

УДК 550.34: 550.83

ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОМНОЙ ТЕКТониКИ И ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН ВОСТОЧНОГО ПРИАМУРЬЯ

© 2019 г. Т. В. Меркулова

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН

680000 Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65

e-mail: merkulova@itig.as.khb.ru

Поступила в редакцию 21.06.2018 г.

Рассмотрена пространственная связь сейсмоактивных зон Восточного Приамурья ($M \geq 5$) с региональными разломами и зонами скрытых разрывов, индикаторами которых служат оси аномалий гравитационного и магнитного полей. В большинстве случаев сейсмоактивные зоны, где происходили землетрясения с $M \geq 5$, приурочены к региональным разломам, в двух случаях такая связь не обнаруживается. Сейсмоактивные зоны наблюдаются как на пересечении региональных разломов, так и на пересечении региональных разломов со скрытыми разрывами разного порядка. По данным ГСЗ, МОВЗ, МТЗ сейсмоактивные зоны представлены глубинными разломами наклонного и субвертикального заложения. В сейсмоактивных зонах по геофизическим данным устанавливаются признаки флюидонасыщенности: сейсмоактивные разломы часто контролируют низкоскоростные и низкоомные неоднородности в земной коре и в верхней мантии, в некоторых случаях по сейсмоактивным разрывам наблюдается смещение границы Мохо, куполообразные изгибы границ в земной коре и границы Мохо, отмечается насыщенность земной коры границами обмена. Глубинность сейсмоактивных разломов и выявленные признаки флюидонасыщенности позволяют рассматривать сейсмоактивные зоны Восточного Приамурья как каналы поступления флюидов из мантии в земную кору.

Ключевые слова: сейсмоактивные зоны, разломная тектоника, глубинное строение, Приамурье.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019522-35>

ВВЕДЕНИЕ

Определяющая роль разломов, как ослабленных зон, вдоль которых происходит сброс накопленной энергии, отмечается многими исследователями [Зобак, Зобак, 1984; Уломов, 1993; Булин, 2004; Шерман, 2009]. Все модели очагов землетрясений рассматривают сейсмическое событие как результат подвижки по активному разлому [Шерман, 2009]. Разлом представляет собой трехмерное тело, которое характеризуется длиной, шириной и глубиной, т.е. областью динамического влияния [Шерман и др., 1983; Кочарян и др., 2011]. Однако связь землетрясений с разломами, закартированными по геологическим данным, проявляется не всегда. Иногда очаги землетрясений обнаруживаются по разломным зонам, которые на поверхности вовсе не проявлены или выражены рядом косвенных признаков так называемых скрытых разломов [Макаров, Шукин, 1979]. Приуроченность землетрясений к скрытым разрывам, выделяемых по комплексу геолого-геофизических данных, устанавливается во многих сейсмоактивных районах России [Стогний, Стогний, 2005; Вашилов,

Калинина, 2008; Трофименко, 2010; Спичак, 2016]. Скрытыми могут быть не только древние разрывы, плохо проявленные на поверхности, но и формирующиеся молодые разломы в зонах современной деструкции [Шерман, 2009]. Землетрясения в пространстве разлома распространяются неравномерно – происходят только в зонах, к которым относят узлы пересекающихся разнонаправленных разломов или их резкие изломы и искривления [Уломов, 1993; Блинова, 2003]. В очаговых зонах сильных землетрясений сейсмогенерирующие подвижки часто охватывают участки плоскостей разнонаправленных разломов вблизи узлов их пересечения [Рогожин, 2000].

При изучении сейсмичности во внутриплитных областях некоторые исследователи указывают на сейсмическую активность разломов разного наклона. В одних областях сейсмоактивны только субвертикальные или крутонаклонные разрывы [Зобак, Зобак, 1984; Булин, 2004]. В сейсмоактивных областях Средней Азии первостепенная важность отводится наклонным ослабленным зонам [Лукк, Юнга, 1988].

Во многих работах отмечается участие в сейсмическом процессе и, следовательно, в стимулировании подвижек по активным разломам движения флюидов [Киссин, 2001; Гуфельд и др., 2011; Белявский, Ракитов, 2012]. Ф.А. Летников допускает наличие интенсивных флюидных потоков, поднимающихся вдоль зон разломов из астеносферы и создающих напряженные системы, функционирующие длительное время [Летников, 2013]. По данным геофизических исследований на присутствие флюидов указывают области пониженных скоростей и повышенной электропроводности и другие признаки [Павленкова, 1996; Каракин и др., 2003; Рыбин, 2011; Кушнир, Бурахович, 2012; Мороз и др., 2015].

ДАнные И МЕТОды ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходного материала пространственного распределения относительно сильных землетрясений ($M \geq 5$) использован каталог Института тектоники и геофизики (ИТиГ)

ДВО РАН. В каталоге собрана информация об исторических и инструментально зарегистрированных землетрясениях из каталогов “Землетрясения в России” и “Землетрясения в Северной Евразии”. Зоны сближенных землетрясений с $M \geq 5$ или сейсмоактивные зоны, где вместе с относительно слабыми землетрясениями произошло одно землетрясение с $M \geq 5$, условно разделены на одиннадцать зон (рис. 1).

В пределах этих зон исследовалась связь землетрясений с региональными разломами, выделенными по результатам геологосъемочных работ [Забродин и др., 2015]. Информация о возможном участии в разломной тектонике скрытых разрывов может быть получена на основе осей аномалий гравитационного и магнитного полей. При анализе использовались региональные компоненты гравитационного и магнитного полей и локальная составляющая гравитационного поля первого порядка, которые свидетельствуют о нарушении глубинных горизонтов ли-

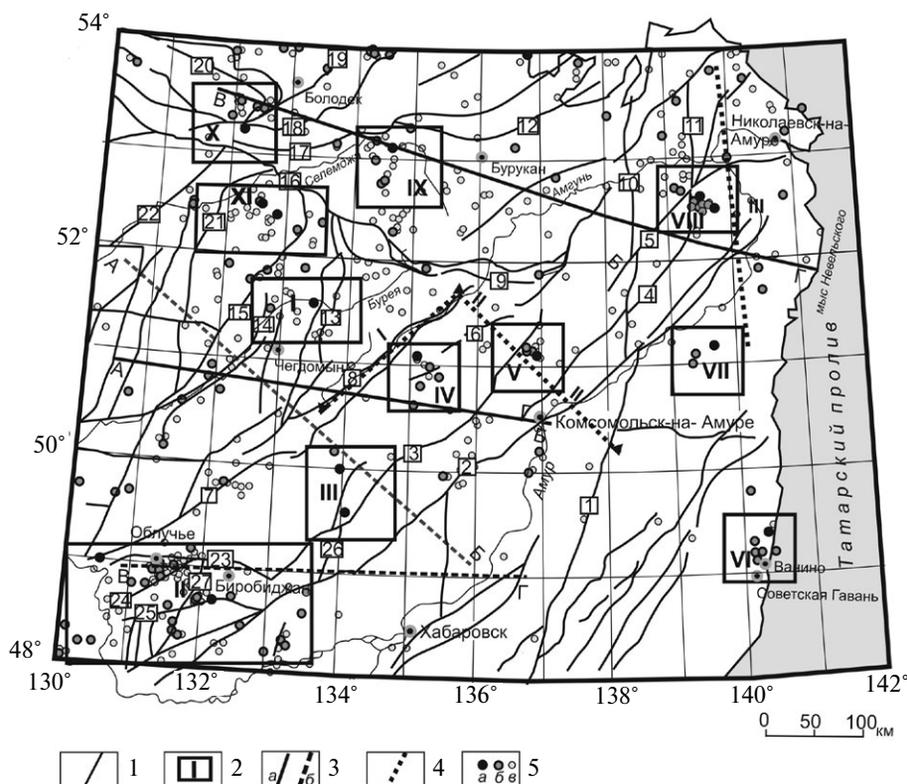


Рис. 1. Разломная тектоника и сейсмоактивные зоны ($M \geq 5$) Восточного Приамурья.

