

МИГРАЦИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ И СКРЫТЫЕ РАЗЛОМЫ В ПРИАМУРЬЕ

*В.Г. Быков, Т.В. Меркулова**ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена 65, 68000;
e-mail: bykov@itig.as.khb.ru*

Поступила в редакцию 4 сентября 2019 г.

Выявление тектонической нарушенности в виде скрытых разломов, т.е. не вышедших на поверхность Земли, но способных генерировать интенсивные сейсмические колебания и опасные геологические явления, является актуальной задачей для территории Приамурья. Предложен комплексный подход, в котором данные о миграции землетрясений служат первоосновой для выделения скрытых разломов, а геофизические и морфоструктурные данные привлекаются в качестве дополнительной информации для подтверждения полученных результатов. Детально изучены тенденции миграции землетрясений с оценкой ее направленности, скорости, и на этой основе установлена тектоническая нарушенность территории Приамурья; выделены скрытые разломы и их сегменты с устойчиво выраженной миграцией сейсмичности. Полученные данные о направлении миграции эпицентров и ее скорости будут способствовать решению проблемы прогноза и оценки природных опасностей на территории Приамурья.

Ключевые слова: миграция землетрясений, геодинамика, скрытые разломы, Приамурье.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция направленной миграции землетрясений предполагает наличие разломов – границ плит, блоков и других структурных элементов, в которых при динамической подвижке происходит генерирование сейсмических волн, вызывающих землетрясения. Однако в сейсмоактивных районах довольно часто связь сейсмических событий с разломами, выделенными по геологическим данным, не фиксируется, и поэтому возникает проблема выделения скрытых разломов. Выявление тектонической нарушенности в виде скрытых разломов, т.е. не вышедших на поверхность Земли, но способных генерировать интенсивные сейсмические колебания и опасные геологические явления [17], является актуальной задачей. При этом отсутствует общепринятая методика обнаружения сейсмогенерирующих разломов указанного типа.

Известно, что сейсмические события происходят преимущественно на разломах, расположенных на границах между тектоническими плитами. Относительное движение плит приводит к медленному накоплению напряжения, которое снимается во время землетрясений. Однако во внутриконтинентальных сейсмических зонах, где выявлены системы взаимодействующих разломов, распределение землетрясений происходит довольно сложным образом. Скорость переноса напряжений в каждом из таких разломов из-

меняется медленно и не является величиной постоянной, землетрясения могут группироваться в кластеры, которые со временем смещаются [44]. Так, данные о сейсмичности Северной Америки, восточной и северо-западной Европы [42] и Северного Китая [41] показывают, что землетрясения мигрируют и между разломами, которые в течение длительных периодов оставались неактивными. Тем не менее, как следует из [41], сложное пространственно-временное распределение внутриплитных землетрясений не является результатом их случайного возникновения в отдельных разломах, но отражает миграцию землетрясений на большие расстояния между системами разломов.

Взаимодействие и синхронизация разломов из-за передачи статического или динамического напряжения [14, 15, 41–43] могут значительно затруднить интерпретацию миграции внутриконтинентальной сейсмичности и выделение скрытых разломов.

Сейсмическая миграция в пределах территории Дальнего Востока достаточно подробно изучена в северо-западной части Тихого океана [5] и в Сахалино-Японском сейсмическом поясе [6]. Миграция сейсмичности на территории Приамурья детально практически не изучалась, если не считать фрагментарные исследования территории Восточного Приамурья, прилегающей к Тан-Лу-Курской зоне сейсмоактивных разломов [2], или выделения циклов силь-

ных землетрясений [29] и поиски зон современной деструкции литосферы и отдельных групп активных разломов Приамурья [35].

Других сведений о миграции эпицентров землетрясений в Приамурье нет. Отсюда возникла необходимость детального исследования направления и скорости миграции, которые характеризуют деформационный процесс в регионе.

Исследования миграции эпицентров землетрясений осуществляются, в основном, двумя подходами, которые можно условно назвать локальным и региональным [1]. Локальный подход применяется при поиске миграции сейсмичности в достаточно узких локализованных сейсмогенных зонах, например, вблизи трансформных разломов или зон субдукции. Региональный подход представляет собой анализ пространственно-временных характеристик сейсмичности в пределах обширных регионов на основе статистической обработки сейсмических каталогов. В обоих случаях обязательно выделяются направления перемещения эпицентров и определяется их скорость.

Исследование миграции сейсмичности всегда было связано со многими трудностями объективного и субъективного характера. Эти трудности определялись выбором оптимальных критериев для выделения цепочек эпицентров землетрясений, оценкой устойчивости алгоритмов выделения цепочек, субъективным выбором максимально допустимого расстояния и временного интервала между событиями в цепочке и, главное, различием в пространственных масштабах исследований. Субъективные (визуальные) методы выделения цепочек использовались, как правило, для исследования миграции на ограниченных пространственных масштабах. В прежние годы объективные статистические методы в большинстве исследований применялись редко и были слабо разработаны. К тому же, информация о миграции сейсмических событий на обширных территориях получалась «пространственно дискретной» и ее было очень сложно «сшивать», т.к. для выявления связанных в пространстве и времени линейных последовательностей землетрясений применялись разные методические приемы.

В последнее время разработаны новые методики исследования сейсмического процесса с применением современных информационно-вычислительных технологий для обработки и анализа огромных объемов исходной информации [7, 8, 20, 21, 24, 32, 40].

В настоящей работе двумя способами (анализ векторной направленности в миграции эпицентров сильных землетрясений [8] и смещения максимумов сейсмической энергии с построением пространственно-временных диаграмм [20, 40]) детально исследова-

на миграция сейсмичности, определено ее направление и скорость для зон разной ориентировки, что дает возможность установить геодинамические источники активизации разломов Приамурья.

Настоящее исследование направлено на уточнение модели сейсмичности Приамурья и ее связи с разломной тектоникой на основе выделения скрытых разломов и их сегментов с устойчиво выраженной миграцией сейсмичности.

