемных волн на результат применения метода микросейсмического зондирования // Акустический журнал. 2020. Т. 66, № 2. С. 198–205. DOI: 10.31857/S0320791920010116

Цуканов А. А., Горбатилов А. В. Метод микросейсмического зондирования: влияние аномальных значений коэффициента Пуассона и оценка величины нелинейных искажений // Физика Земли. 2015. № 4. С. 94–102. DOI: 10.7868/S0002333715040122

Яновская Т. Б. К теории метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2017. № 6. С. 18–23. DOI: 10.7868/S0002333717060072

Li S. H., Li C., Wang C. X. Boundaries of the Amurian Plate identified using multiple geophysical methods // Geosciences Journal. 2020. Vol. 24, P. 49–59. <https://doi.org/10.1007/s12303-019-0011-1>

Поступила в редакцию 19.09.2022 г.

Поступила после доработки 26.10.2022 г.

STRUCTURE OF FAULT ZONES IN THE SOUTHWESTERN PART OF THE MIDDLE AMUR SEDIMENTARY BASIN (Priamurye) ACCORDING TO MICROSEISMIC SOUNDING DATA

V. V. Pupatenko, K. S. Ryabinkin

Yu. A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, Khabarovsk

The first results of microseismic sounding the deep structure of the Earth's crust in the western part of the Middle Amur sedimentary basin are presented. Based on the measurement data at 70 points, we produced sections of the relative velocities of S waves along two transversely crossing profiles,

total length 90 km. The profiles cross the Itun-Yilan fault zone and other large regional faults zones as well as the Bashmaksky, Preobrazhenovsky, and Samaro-Ditursky grabens. The sections at depths of 4–10 km do not contain velocity anomalies. This may explain the lower seismicity of the studied zone compared to neighboring areas of the Tan Lu fault system.

Keywords: seismic tomography, microseismic sounding method, Middle Amur sedimentary basin, fault zones, Itun-Yilan.

REFERENCES

- Ashurkov, S. V., Sankov, V. A., Serov, M. A., Lukyanov, P. Yu., Grib, N. N., Bordonsky, G. S., Dembelov, M. G., 2016. Evaluation of Present-Day Deformations in the Amurian Plate and Its Surroundings, Based on GPS Data, *Russian Geology and Geophysics*. 57 (11), 1626–1634. DOI: 10.1016/j.rgg.2016.10.008
- Gorbatikov, A. V., Stepanova, M. Yu., Korablev, G. E., 2008. Microseismic field affected by local geological heterogeneities and microseismic sounding of the medium, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 44 (7), 577–592. DOI: 10.1134/S1069351308070082
- Gorbatikov, A. V., Tsukanov, A. A., 2011. Simulation of the Rayleigh Waves in the Proximity of the Scattering Velocity Heterogeneities. Exploring the Capabilities of the Microseismic Sounding Method, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 47 (4), 354–369. DOI: 10.1134/S1069351311030013
- Kaplun V. B., 2018. Structure of the Northwestern Boundary of the Middle Amur Sedimentary Basin (Russian Far East) from Audiomagnetotelluric Sounding Data, *Russian Geology and Geophysics*. 12 (2), 151–161. DOI: 10.1134/S1819714018020021
- Kugaenko, Y. A., Saltykov, V. A., Gorbatikov, A. V., Stepanova M. Y., 2018. Deep Structure of the Zone of Tolbachik Fissure Eruptions (Kamchatka, Klyuchevskoy Volcano Group): Evidence from a Complex of Geological and Geophysical Data, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 54 (3), 444–465. DOI: 10.1134/S1069351318030059
- Li, S. H., Li, C., Wang, C. X., 2020. Boundaries of the Amurian Plate Identified Using Multiple Geophysical Methods, *Geosciences Journal*. 24, 49–59. DOI: 10.1007/s12303-019-0011-1
- Ovsyuchenko, A. N., Gorbatikov, A. V., Rogozhin, E. A., Andreeva, N. V., Stepanova, M. Y., Lar'kov, A. S., Sysolin, A. I., 2019. Microseismic Sounding and Active Faults of the Kerch-Taman Region, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 55 (6), 886–896. DOI: 10.1134/S1069351319060053
- Pupatenko, V. V., Ryabinkin, K. S., Bronnikov, A. K., Verkhoturov, A. L., Experience of Complex Microseismic and Magnetotelluric Sounding on the Northern Part of the Central Sikhote-Alin Fault, *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 50 (2), 84–94 [In Russian].
- Rogozhin, E. A., Gorbatikov, A. V., Kharazova, Y. V., Stepanova, M. Y., Nikolaev, A. V., 2016. Deep Structure and Volcanic Activity of Mount Elbrus and a Portion of the Elbrus–Tyryauz Valley: Geological and Geophysical Data, *Doklady Earth Sciences*. 471 (1), 1213–1216. DOI: 10.1134/S1028334X16110210
- Safonov D. A., 2018. Seismic Activity of the Amur and Primorye, *Geosystems of Transition Zones*. 2 (2), 104–115 [In Russian].
- The Middle Amur Sedimentary Basin: Geology, Geodynamics, Fuel and Energy Resources. Vladivostok; FEB RAS, 2009. (Series “Sedimentary Basins in Russia’s East”. 3) [In Russian].
- Tsukanov, A. A., Gorbatikov, A. V., 2020. Influence of the Contribution of Body Waves to the Result of the Microseismic Sounding Method, *Acoustical Physics*. 66 (2), 191–197. DOI: 10.1134/S106377102001011X
- Tsukanov, A. A., Gorbatikov, A. V., 2015. Microseismic Sounding Method: Implications of Anomalous Poisson Ratio and Evaluation of Nonlinear Distortions, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 51 (4), 548–558. DOI: 10.1134/S1069351315040126
- Ulomov, V. I., Bogdanov, M. I., Trifonov, V. G., Gusev, A. A., Gusev, G. S., Akaktova, K. N., Aptikaev, F. F., Danilova, T. I., Kozhurin, A. I., Medvedeva, N. S., Nikono, v A. A., Peretokin, S. A., Pustovitenko, B. G., Strom, A. L., 2016. Explanatory Note to the Set of maps of the General Seismic Zoniin in the Territory of the Russian Federation OSR-2016, *Engineering Survey*. 7, 49–122 [In Russian].
- Utkin, V. P., 2013. Shear Structural Paragenesis and Its Role in Continental Rifting of the East Asian Margin, *Russian Journal of Pacific Geology*. 7, 167–188. DOI: 10.1134/S181971401303007X
- Yanovskaya, T. B., 2017. On the Theory of the Microseismic Sounding Method, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 53 (6), 819–824. DOI: 10.1134/S1069351317060076
- Zhostkov, R. A., Presnov, D. A., Shurup, A. S., Sobisevich, A. L., 2017. Comparative Study of Deep Structures by Means of Passive Microseismic Sounding and Seismic Tomography, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 81 (1), 64–67. DOI: 10.3103/S1062873817010294
- Zhostkov, R. A., Presnov, D. A., Sobisevich, A. L., 2015. Evolution of the Microseismic Sounding Method, *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 26 (2), 11–19 [In Russian].