1 – региональные разломы, по [Забродин и др., 2015]; 2 – условные границы сейсмоактивных зон и их номер; 3 – профили глубинных сейсмических работ (*a* – ГСЗ, *b* – МОВЗ); 4 – профили МТЗ; 5 – землетрясения (*a* – $M \geq 5$, *b* – $5 < M \geq 4$, *в* – $4 < M \geq 3$).

Цифры в квадратах – разломы: 1 – Центральный Сихотэ-Алиньский, 2 – Итунь-Илань (Харпийский), 3 – Курский, 4 – Бокторский, 5 – Бичи-Амурский, 6 – Дукинский, 7 – Амгуньский, 8 – Хинганский, 9 – Пауканский, 10 – Лимурчанский, 11 – Вьюнский, 12 – Ассынйский, 13 – Тастахский, 14 – Буреинский, 15 – Мельгинский, 16 – Южно-Тукурингский, 17 – Тугурский, 18 – Тыльский, 19 – Улигданский, 20 – Ланский, 21 – Верхнемельгинский, 22 – Селемджинский, 23 – Бирский, 24 – Чанчунь, 25 – Помпеевский, 26 – Уликанский, 27 – Дитурский.

тосферы. К настоящему времени накоплен определенный опыт выделения скрытых разломов по геофизическим данным. Один из признаков разломов – выдержанность осевых линий магнитных и гравитационных аномалий. Линейные гравитационные и магнитные аномалии могут быть обусловлены линейными геологическими объектами в разломах, представленных телами магматических пород, часто основного и ультраосновного состава (массивы, дайки). Некоторые разломы характеризуются активными проявлениями гранитизации, метасоматоза, образующие линейные зоны, насыщенные гранитами, пегматитами и метасоматитами. В локальных аномалиях гравитационного поля отрицательного знака могут отражаться структуры, заполненные рыхлыми осадочными отложениями (впадины, грабены), образование которых связано с активизацией разломов. Линейные аномалии магнитного поля могут также фиксировать новообразования в разломах – зоны милонитизации, участки вторичных изменений [Трофименко, 2010]. В линейных региональных аномалиях гравитационного поля отражаются крупные блоки литосферы, контролируемые глубинными разломами [Тяпкин, Кивелюк, 1982]. Как известно, крупные разломы представлены крупным магистральным разрывом и серией разрывов более мелкого порядка [Семицкий, 2003]. В связи с чем распределение осей аномалий, как индикаторов разрывов разного ранга, часто носит сложный характер [Тяпкин, Кивелюк, 1982; Трофименко, 2010].

Анализ гравитационного и магнитного полей, разделение на региональную и локальную компоненты, процедура трассирования осей аномалий выполнена с использованием программы КОСКАД 3D, разработанной А.В. Петровым [Петров и др., 2010]. Многофункциональная программа КОСКАД 3D, позволяет провести полный статистический, спектрально-корреляционный и градиентный анализ гравитационного и магнитного полей. В программе используются линейные оптимальные фильтры, позволяющие решать задачи разложения поля на составляющие, исключения тренда, корректной оценки формы аномалий, оценки глубины залегания аномалеобразующих тел. С помощью алгоритмов обнаружения возможно выделение аномалий линейной формы, что важно при изучении тектонических нарушений.

Особенности строения сейсмоактивных зон изучены по данным глубинных сейсморазведочных работ методами ГСЗ, МОВЗ и МТЗ [Каплун, 2004; Каплун, Малышев, 2010; Бормотов, Меркулова, 2012]. На профили глубинных исследований вынесены землетрясения в полосе 100 км с обеих сторон.

АНАЛИЗ РАЗЛОМНОЙ ТЕКТОНИКИ И ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ СЕЙСМОАКТИВНЫХ ЗОН ПРИАМУРЬЯ

Зона I. Землетрясение с $M \geq 5$ наблюдается в зоне динамического влияния Гастахского разлома субмеридионального направления (см. рис. 1). Оси гравитационных и магнитных аномалий ориентированы кроме субмеридиональной ориентировки в субширотном и северо-восточном направлении (рис. 2, рис. 3). Землетрясение с $M \geq 5$ по данным ГСЗ приурочено к разломной зоне, проявленной до глубины 30 км, которая ограничивает низкоскоростную неоднородность в средней коре в диапазоне глубин 17–22 км (рис. 4).

Зона II. Сейсмоактивная зона контролируется крупными региональными разломами северо-восточного направления – Ушу-Харпийским и Амгунским, между которыми выделяется сеть значительно меньших по длине разломов разного направления (см. рис. 1). Одно из землетрясений с $M \geq 5$ произошло вблизи Амгунского разлома. Другое сильное землетрясение приурочено к Помпеевскому (Биджанскому) разлому субширотного направления. Более слабые землетрясения с $M < 5$ концентрируются вдоль субширотного Помпеевского разлома и разломов Чанчунь и Дитурскому северо-восточного простираения.

Данные МОВЗ показывают, что обширная сейсмоактивная область сформировалась в месте выхода глубинной крутопадающей зоны, трассируемой аномалиями пониженных скоростей (рис. 5).

Зона III. Эпицентры двух землетрясений с $M \geq 5$ расположены в зоне динамического влияния Уликанского разлома. Анализ осей гравитационных и магнитных аномалий показывает, что землетрясение с $M \geq 5$ приурочено к пересечению субмеридиональных, субширотных и северо-восточных разрывов.

По данным МОВЗ оба землетрясения произошли в области сочленения сейсмических границ разного наклона в мантии (см. рис. 5а). Восточнее более мелкие землетрясения с $M < 5$ приурочены к сейсмическим границам в верхней части земной коры, наклон которых соответствует наклону границы в верхней мантии (см. рис. 5).

Зона IV. Землетрясения приурочены к окончанию Дукинского разлома северо-восточной ориентировки, направление которого согласуется с локальными аномалиями гравитационного поля. В магнитном поле в данном месте оси аномалий имеют северо-западное простираение. Отмечается четкая приуроченность слабых землетрясений с $5 > M \geq 4$ к осям аномалий магнитного поля северо-западного простираения. По данным ГСЗ

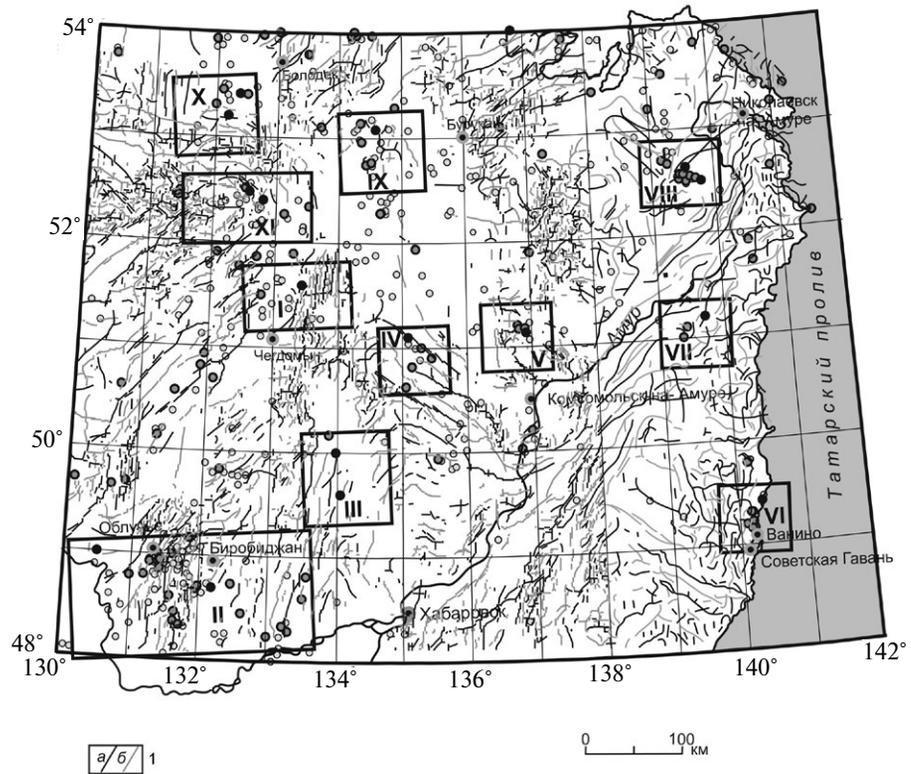


Рис. 2. Оси региональных магнитных аномалий.