ГЕОДИНАМИКА, СТРУКТУРА И МИГРАЦИЯ СОВРЕМЕННОЙ КОРОВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИАМУРЬЯ

Область наших исследований миграции эпицентров землетрясений охватывает территорию Приамурья, находящуюся под влиянием динамического взаимодействия Индийской и Евразийской плит (Гималайская зона коллизии), Амурской и Охотоморской плит, субдукции Тихоокеанской плиты (Курило-Камчатский и Сахалино-Японский сегменты зоны субдукции) (рис. 1). Территория Приамурья располагается в северо-восточной части Амурской плиты, вблизи области ее сочленения с Евразийской и Тихоокеанской плитами. Регион находится под воздействием горизонтального сжатия, вызванного перемещением Амурской плиты с запада на восток в результате дальнего действия коллизии Индийской и Евразийской плит [12, 29, 30], а также встречного сжатия, связанного с субдукцией Тихоокеанской плиты [24].

В [29] замечено, что западное сжатие вызывает миграцию сильных землетрясений с $M \geq 5$ с юго-запада на северо-восток со скоростью 30–50 км/год и является основным фактором деформации в регионе Приамурья. Это согласуется со сравнительной оценкой геодинамического влияния зон Индо-Евразийской коллизии и Западно-Тихоокеанской субдукции на геодинамику Байкальской рифтовой зоны [24]. Ранее [45] причиной землетрясений в Центральной и Восточной Азии предлагалось считать быстрые «десятилетние» (12–45 км/год) и «вековые» (1–7 км/год) волны пластической деформации, генерируемые при сжатии на границе Индостанской и Евразийской литосферных плит в Гималайской зоне коллизии.

Сейсмичность – одно из самых ярких проявлений современной геодинамики. Обычно сейсмические очаги приурочены к относительно узким зонам активных разломов, но на территории Приамурья распределение эпицентров землетрясений носит преимущественно рассеянный характер без каких-либо выраженных пространственно-временных тенденций, но иногда очаги эпицентров слабых землетрясений ($M > 2$) образуют на западе региона скопления [30]. Очевидной причины или преобладающего механиз-

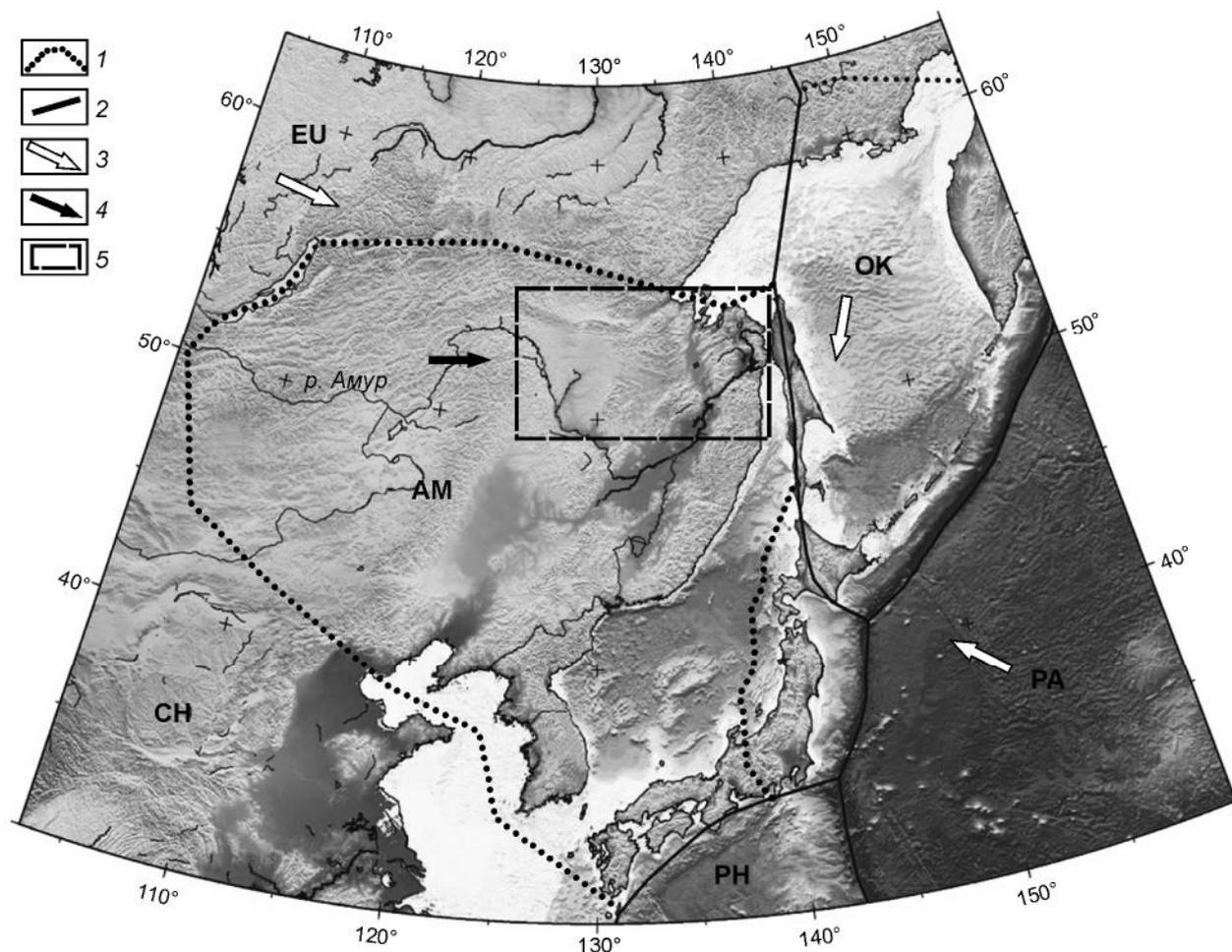


Рис. 1. Зона взаимодействия Амурской, Евразийской и Охотоморской литосферных плит и территория Приамурья. Границы и направления движения литосферных плит взяты из [37, 39].

1 – предполагаемые границы Амурской литосферной плиты; 2 – границы литосферных плит: EU – Евразийской, PA – Тихоокеанской, CH – Китайской, PH – Филиппинской, OK – Охотоморской; 3 – направление движения основных литосферных плит; 4 – направление регионального сжатия в Приамурье; 5 – границы исследуемой территории Приамурья.

ма формирования такой структуры сейсмичности не выявлено, что предполагает неоднородность поля деформаций, происходящих в регионе или наличие скрытых разломов, не имеющих четкой выраженности в геологических формациях и рельефе.