1 – оси региональных аномалий магнитного поля (*a* – положительного знака, *b* – отрицательного знака). Остальные условные обозначения см. рис. 1.

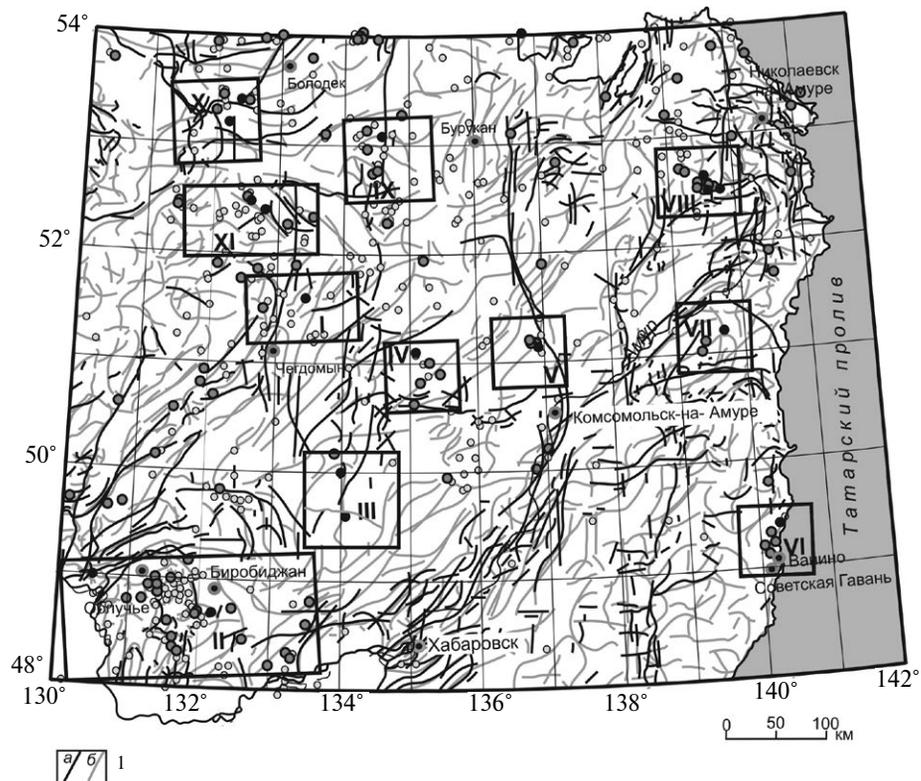


Рис. 3. Оси аномалий гравитационного поля.

1 – оси аномалий гравитационного поля (*a* – региональных, *b* – локальных 1-го порядка). Остальные условные обозначения см. рис. 1.

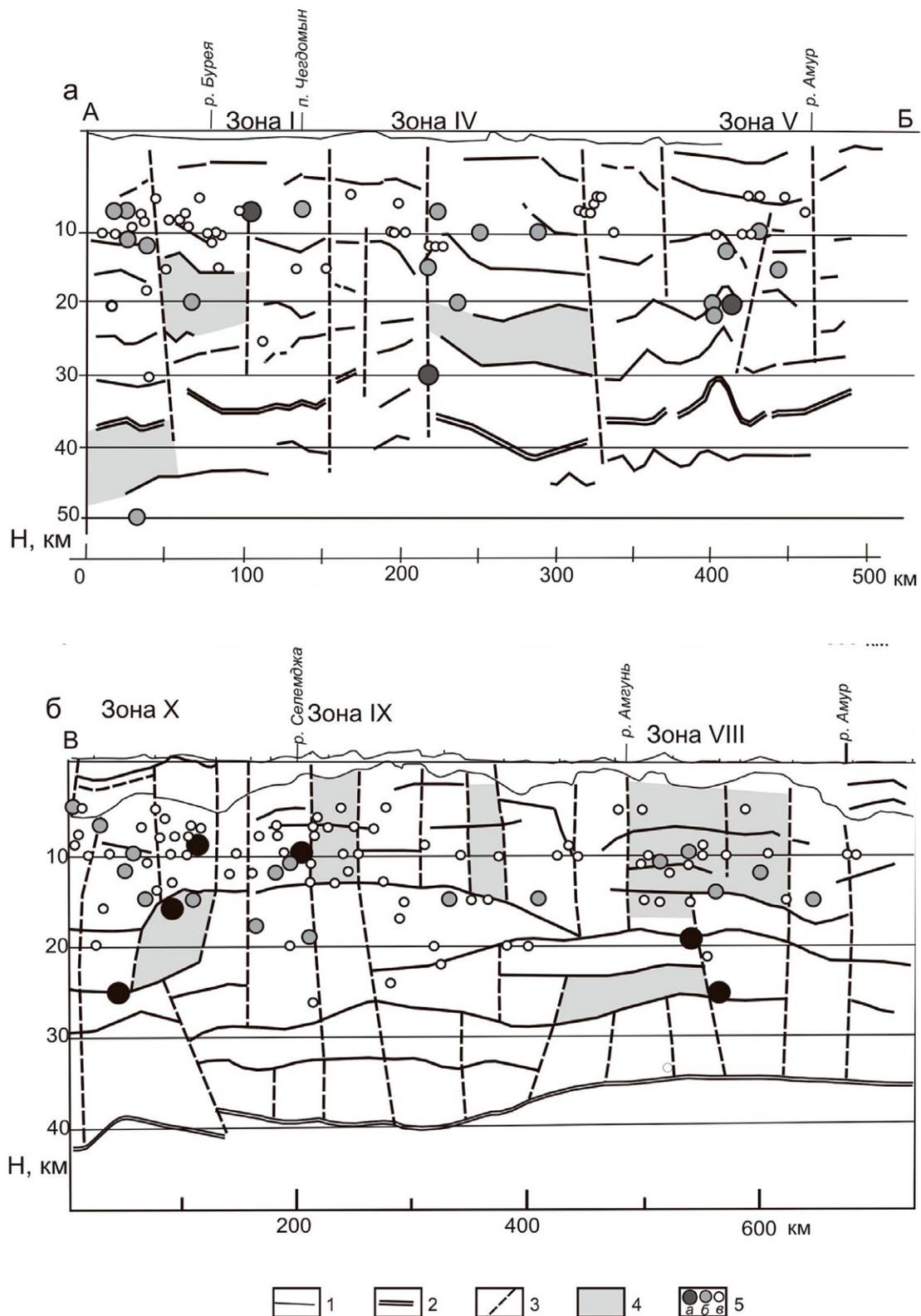


Рис. 4. Результаты глубинных сейсморазведочных работ методом ГСЗ.

а – по профилю АБ, б – по профилю ВГ.

1 – сейсмические границы; 2 – граница Мохо; 3 – разломы, установленные по сейсмическим данным; 4 – низкоскоростные области, по [Брянский, 1992]; 5 – землетрясения (а – $M \geq 5$, б – $5 < M \geq 4$, в – $4 < M \geq 3$).