Землетрясения Приамурья относятся в основном к событиям слабой и умеренной интенсивности. Начиная с конца XIX века, в регионе было зафиксировано несколько десятков толчков с магнитудой $M \geq 4.5$, по распределению которых были выделены три сейсмических зоны [29]. Северо-восточная направленность зон, вероятно, обусловлена высокой современной активностью системы разломов Тан-Лу.

Ранее многими авторами отмечалось, что современная сейсмичность Приамурья определяется в основном активностью трансрегиональной разлом-

ной системы Тан-Лу, которая состоит из серии разломов, наиболее крупные из них: Итун-Илань, Курский, Амгунский, Хинганский [10]. Вдоль этих разломов расположены эпицентры крупнейших землетрясений и выявлены следы древних землетрясений с магнитудами в интервале $6.1 \leq M \leq 6.8$ [22, 26]. Дифференциация территории по величине выделившейся сейсмической энергии подтверждает эти данные и показывает, что наиболее активные участки земной коры Приамурья связаны с северным сегментом системы разломов Тан-Лу [9].

Направления и скорости миграции эпицентров землетрясений служат основными параметрами при исследовании волновой динамики медленных деформационных процессов, выяснении механизмов перераспределения и передачи тектонических напряже-

ний на границах блоков земной коры и установления связей между движениями тектонических структур и сопутствующими деформационными процессами. Направления и скорости миграции могут быть использованы для выявления и сопоставления относительного вклада тектонических структур в современные глобальные и региональные геодинамические процессы.

Миграция землетрясений относится к одному из основных косвенных признаков или проявлений медленных деформационных волн [18]. Волны, генерируемые в Гималайской зоне коллизии и Японско-Курило-Камчатской зоне субдукции и перемещающиеся в земной коре Приамурья, воздействуют на геоблоки различного масштаба (размера), приводя их в относительное движение. Эти движения способны также вызывать генерацию деформационных волн. Но эти волны могут иметь другие кинематические характеристики (направление, скорость, частоту, длину). Таким образом, возникает целый спектр деформационных волн с широким диапазоном скоростей (от 1 до 100 км/год) и длин (от 30 до 200 км), на которые могут реагировать «готовые к подвижкам» разломы.

С начала XX века в Приамурской сейсмической зоне имели место три цикла сейсмической активности, в каждом из которых эпицентры сильных землетрясений мигрировали с юго-запада вдоль Илань-Итунского разлома системы Тан-Лу на восток [29], т.е. в направлении, противоположном поддвигу Тихоокеанской плиты под континент. Сильные «исторические» и «инструментальные» землетрясения Приамурья фиксировались в 1888–1924 гг. и 1956–1973 гг. Характер наблюдаемой периодичности отражается в региональной миграции эпицентров сильных землетрясений. В [16] достаточно подробно представлена сейсмичность региона и приведены примеры цепочек землетрясений с $M \geq 5$, одна из которых выделена в районе сочленения Монголо-Охотского и Сихотэ-Алинского поясов (западнее г. Комсомольск-на-Амуре) и направлена с юга на север.

Диапазон скоростей миграции эпицентров землетрясений ($M \geq 5$) в Приамурье и сопредельных районах Восточного Китая в направлении с юго-запада на северо-восток составляет 30–50 км/год [29], а с учетом землетрясений в более широком диапазоне магнитуд ($4.0 \leq M \leq 7.3$) оценивается в 100–110 км/год [2], что совпадает с известными оценками скорости медленных волн тектонических деформаций [4].

Исследования динамики сейсмичности в годовых циклах вдоль северной границы Амурской плиты, часть которой находится на территории Приамурья, показали, что здесь миграция эпицентров слабых землетрясений ($2 \leq M \leq 4$) инициируется перемещением

фронта деформационной волны с востока на запад со средней скоростью 2.7 км/сут. Эта волна модулируется медленным волновым деформационным процессом со скоростью порядка 10–20 км/год, который зарождается в Японско-Курило-Камчатской зоне субдукции [38]. Направление перемещения максимумов сейсмичности совпадает с вектором перемещения фронтов деформационных волн [36]. Миграция максимумов сейсмичности в годовых циклах направлена с востока на запад, т.е. имеет западный дрейф [32, 44].

МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗА МИГРАЦИИ ЭПИЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Исследование миграции эпицентров землетрясений Приамурья проводилось на основе каталога ИТиГ ДВО РАН, в котором собраны данные о сейсмических событиях из опубликованных каталогов «Землетрясения в СССР», «Землетрясения Северной Евразии», «Землетрясения России». Для анализа использовались события с 1968 по 2015 гг., параметры очагов которых получены инструментальными методами. Наиболее представительными для территории Приамурья являются данные с 1975 по 1990 гг. Общее количество землетрясений с $M \geq 2$ порядка 3400: с магнитудой $M \geq 4.5$ – 65, в диапазоне $4.0 \leq M < 4.5$ – 83, в диапазоне $3.5 \leq M < 4.0$ – 161.

В виду умеренной сейсмичности региона, где землетрясения с $M \geq 5$ довольно редки, изучалось пространственно-временное развитие сейсмического процесса с использованием событий с $M \geq 4.5$, $4.0 \leq M < 4.5$, $3.5 \leq M < 4.0$, $3.0 \leq M < 3.5$. На первом этапе строились карты распределений землетрясений указанных диапазонов магнитуд по площади и выявлялись тенденции в миграции землетрясений. Далее была исследована миграция по системам разнонаправленных зон, выбор которых базировался в первую очередь на разломной тектонике. Положение другой части зон выбиралось исходя из карт распределения событий по площади, где направление миграции не соответствует разломам или процесс продолжается далее за их пределами. Анализ миграции землетрясений также выполнялся для событий в зонах с шириной 50 км и 100 км, аналогично области динамического влияния разломов. Следуя методике С.И. Шермана [8], для определения направления и оценки скорости миграции эпицентров были построены графики, по оси абсцисс которых откладывается длина зоны миграции, по оси ординат – даты сейсмических событий. На графиках строились линии регрессии, которые дают возможность по оценке скорости автоматически исключить события, не согласующиеся с направлением общей миграции большинства землетрясений. Вычисленная скорость фактически определена по

интервалу времени между первым и последними событиями в направлении общей тенденции миграции большинства землетрясений. Наклон линии регрессии отражает вектор движения эпицентров землетрясений, а тангенс угла наклона позволяет определить среднюю скорость, характерную для рассматриваемой зоны. Количество обособленных линий регрессии отражает число миграционных цепочек.

Для некоторых зон, где установлена миграция эпицентров землетрясений, построены пространственно-временные диаграммы сейсмической энергии по методике, основные положения которой разработаны в [20, 40]. При построении пространственно-временных диаграмм использованы данные о землетрясениях Приамурья с магнитудами $M \geq 2$. На начальном этапе производился пересчет магнитуд в энергию по соотношению Гуттенберга-Рихтера. Суммирование выделившейся энергии проводилось по годовым интервалам для ячеек размером 20×20 км в полосах шириной 50 и 100 км. В результате были получены диаграммы, образованные координатными осями: «расстояние», «время», « E_{sum} ». Наиболее близко расположенные, смещающиеся во времени максимумы сейсмической активности объединялись в цепочку, где угол наклона отражает скорость и направление распространения сейсмичности.

РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ МИГРАЦИИ ЭПИЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ОТДЕЛЬНЫХ ЗОНАХ ПРИАМУРЬЯ

Анализ распределения очагов землетрясений Приамурья с включением событий $M \geq 4.5$ показал, что в двух случаях обнаруживается однонаправленная миграция землетрясений (миграционная цепочка более 5 землетрясений) в северо-западном направлении (рис. 2). При изучении распределения землетрясений с включением очагов с $4.0 \leq M < 4.5$ и $3.5 \leq M < 4.0$ отмечается более сложный характер миграции. Для большинства зон, согласующихся с положением региональных разломов, миграция характеризуется разным направлением. Для зон северо-восточного направления землетрясения мигрируют с юго-запада на северо-восток и, наоборот, с северо-востока на юго-запад. В зонах северо-западного направления миграционный процесс развивается с северо-запада на юго-восток и в противоположном направлении – с юго-востока на северо-запад, а для субширотного направления – с запада на восток и обратно. Отмечается от одной до трех миграционных цепочек одного направления, которые включают до 12–14 событий. Миграционные цепочки могут распространяться на значительные расстояния (до 800 км). В зонах разломов субмеридиональной ориентировки миграция оча-

гов устанавливается в единичных случаях, в то время как в двух случаях миграция в субмеридиональном направлении обнаруживается вне разломов этого направления, положение которых показано на рис. 2. Миграция землетрясений по зонам этого направления носит в основном однонаправленный характер с севера на юг.

Полученные оценки величины скорости миграции показывают, что скорость по зонам северо-восточного направления с юго-запада на северо-восток составляет 7–45 км/год, в обратном направлении эта величина имеет значения 7–25 км/год. Для зон северо-западного направления с северо-запада на юго-восток значения скорости изменяются от 10 до 42 км/год, в обратном направлении – от 4 до 17 км/год. Величина скорости миграции в зонах широтного направления с запада в большинстве случаев попадает в диапазон 12–29 км/год и в единичном случае достигает 45–70 км/год, с востока – 7–18 км/год. Отсюда следует, что миграция землетрясений с запада по зонам северо-восточной, северо-западной и широтной ориентировки характеризуются значительно большей величиной скорости, чем с обратного направления (с востока). По зонам меридионального направления миграция с севера на юг характеризуется скоростью 6–30 км/год. Полученные данные согласуются с результатами проведенных ранее исследований (табл.).

Особое внимание уделено четырем зонам, в которых направленная миграция очагов землетрясений продолжается на значительное расстояние за пределы “закартированных” разломов или вообще не соответствует выраженным на дневной поверхности геологическим разломам (рис. 2).

Зона 1. При анализе распределения очагов землетрясений с магнитудами $M \geq 4.5$ в период 1972–1994 гг. устанавливается миграция очагов землетрясений с северо-запада на юго-восток со скоростью 24.2 км/год (рис. 2). Значительная часть зоны миграции проходит вблизи сближенной системы разломов северо-западной ориентировки, самый крупный из которых Южно-Тукурингский разлом протерозойского возраста [10]. Далее на юго-востоке за пределами этого разлома отмечается миграция землетрясений с $4.0 \leq M < 4.5$. Развитие процесса миграции очагов землетрясений с $M \geq 4$ характеризуется обратным направлением с юго-востока на северо-запад. На пространственно-временной диаграмме во временном интервале с 1972 по 2007 гг. выделяется упорядоченность в смещении ячеек с достаточно высокими величинами энергии с северо-запада на юго-восток (рис. 3, а). Наиболее плотное скопление ячеек с высокими значениями сейсмической энергии образуется с 1987 по 1995 гг. Также могут быть выделены