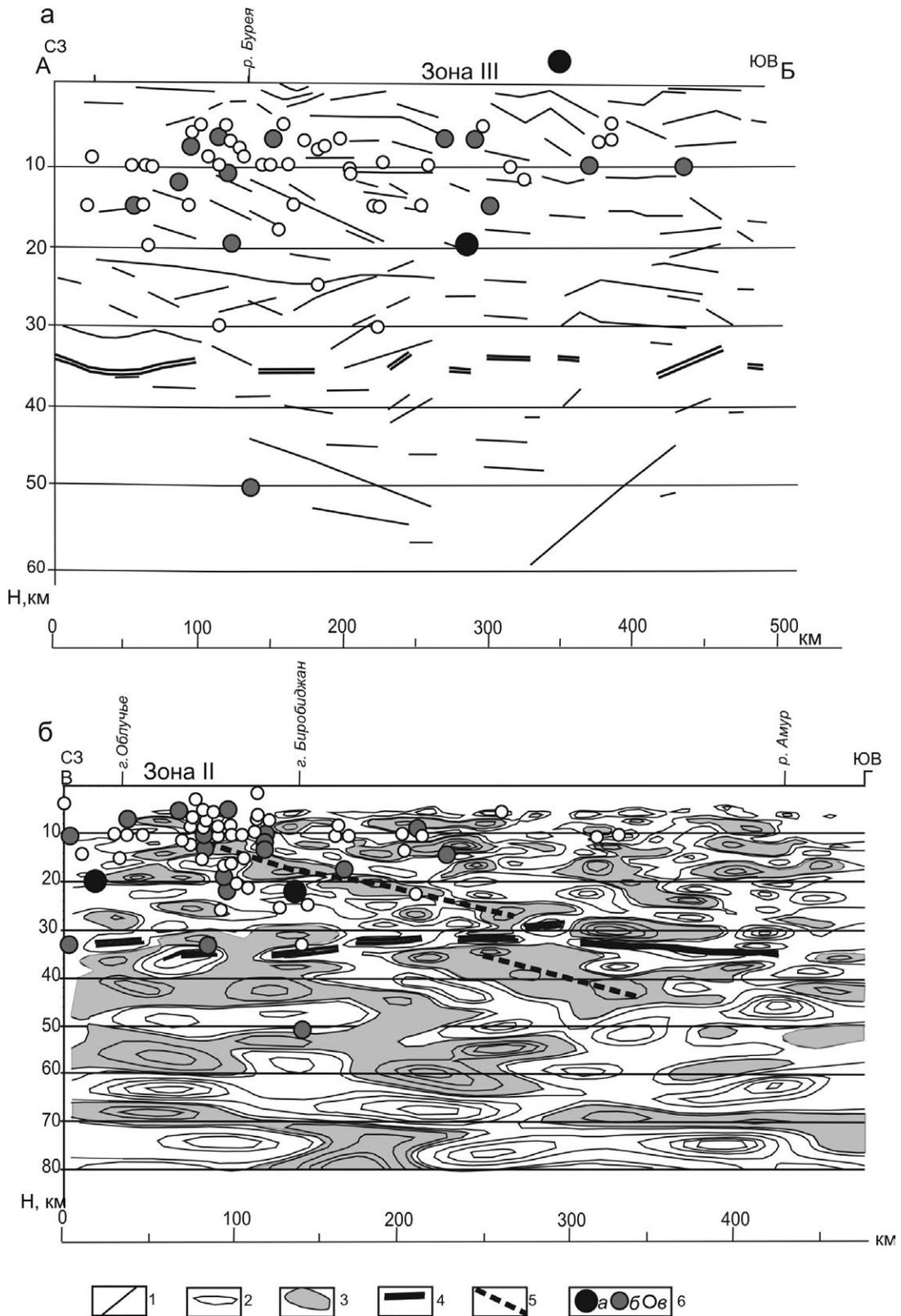


Рис. 5. Результаты глубинных сейсморазведочных работ методом МОВЗ.

а – по профилю АБ; б – по профилю ВГ [Бормотов, Меркулова, 2012].

1 – границы обмена; 2 – изолинии суммарной плотности распределения точек обмена и отражения; 3 – области пониженных скоростей; 4 – граница Мохо; 5 – наклонный срыв; 6 – землетрясения (а – $M \geq 5$, б – $5 < M \geq 4$, в – $4 < M \geq 3$). Одно землетрясение показано над профилем, так как глубина очага не определена.

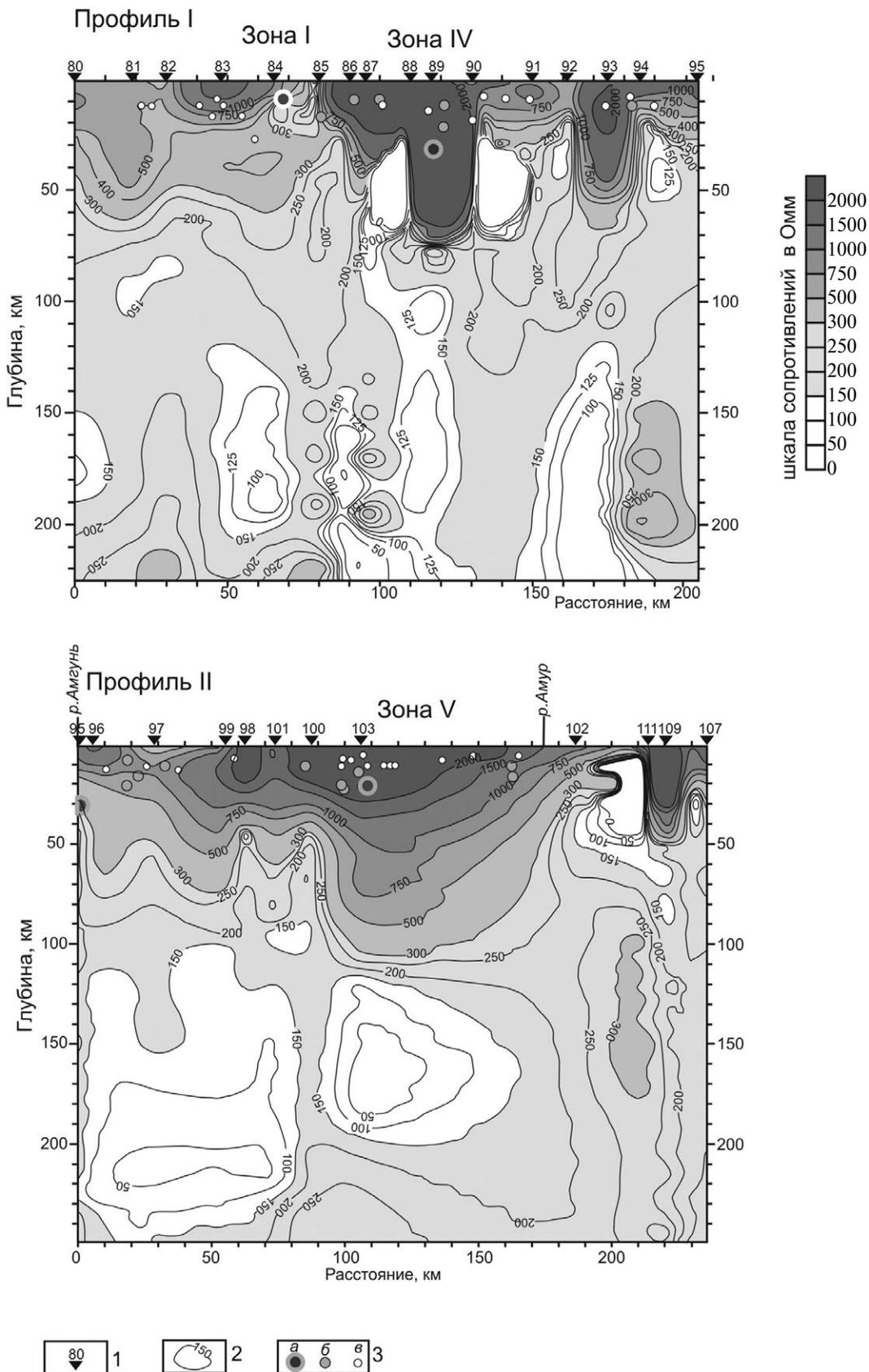


Рис. 6. Результаты глубинных исследований методом МТЗ [Каплун, 2004].