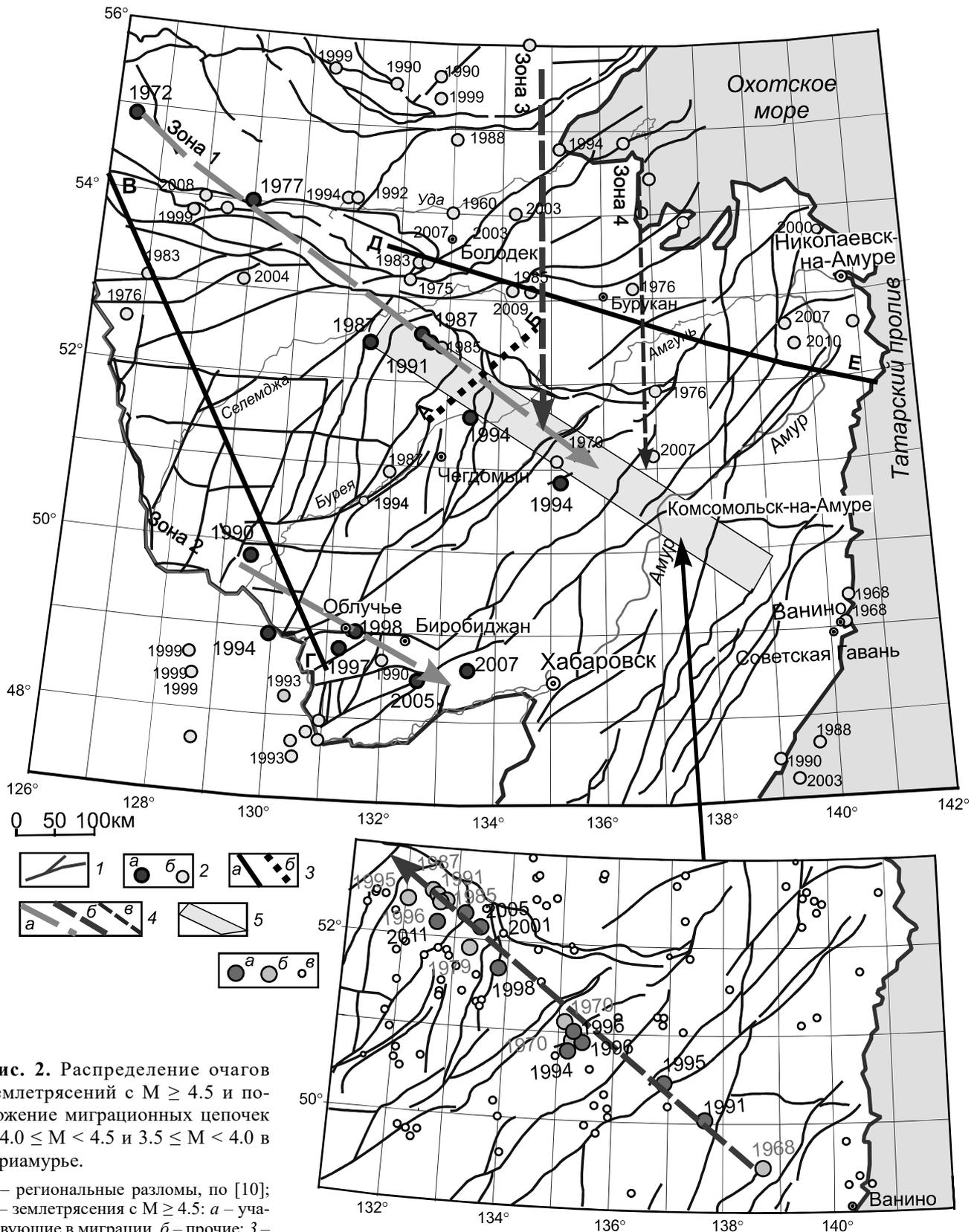


Рис. 2. Распределение очагов землетрясений с $M \geq 4.5$ и положение миграционных цепочек с $4.0 \leq M < 4.5$ и $3.5 \leq M < 4.0$ в Приамурье.

1 – региональные разломы, по [10];
 2 – землетрясения с $M \geq 4.5$: а – участвующие в миграции, б – прочие; 3 – профили глубинных геофизических исследований: а – ГСЗ, по [11], б – МТЗ, по [13]; 4 – зоны миграции землетрясений: а – $M \geq 4.5$, б – $4.0 \leq M < 4.5$, в – $3.5 \leq M < 4.0$; 5 – положение миграции землетрясений $4.0 \leq M < 4.5$, показанное на врезке. На врезке: а – миграция землетрясений с $4.0 \leq M < 4.5$ в интервале 1968–1996 гг.; б – миграция землетрясений в интервале 1991–2011 гг.; в – прочие землетрясения.

Таблица.

Расположение сейсмических зон	Направление миграции	Скорость миграции (км/год)	Магнитуда землетрясений	Источник
Приамурье и сопредельная территория Китая	ЮЗ – СВ	30–50	$M \geq 5.0$	[29]
Восточное Приамурье (от Ляодунского залива до северо-восточного побережья Сахалина)	ЮЗ – СВ СВ – ЮЗ	100–110 10	$M = 4.0–7.3$	[2]
Приамурье (территория России и Китая)	В – З З – В	– –	$M \geq 3.7$	[35]
Приамурье (западнее Комсомольска-на-Амуре)	Ю – С	–	$M \geq 5.0$	[16]
Приамурье	В – З З – В С – Ю	7–45	$M = 3.5–4.5$	данные авторов

дополнительные цепочки в обратном направлении, т.е. с юго-востока на северо-запад. В периоды 1968–1990 гг. и 1991–2011 гг. выделяются две миграционные цепочки, характеризующиеся скоростями 10.6 и 25.0 км/год, соответственно.

Зона 2. Однонаправленная миграция очагов землетрясений с $M \geq 4.5$ отмечается в интервале с 1990 г. по 2007 г. в направлении с северо-запада на юго-восток, т.е. с развитием процесса по предполагаемому разрыву северо-западного направления. На пространственно-временной диаграмме демонстрируется более сложный характер миграции. Подтверждается миграционная цепочка в направлении с северо-запада на юго-восток, скорость миграции оценивается в 21.3 км/год. Также проявляются две дополнительные цепочки по смещению ячеек сейсмической энергии в обратном направлении со скоростями 10.8 и 15.5 км/год, т.е., характер миграции с включением более слабых событий разнонаправленный, как и для первой зоны (рис. 3, б).

Зона 3. Миграция очагов землетрясений с $4.0 \leq M < 4.5$ происходит в направлении север-юг и представлена двумя цепочками во временных интервалах 1963–2010 гг. и 1997–2007 гг. (рис. 3, в). Аналогичное развитие процесса отражается на пространственно-временной диаграмме распределением ячеек, характеризующихся для двух интервалов величиной скорости в 11.6 км/год.

Зона 4. Восточнее зоны 3 выявлена миграция землетрясений с $3.5 \leq M < 4.0$ также в направлении север-юг. Установлено два интервала: первый с 1963 по 1999 гг., второй – с 1981 по 2010 гг. На пространственно-временных диаграммах фиксируется смещение ячеек, указывающее на миграцию с севера на юг со скоростью в первом интервале 14.6 км/год, во втором – 16.8 км/год (рис. 3, г). Уверенно выражен-

ных на пространственно-временных диаграммах зон смещений ячеек относительно высоких значений сейсмической энергии в обратном направлении в обоих случаях не выявлено.

ВЫЯВЛЕНИЕ СКРЫТЫХ РАЗЛОМОВ ПО МИГРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ИХ РЕАЛЬНОСТИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПРИЗНАКАМИ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ НАРУШЕННОСТИ

Для подтверждения существования скрытых разрывов по линиям миграции были использованы признаки их специфического структурно-вещественного строения: наличие магматических образований и вторичных изменений пород в теле разлома (милонитизация), повышенной трещиноватости, проницаемости, флюидонасыщенности и др. [23, 31, 33]. Эти особенности строения могут отражаться в линейных зонах мелких локальных разрывов, осях аномалий и градиентных характеристиках гравитационного и магнитного полей, упорядоченности землетрясений в линейные зоны. Более подробно применение этих признаков в качестве индикаторов скрытых разрывов описано в работах [31, 33]. Одним из значимых признаков разломов могут быть аномальные величины отношения V_p/V_s , которые отражают изменение физико-механических свойств горных массивов [3] и фиксируют геодинамически неустойчивые, подвижные флюидонасыщенные зоны [28].

Анализ распределения очагов землетрясений с $M \geq 4.5$ указывает на миграцию в зонах 1 и 2 в направлении северо-запад – юго-восток. Большая часть зоны 1 проходит вблизи системы сближенных разломов северо-западного направления, но продолжается далее от разломов к востоку миграцией более слабых землетрясений на значительное расстояние.

Миграция землетрясений в зоне 1 сопровождается разнородными признаками существования разлома северо-западного направления: локальными разрывами, аномалиями магнитного поля, упорядоченностью землетрясений в отдельных местах в линейные цепочки такой же ориентировки (рис. 4, а). Можно предполагать, что фиксируемая миграция землетрясений к востоку указывает на продолжение системы разрывов северо-западного направления вплоть до окраины континентальной части. Зона миграции пересечена профилем МТЗ, который демонстрирует сложное глубинное строение зоны. В верхней части зона представлена двумя вертикальными столбобразными неоднородностями с большим удельным сопротивлением (500–2000 Ом·м), одна из которых распространяется от дневной поверхности до глубины 40 км, другая – до 60 км. Глубже в зоне фиксируются вертикально вытянутые тела с низкими значениями сопротивлений 100–150 Ом·м и 125–150 Ом·м (рис. 4, б). Это может свидетельствовать о разломе глубинного заложения сложного строения или наличии двух сближенных разрывов.

Ширина полосы, в которой реализуются описанные миграционные цепочки, составляет порядка 100 км, что соответствует зоне динамического влияния разлома в 50 км. Такая величина, согласно оценкам С.И. Шермана, должна соответствовать разлому с длиной более 500 км [34]. Длина фиксируемой миграцией разломной зоны может достигать такой же величины и даже значительно ее превышать.

В зоне 2 геологическими методами не установлено крупных разломов северо-западного направления. Однако вдоль миграционной цепочки обнаруживаются косвенные признаки формирования скрытых разломов северо-западной ориентировки: присутствуют мелкие разломы, единичные аномалии магнитного поля. Очаги землетрясений образуют две достаточно плотные линейные зоны северо-западной ориентировки. Миграционная зона 2 совпадает с областью пониженных величин V_p/V_s , полученных по скоростным характеристикам ГСЗ. На профиле ГСЗ в верхней части миграционная цепочка проходит по зоне пониженных значений отношения V_p/V_s , ограниченной сейсмическими границами, которые на глубине объединяются в единую зону, контролирующую наклонную область пониженных значений V_p/V_s до глубины 40 км (рис. 4, в). Миграция землетрясений проходит в полосе шириной порядка 100 км, что значительно больше зоны динамического влияния разлома согласно его длине в 400 км. Этот факт может указывать на формирование нового разлома, т.к., согласно [27], ранние этапы образования разломов характеризуются наличием широкой полосы

мелких разрывов, которые объединяются и растут в размерах, что в конечном итоге приводит к возникновению магистрального сместителя. В данном случае возможно образование серии сближенных разрывов северо-западного простирания или разлома большей длины, который начинается на территории Китая.

Миграционные цепочки (зоны 3 и 4) распространены в области региональных разломов субширотного или северо-восточного направления (рис. 5, а). Однако в данном месте получены признаки скрытых разломов субмеридиональной ориентировки, согласной с направлением миграции. В зоне 3 в области прохождения миграционного цикла с $4.0 \leq M < 4.5$ большая часть землетрясений происходит вдоль центральной части крупной региональной аномалии гравитационного поля, вытянутой в субмеридиональном направлении. Субмеридиональная ориентировка аномалии подчеркивается аналогичной вытянутостью осадочных впадин мезозойско-кайнозойского возраста. Такое же направление имеет зона аномально пониженных значений V_p/V_s (рис. 5, б), которая была установлена при массовой обработке землетрясений Приамурья 1982–1984 гг. [19, 25].

Зона 4 миграционного цикла с $3.5 \leq M < 4.0$ приурочена к восточному ограничению региональной аномалии гравитационного поля субмеридиональной направленности, где отмечается серия осадочных впадин этого направления. Зона характеризуется высокой концентрацией аномалий магнитного поля, что свойственно областям растяжения (рис. 5, в). Дополнительным признаком разрывов также служит вытянутость аномалий суммарной сейсмической активности и сейсмической энергии в субмеридиональном направлении, представленных в работах [9, 25].

Миграция землетрясений в направлении северо-юг происходит по разломным зонам, которые по данным ГСЗ ограничивают область пониженных значений отношения V_p/V_s от 1.72 до 1.74 в земной коре до глубины 15 км. Сейсмическая граница с западной стороны аномальной зоны характеризуется глубинным заложением и контролирует область пониженных значений 1.61–1.74 в диапазоне глубин 27–38 км (рис. 5, в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена динамика сейсмичности и возможность идентификации скрытых разломов по параметрам миграции землетрясений на территории Приамурья. На основе двух методов (анализ векторной направленности в миграции эпицентров сильных землетрясений и смещения максимумов сейсмической энергии с построением пространственно-временных диаграмм) установлен ряд общих тенденций мигра-