1 – пункты МТЗ; 2 – изолинии удельного электрического сопротивления в Омм; 3 – землетрясения (а – $M \geq 5$, б – $5 < M \geq 4$, в – $4 < M \geq 3$).

сейсмоактивная зона представлена субвертикальным разломом, который проявлен на всю мощность земной коры и проникает в верхнюю мантию. На уровне 20–25 км разлом контролирует низкоскоростную неоднородность (см. рис. 4а). По данным МТЗ это землетрясение отмечается над субвертикальной низкоомной неоднородностью в верхней мантии (рис. 6, профиль I).

Зона V. Землетрясение с $M \geq 5$ произошло в зоне Курского разлома северо-восточного ориентирования в соответствии с направлением осей большинства локальных гравитационных аномалий. Оси магнитных аномалий в зоне концентрации землетрясений ориентированы как в субширотном, так и субмеридиональном направлениях. Юго-восточнее оси мелких магнитных аномалий простираются в северо-западном направлении.

Результаты ГСЗ по профилю АБ свидетельствуют о наклонном разломе, в зоне динамического влияния которого образовалась сейсмоактивная зона (см. рис. 4а). По данным МТЗ землетрясение с $M \geq 5$ контролируется низко-

омной неоднородностью, распространяющейся в верхней мантии от глубины 110 км (см. рис. 6, профиль II).

Зона VI. Зона концентрации очагов землетрясений расположена на побережье Татарского пролива, где региональные разломы не выявлены. Кроме аномалий субмеридионального простираения в этом месте наблюдается аномалия магнитного поля, ориентированная в субширотном направлении и аномалии гравитационного поля северо-восточной направленности.

Зона VII. Вблизи сейсмоактивной зоны разломов нет. Землетрясение с $M \geq 5$ приурочено к пересечению аномалий гравитационного поля субмеридионального и северо-восточного простираения. В магнитном поле вблизи зоны, кроме аномалий описанных направлений, проявляются аномалии субширотного и северо-западного направления. По данным МТЗ сейсмоактивная зона находится близко к выходу на дневную поверхность глубинных наклонных границ. Одна из границ выполаживается к глубине 160 км, две другие контролируют слабонаклонную зону

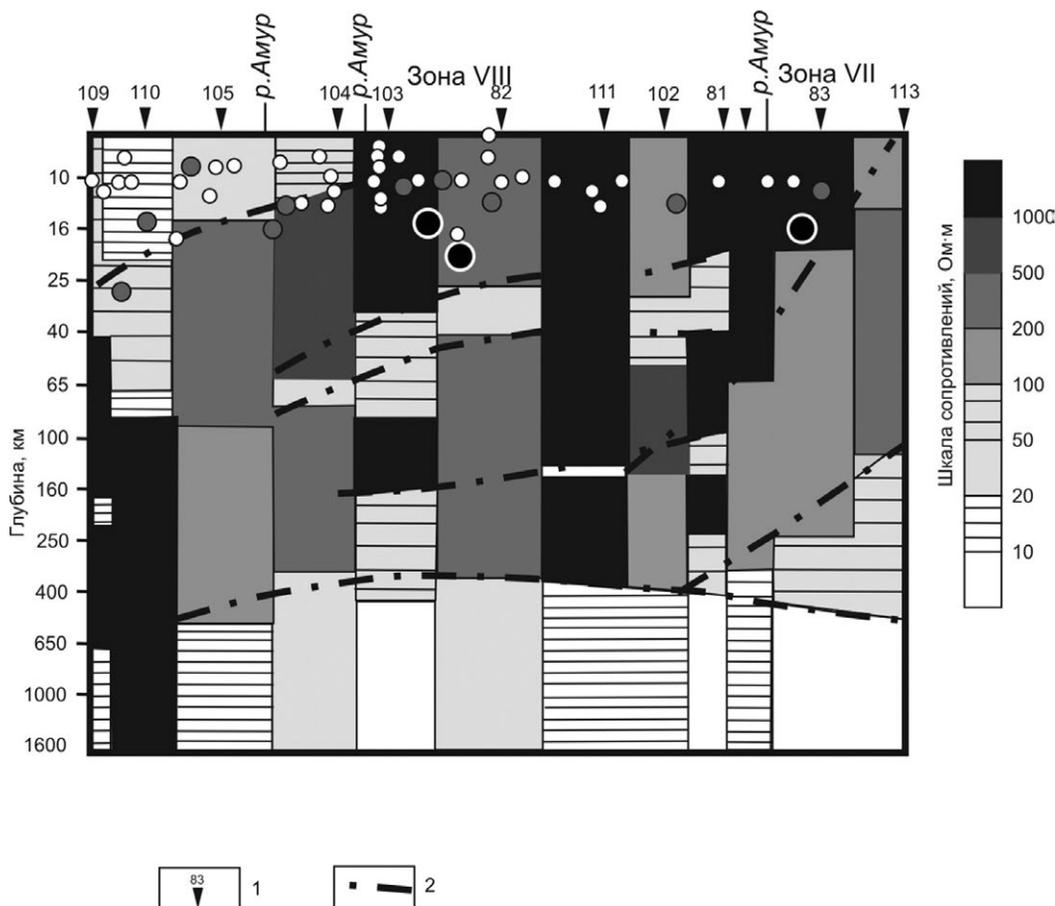


Рис. 7. Результаты глубинных исследований методом МТЗ по профилю III [Каплун и др., 2010].

1 – пункты МТЗ; 2 – границы геоэлектрических слоев. Остальные условные обозначения см. рис. 6.

пониженных значений удельных электрических сопротивлений, распространяющуюся от глубин 65–70 км до 25 км (рис. 7).

Зона VIII. Зона скопления землетрясений отмечается на пересечении Вьюнского разлома субмеридионального направления с Бичи-Амурским разломом северо-восточной ориентировки. По данным ГСЗ землетрясения с $M \geq 5$ сосредоточены на выделенном по данным ГСЗ пологому разлому, проявленному в диапазоне глубин от 15 до 35 км и контролирующему низкоскоростную неоднородность в средней коре в диапазоне глубин 23–26 км (см. рис. 4б). В верхней коре сейсмоактивная зона представлена субвертикальными разрывами, ограничивающими область низких скоростей. По данным МТЗ зона повышенной сейсмичности сформировалась в области пониженных сопротивлений в верхней коре до 200–500 Ом (МТЗ 82), в то время как в соседних участках его величина достигает более 1000 Ом (МТЗ 103, 111). В диапазоне глубин 25–40 км удельное сопротивление понижается до 20–50 Ом (см. рис. 7).

Зона IX. Скопления землетрясений наблюдается между крупными региональными разломами субширотного простирания – Тугурским и Пауканским. Землетрясения в зоне локализируются в субмеридиональном направлении, коррелируя с субмеридиональным направлением региональной аномалии гравитационного поля. Землетрясение с $M \geq 5$ приурочено к пересечению осей мелких локальных аномалий гравитационного и магнитного полей разных ориентировок: субмеридиональной, северо-восточной и северо-западной и субширотной. По данным ГСЗ землетрясение с $M \geq 5$ произошло по субвертикальному разрыву, контролирующему низкоскоростную неоднородность в верхней коре до глубины 15 км (см. рис. 4б).