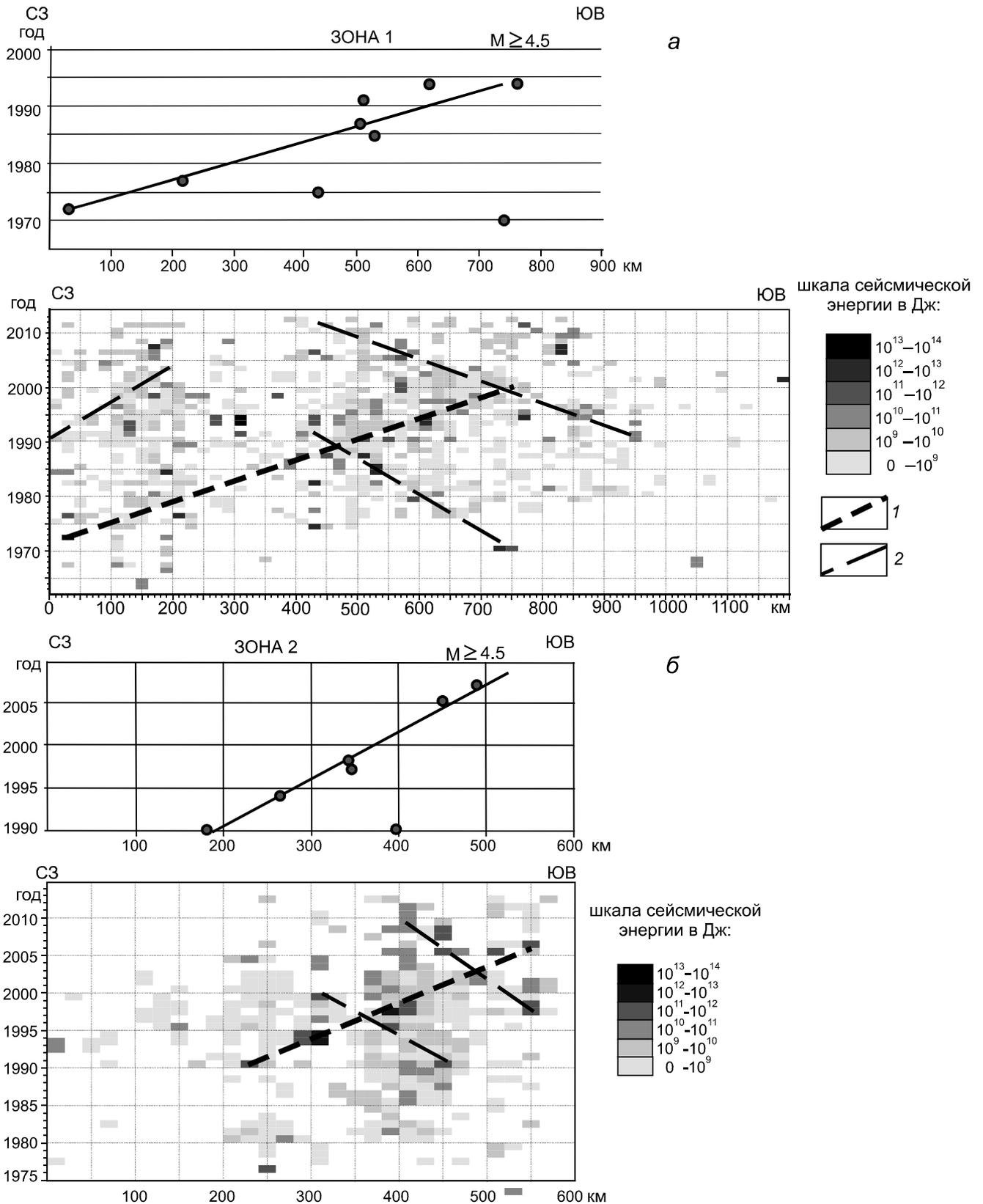


Рис. 3. Развитие миграционного процесса в отдельных зонах Приамурья.

а – миграция землетрясений с $M \geq 4.5$ и пространственно-временная диаграмма зоны 1: 1 – миграционная цепочка с северо-запада на юго-восток, 2 – дополнительные миграционные цепочки; б – миграция землетрясений с $M \geq 4.5$ и пространственно-временная диаграмма зоны 2. Условные обозначения на рис. 3, а;

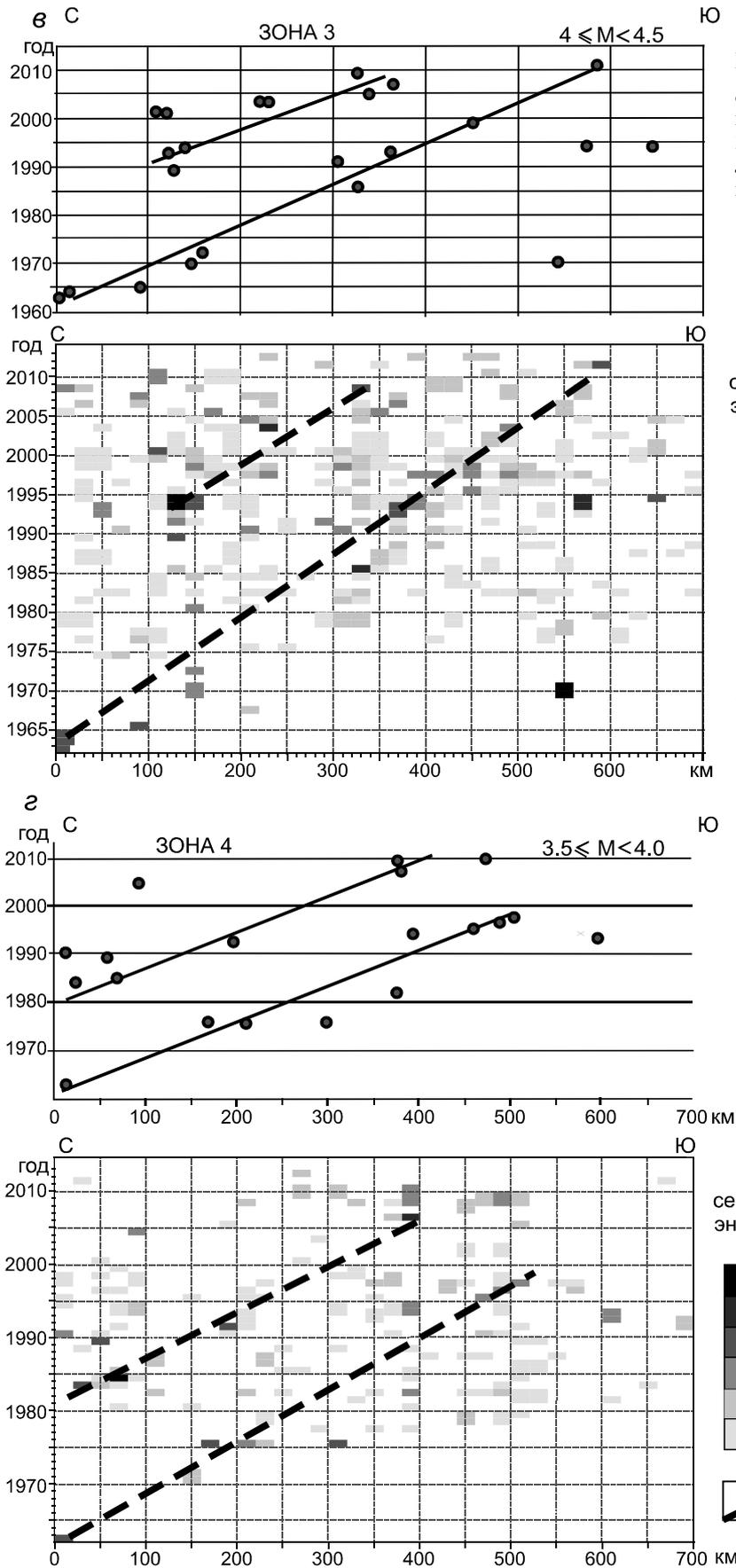
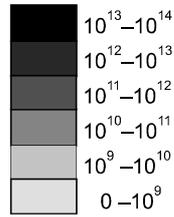