Зона X. Зона включает в себя землетрясения на пересечении регионального Туксинского разлома субширотного простирания с разломами северо-восточной направленности – Селемджинским и Улигданским. С направлением региональных разломов совпадает направление осей аномалий магнитного поля. В этой зоне оси региональных аномалий гравитационного поля, кроме описанных выше двух направлений, имеют субмеридиональное и северо-западное простирание. По данным ГСЗ сейсмоактивная зона представлена глубинным разломом – субвертикальным в верхней коре и наклонным в нижней ее части, контролирующим низкоскоростную неоднородность в средней коре (см. рис. 4б).

Зона XI. Два близкорасположенных землетрясения с $M \geq 5$ вместе с более мелкими землетрясениями образуют зону, ориентированную в северо-западном направлении, парал-

лельном региональному Южно-Тукурингскому (Пауканскому) разлому и, вероятно, относящемуся к области динамического влияния этого разлома. Северо-западная ориентировка зоны концентрации землетрясений совпадает с направлением большинства магнитных аномалий и гравитационных аномалий. По анализу гравитационного поля зона сформировалась в области пересечения осей северо-западного и северо-восточного направления.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ региональных разломов и положения землетрясений с $M \geq 5$ показал, что большинство сейсмоактивных зон приурочено к региональным разломам, но в двух случаях такая связь не обнаруживается (зоны VI, VII). Несомненно, для локализации землетрясений большую роль играют пересечения разрывов, но приуроченность сейсмоактивных зон к пересечениям региональных разломов, установленных по геологическим данным, выражена слабо и отмечается только в двух случаях (зоны X, VIII). В основном зоны концентрации землетрясений локализируются в местах пересечений региональных разломов с осями магнитных и гравитационных аномалий, которые указывают на участие в пересечениях разрывов другой ориентировки (зоны V, IV, II, III). Например, в зоне III кроме аномалий субмеридиональной ориентировки в соответствии с направлением Уликанского разлома, отмечаются аномалии гравитационного поля субширотного направления. В зоне IV кроме аномалий гравитационного поля северо-восточного направления, совпадающих с ориентировкой Дукинского разлома, в магнитном поле проявлены аномалии северо-западного направления. Отсутствие в двух случаях приуроченности сейсмоактивных зон к региональным разломам и их слабое участие в пересечениях указывает на распространение в литосфере региона скрытых разломов и разрывов разного ранга, индикаторами которых могут выступать оси аномалий гравитационного и магнитного полей.

В формировании зон повышенной нарушенности участвуют как древние разломы и разрывы субмеридионального и субширотного направлений, так и аномалии северо-западного направления – индикаторы разрывов более молодого возраста. В связи с чем можно утверждать, что в образовании сейсмоактивных зон играет роль глубинная раздробленность и нарушенность земной коры разрывами разного ранга.

Однако необходимо отметить, что имеются пересечения как осей аномалий, так и региональных разломов, где в современное время

землетрясения не происходят. Асейсмичность пересечений разломов и разрывов может объясняться залечиванием, т.е. процессом восстановления прочности пород, ранее подвергшихся деструкции. В настоящее время, кроме полевых данных, проведены экспериментальные исследования, которые рассматривают различные аспекты этого явления и получены инструментальные подтверждения упрочнения разломов после землетрясений [Ружич и др., 1990; Медведев и др., 2014; Кочарян, 2014]. Представлены механизмы восстановления прочности и залечивания микротрещин при землетрясениях разной интенсивности [Кочарян, 2014]. Возможно, кроме процесса залечивания, асейсмичность зон пересечений разломов и скрытых разрывов может объясняться существованием других факторов, влияющих на сейсмическую активность.

По данным ГСЗ, МОВЗ землетрясения с $M \geq 5$ в Восточном Приамурье отмечались как по наклонным разломным зонам (зона II, V), так и по субвертикальным разрывам (зоны I, IV, IX) или субвертикальным в верхней части и наклонным в нижней части (зоны VIII, X). Для Приамурья, вероятно, наклон разлома на его сейсмическую активность влияет слабо.

Глубинные геофизические исследования показывают, что в современных проявлениях сейсмичности Приамурья находят отражение глубинные разломы, проявленные, как правило, на всю мощность земной коры и проникающие в мантию. Влияние мантийных процессов на сейсмичность района работ демонстрируется результатами МТЗ и МОВЗ. Профиль I МТЗ проходит вдоль сближенных разломов (Хинганский и Амгуньский) северо-восточного направления (см. рис. 6). На геоэлектрическом разрезе видно, что строение разных сегментов сближенных разрывов как в земной коре, так и в верхней мантии различается. Землетрясения с $M \geq 5$ (зоны I и IV) располагаются над субвертикальными низкоомными неоднородностями в верхней мантии, распространяющиеся в первом случае от глубины 120 км, в другом — от глубины 100 км. Над третьей неоднородностью произошло только землетрясение с магнитудой менее 5. Другой профиль МТЗ (профиль II) пересекает Курский разлом северо-восточной ориентировки. Сейсмоактивная зона V приурочена к низкоомной неоднородности в верхней мантии на глубине 110 км. Участие мантийных процессов в формировании сейсмоактивных структур земной коры подтверждается результатами исследований в других внутриплитных сейсмоактивных регионах — деформационные процессы относятся не только к земной коре, но ко всей толще литосферы [Уломо, 1993; Петрищевский, 2007; Долгинов и др., 2011; Мороз и др., 2015].

В сейсмоактивных зонах сейсмические границы в земной коре в зоне разломов могут иметь наклонное залегание и испытывать разрывы и смещение. Граница Мохо также может нарушаться разрывами и смещениями (см. рис 4, зоны IV, X). В поведении сейсмических границ вблизи сейсмоактивных разломов иногда наблюдаются резкие куполообразные изгибы, осложняющие поведение сейсмических границ внутри земной коры и нарушающие поведение границы Мохо (см. рис. 4, зона V). Разрывы в прослеживании границы Мохо и ее куполообразные изгибы рассматриваются исследователями как признаки внедрения мантийных флюидов в земную кору и ее дегазация [Белявский, Ракитов, 2012; Рудницкая и др., 2013]. Аналогичные особенности устанавливаются в очаговых зонах сильных землетрясений. Геолого-геофизическая модель очаговой зоны Алтайского землетрясения (2003, $M = 7.3$) представлена погружением поверхности Мохо с отметок 45 км до 55 км и проявлением возрастания электропроводимости на два порядка в зоне, прилегающей к очаговой области [Кадури и др., 2013].

По данным МОВЗ земная кора в окрестностях сейсмоактивной зоны III насыщена границами обмена, наклон которых соответствует наклону сейсмической границы в верхней мантии, проявленному в диапазоне глубин 40–50 км (см. рис. 5в). Землетрясения с $5 < M \leq 4$ и $4 < M \leq 3$ приурочены к наклонным сейсмическим границам или формируют наклонные линейные зоны как бы продолжающие наклонные границы в земной коре. Землетрясения с $M \geq 5$ располагаются над областью сочленения двух встречных наклонных границ в мантии. Наклонные сейсмические границы в мантии связываются с мантийными зонами нарушений, которые выносятся к низкоскоростным областям [Павленкова, 1996, 2011]. Аналогичная ситуация характерна для районов сильных землетрясений Кавказа, Корякии [Кадури и др., 2013]. Земная кора в очаговых зонах этих сейсмоактивных регионов насыщена сейсмическими границами обмена, характеризующимися невыдержанностью, разрывами, наклонами, создающими впечатление о нарушении среды. В этих регионах устанавливается тесная связь очаговых зон землетрясений с глубинными наклонными разломами, корнями уходящих в мантию, которые также рассматриваются как подводные каналы для проникновения флюидов из мантии в земную кору (универсальные флюидопроводники) [Кадури и др., 2013]. Нижней границей проникновения разломов в мантию, по существующим представлениям, является верхняя кромка астеносферного слоя, ввиду того, что глубинные разломы могут длительно существовать только в твердых породах [Бондур и др., 2016].

В случае крупных пологих наклонных разломных зон мантийного заложения в Приамурье сейсмоактивные зоны формируются как близко к их выходам на дневную поверхность (см. зона II на рис. 5, зона VII на рис. 7), так и над мантийными неоднородностями, к которым они выносятся (см. зона III на рис. 5, зона VIII на рис. 7).

Глубинность сейсмоактивных разломов Восточного Приамурья и их особенности – смещение границы Мохо, наличие куполообразных и наклонных сейсмических границ позволяет рассматривать их как разломы, по которым осуществляется движение флюидов в земную кору из мантии. Флюидонасыщенность также подтверждается тем фактом, что сейсмоактивные разломы часто ограничивают низкоскоростные неоднородности в земной коре по данным ГСЗ или сейсмоактивные зоны располагаются над низкоомными областями по данным МТЗ в верхней мантии. Пониженные значения электрического сопротивления и низкоскоростные зоны свидетельствуют о присутствии в них флюида [Киссин, 2001, 2015]. В очаговых зонах сильных землетрясений сейсмоактивных регионов получены геохимические свидетельства присутствия флюидов мантийного происхождения [Копничев, Соколова, 2005].

Косвенно, на флюидонасыщенность сейсмоактивных зон Приамурья указывает высокая степень корреляции землетрясений с осями аномалий регионального магнитного поля. Например, в зоне IV наблюдается четкое соответствие землетрясений с $M \geq 4$ северо-западной ориентировки аномалий магнитного поля. Аномалии магнитного поля фиксируют положение многочисленных даек разного состава и возраста, жильных и трещинных зон, насыщенных гидротермальными флюидами, отражающих движение флюидов в разные временные интервалы. Карты магнитного поля, по мнению авторов, могут иллюстрировать взаимодействие коры с глубинной мантией и другие аспекты динамики Земли, а также могут быть информативными для определения мест возможных сильных землетрясений [Соловьев и др., 2016].

Представленные данные о сейсмоактивных зонах как каналах движения флюидов из мантии объясняют тот факт, что положение сейсмоактивных зон не всегда коррелируется с выраженными на дневной поверхности разломами. Флюиды могут двигаться как по зонам нарушенности и раздробленности, образованными древними процессами, которые проницаемы на современном этапе. В местах отсутствия проницаемых зон, проникновение мантийных флюидов в земную кору приводит к структурно-метаморфическим преобразованиям пород, снижающих их прочность, что может

рассматриваться как начальная фаза формирования нового разлома [Ребецкий, 2009]. Некоторые сейсмоактивные зоны в Приамурье формируются при участии молодых разрывов северо-западного направления, которые не образуют крупных разломов на дневной поверхности. Вероятно, разломы этой ориентировки в Восточном Приамурье только формируются.

По мнению многих исследователей, сейсмичность во внутриплитных областях, к которым относится Приамурье, вызвана действием деформационных волн, генерируемых геодинамическими процессами на границах плит [Шерман и др., 2013; Рудаков, 2014; Трофименко и др., 2015]. Деформационные волны при движении от источника возбуждения вызывают возникновение неустойчивого состояния в нарушенных объемах геологической среды. Вероятно, роль структур, своеобразных “реологических ловушек”, улавливающих деформационные волны и преобразующие их энергию в землетрясения, выполняют зоны повышенной глубинной проницаемости, по которым возможно движение флюидов. Флюидонасыщенность сейсмоактивных зон Восточного Приамурья как “реологических ловушек” корреспондирует с процессами на границах плит как источников деформационных волн [Шерман, 2009]. В этих процессах также принимают участие флюиды. На сейсмичность Приамурья оказывают влияние зоны взаимодействия Индийской и Евразийской плит (Памиро-Гиндукушский район) и субдукция Тихоокеанской плиты [Геодинамика ..., 2006; Степашко, 2011; Трофименко и др., 2015]. В Гиндукуше зоны концентрации землетрясений на глубине 100 и 200 км связываются с физико-химическими преобразованиями спровоцированными флюидами [Павленкова, 2011]. В Тихоокеанском регионе (Курило-Камчатская и Японская сегменты зоны субдукции) обнаружена восходящая миграция гипоцентров землетрясений с глубин 600–700 км, сопровождаемая миграцией флюидов в земную кору [Molchanov, 2011].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что в формировании сейсмоактивных областей Восточного Приамурья кроме разломов, унаследованных по геологическим данным, принимают широкое участие скрытые разрывы. Скрытые разрывы совместно с региональными разломами образуют пересечения – области повышенной нарушенности и проницаемости, сейсмоактивные на современном этапе. В связи с чем в дальнейшем необходимо разрабатывать методы выделения скрытых разломов с ранжи-

рованием на магистральные разломы и разрывы более низкого порядка с привлечением в качестве индикаторов разрывов как геофизических аномалий, так и других признаков. Результаты глубинных геофизических исследований методами ГСЗ, МОВЗ, МТЗ указывают на участие мантийных процессов в активизации сейсмических подвижек в Восточном Приамурье. По геофизическим данным устанавливаются косвенные признаки флюидонасыщенности сейсмоактивных зон: контролирование низкоомных и низкоскоростных неоднородностей, разрывы и смещения границы Мохо, куполообразные изгибы границ в земной коре, насыщенность границами обмена. Участие мантийных процессов и выявленные косвенные признаки флюидонасыщенности позволяют рассматривать сейсмоактивные зоны Восточного Приамурья как каналы поступления мантийных флюидов в земную кору.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН и при финансовой поддержке РНФ (проект 16-17-00015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белявский В.В., Ракитов В.А.* Флюидонасыщенность очаговых зон землетрясений Алтае-Саянского региона // Геофизика. 2012. № 3. С. 40-47.
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В.* Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли. 2016. № 1. С. 120-132.
- Бормотов В.А., Меркулова Т.В.* Кайнозойский этап развития северной ветви Тан-Лу-Охотской рифтовой системы: глубинное строение и сейсмогеодинамика // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 1. С. 26-41.
- Блинова Т.С.* Нарушенность земной коры и ее роль в прогнозе геодинамически неустойчивых зон для Западно-Уральского региона // Известия Томского политехнического университета. 2003. Т. 306. № 4. С. 44-50.
- Брянский Л.И.* Плотностная структура земной коры и верхней мантии советской части Азиатской окраины: Проблемы и результаты гравитационного моделирования // Проблемы тектоники, энергетические и минеральные ресурсы Северо-Западной Пацифики. Хабаровск: Приамурский филиал географического общества ДВО АН СССР, 1992. Ч. 2. С. 9-18.
- Булин Н.К.* Связь региональной сейсмичности северной и центральной районов Русской платформы с аномалиями скорости сейсмических волн в литосфере и геодинамикой смежных регионов // Литосфера. 2004. № 1. С. 21-30.
- Вацлов Ю.Я., Калинина Л.Ю.* Глубинные разломы и линейменты и размещение эпицентров землетрясений на суше северо-востока России // Вулканология и сейсмология. 2008. № 3. С. 19-31.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
- Гуфельд И.Л., Матвеева М.И., Новоселов О.Н.* Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 4. С. 378-415.
- Долгинов Е.А., Као Т.Д., Ле В.З. и др.* О возможной глубинной природе сейсмической аномалии северо-западного Вьетнама и ее связи с реактивированной системой "горячей точки" поздней юры - раннего мела // Известия вузов. Сер. Геология и разведка. 2011. № 2. С. 11-16.
- Забродин В.Ю., Рыбас О.В., Гильманова Г.З.* Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2015. 132 с.
- Зобак М.Д., Зобак М.Л.* Поле напряжений и внутриплитовые землетрясения в США // Современные проблемы геодинамики. М., 1984. С. 236-258.
- Кадури И.Н., Коновалов Ю.Ф., Маухин А.В. и др.* Развитие идей М.К. Полшкова по изучению строения земной коры сейсмоопасных регионов России методами разведочной геофизики // Геофизика. 2013. № 6. С. 59-64.
- Каплун В.Б.* Геоэлектрическая модель литосферы Комсомольского и Баджальского рудных районов по данным МТЗ // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23. № 6. С. 84-93.
- Каплун В.Б., Малышев Ю.Ф.* Глубинное строение уникальной Нижнеамурской структуры // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири // Материалы научного симпозиума, 1-4 июня 2010. Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2010. С. 32-34.
- Каракин А.В., Курьянов Ю.А., Павленкова Н.И.* Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. М.: ВНИИгеосистем, 2003. 228 с.
- Киссин И.Г.* Флюидная система и геофизические неоднородности консолидированной земной коры континентов // Вестник ОГГГН РАН. Сер. Электричество. 2001. Т. 17. № 2. С. 1-22.
- Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2015. 328 с.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.* Подъем мантийных флюидов в районах очагов сильных землетрясений и крупных разломных зон: геохимические свидетельства // Вестник НЯЦ РК. 2005. Вып. 2. С. 147-155.
- Кочарян Г.Г.* Масштабный эффект в сеймотектонике // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 3. С. 353-385.
- Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Остапчук А.А.* Сейсмогенная ширина разломной зоны // ДАН. 2011. Т. 437. № 2. С. 254-257.
- Кушнир А.Н., Бурахович Т.К.* Аномалии электропроводности и внутриплитовые землетрясения запад-

- ной части Украинского щита и Волыно-Подольской плиты // Геофизический журнал. 2012. Т. 34. № 4. С. 157-165.
- Летников Ф.А.* Синергетика процессов в зонах глубинных разломов // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 70-летию кафедры динамической геологии “Динамическая геология в XXI веке: проблемы и перспективы”, Москва, 22-23 ноября 2013. М.: Изд-во “ПЕРО”, 2013. С. 54-56.
- Лукк А.А., Юнга С.Л.* Геодинамика и напряженно-деформированное состояние литосферы Средней Азии. Душанбе: Изд-во “Дониш”, 1988. 236 с.
- Макаров В.И., Щукин Ю.К.* Оценка активности скрытых разломов // Геотектоника. 1979. № 1. С. 96-109.
- Медведев В.Я., Иванова Л.А., Лысов Б.А. и др.* Экспериментальное изучение декомпрессии, проницаемости и залечивания силикатных пород в зонах разломов // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. С. 905-917.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Логинов В.А.* Глубинное строение очага Олюторского землетрясения в Корякском нагорье по геофизическим данным // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 52-65.
- Павленкова Н.И.* Роль флюидов в формировании сейсмической расслоенности земной коры // Физика Земли. 1996. № 4. С. 51-61.
- Павленкова Н.И.* Реологические свойства верхней мантии Северной Евразии и природа региональных границ по данным сверхдлинных сейсмических профилей // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 9. С. 1287-1301.
- Петрищевский А.М.* Связь сейсмичности с плотностными неоднородностями литосферы Дальнего Востока России // Вулканология и сейсмология. 2007. № 6. С. 60-71.
- Петров А.В., Юдин Д.Б., Хоу Сюели.* Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии “КОСКАД 3D” // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. С. 126-132.
- Ребецкий Ю.Л.* Напряжения, прочность, внутреннее строение и метаморфические преобразования в теле разлома // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Материалы докладов Всероссийской конференции. М.: ИФЗ РАН, 2009. Т. 2. С. 55-57.
- Рогожин Е.А.* Тектоника очаговых зон сильных землетрясений // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2. № 1. С. 37-62.
- Рудаков В.П.* О роли волновых геодинамических процессов в подготовке катастрофических землетрясений // Геофизический журнал. 2014. Т. 36. № 4. С. 85-93.
- Рудницкая Д.И., Старосельцев В.С., Сальников А.С.* Построение макромоделей земной коры с применением Реапак-технологии по геотраверсу 3-ДВ (Восточная Сибирь) // Геофизика. 2013. № 1. С. 19-26.
- Ружич В.В., Медведев В.Я., Иванова Л.А.* Залечивание сейсмогенных разрывов и повторяемость землетрясений // Сейсмичность Байкальского рифта (прогностические аспекты). Новосибирск: Наука, 1990. С. 44-50.
- Рыбин А.К.* Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических исследований. М: Научный мир, 2011. 232 с.
- Соловьев А.А., Горшков А.И., Соловьев А.А.* Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // Физика Земли. 2016. № 6. С. 21-27.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал ГЕО, 2003. 244 с.
- Спичак В.В.* Выделение потенциальных очагов землетрясений по геофизическим данным // Физика Земли. 2016. № 1. С. 47-56.
- Степашко А.А.* Глубинные основы сейсмоструктуры Дальнего Востока: Приамурская и Приморская зоны // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30. № 1. С. 3-15.
- Стогний Г.А., Стогний В.В.* Геофизические поля восточной части Северо-Азиатского кратона. Якутск: ГУП НИПК “Сахаполиграфиздат”, 2005. 174 с.
- Трофименко С.В.* Тектоническая интерпретация статистической модели распределений азимутов гравимагнитных полей Алданского щита // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 3. С. 64-77.
- Трофименко С.В., Быков В.Г., Меркулова Т.В.* Миграция сейсмической активности в зоне конвергентного взаимодействия Амурской и Евразийской литосферных плит // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 66-80.
- Тяпкин К.Ф., Кивелюк Т.Т.* Изучение разломных зон геолого-геофизическими методами. М.: Недра, 1982. 239 с.
- Уломов В.И.* Глобальная упорядоченность сейсмогеодинамических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. С. 24-44.
- Шерман С.И.* Тектонофизическая модель сейсмической зоны: опыт разработки на примере Байкальской рифтовой системы // Физика Земли. 2009. № 1. С. 8-21.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 110 с.
- Шерман С.И.* Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 2. С. 83-117.
- Molchanov O.A.* Underlying mechanism of precursory activity from analysis of upward earthquake migration // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. V. 11. P. 135-143. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/135/2011

THE FEATURES OF FAULT TECTONICS AND DEEP STRUCTURE OF THE SEISMOACTIVE ZONES IN EASTERN PRIAMURYE

T. V. Merkulova

*Yu. A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences, Kim Yu Chen str. 65, Khabarovsk, 680000 Russia*

e-mail: merkulova@itig.as.khb.ru

Received June 21, 2018

The paper examines the spatial relationship between the seismoactive zones in eastern Priamurye ($M \geq 5$) and the regional faults and hidden fault zones identified from the gravity and magnetic anomaly axes. The seismoactive zones where earthquakes with $M \geq 5$ occurred are mostly confined to the regional faults, though such a relationship has not been validated in two cases. The seismoactive zones are detected both at the regional fault intersection and in areas where the regional faults intersect with the hidden faults of various ranks. According to the data obtained by deep seismic sounding (DSS), earthquake converted wave method (ECWM) and magnetotelluric sounding (MTS), the seismoactive zones are formed by deep inclined and subvertical faults. The indications of fluid saturation are found in the seismoactive zones from geophysical data which show that the seismoactive faults often control low-velocity and low-resistivity anomalies in the crust and upper mantle. In some cases, the Moho displacement and the dome-like flexures of the crustal and Moho boundaries are observed along these seismoactive faults and the abundance of the conversion boundaries in the crust is also noted. The deep pattern of the seismoactive faults and the revealed indications of fluid saturation allow us to consider the seismoactive zones in eastern Priamurye as the channels providing fluid supply from the mantle to the crust.

Key words: seismoactive zones, fault tectonics, deep structure, Priamurye.