Рис. 3. (Продолжение).

v – миграция землетрясений с $4.0 \leq M < 4.5$ и пространственно-временная диаграмма зоны 3; l – миграционные цепочки с севера на юг; z – миграция землетрясений с $3.5 \leq M < 4.0$ и пространственно-временная диаграмма зоны 4; l – миграционные цепочки с севера на юг.

шкала сейсмической энергии в Дж:



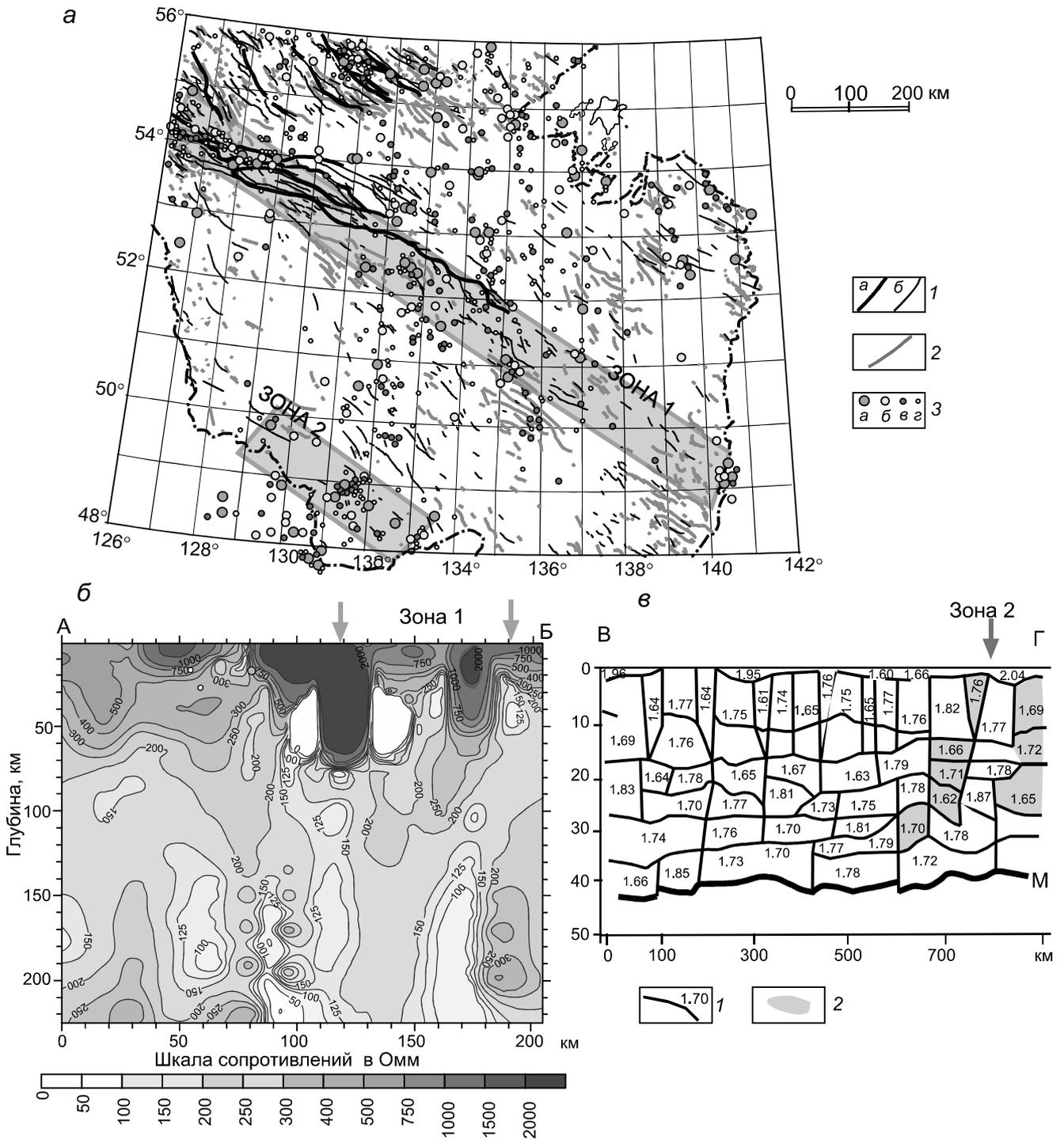


Рис. 4. Косвенные признаки разрывов северо-западного направления и положение зон 1 и 2 на глубинных разрезах. *a* – косвенные признаки разрывов северо-западного направления по результатам анализа магнитного поля и упорядоченности землетрясений: 1 – разломы, по [10]: *a* – региональные, *б* – локальные; 2 – оси аномалий магнитного поля; 3 – землетрясения: *a* – $M \geq 4.5$, *б* – $4.0 \leq M < 4.5$, *в* – $3.5 \leq M < 4.0$, *г* – $3.0 \leq M < 3.5$; *б* – глубинное строение зоны 1 по профилю МТЗ [13] (положение профиля АБ показано на рис. 2); *в* – глубинное строение зоны 2 по профилю ГСЗ (положение профиля показано на рис. 2); 1 – сейсмические границы и величина V_p/V_s , 2 – зона пониженных значений V_p/V_s .

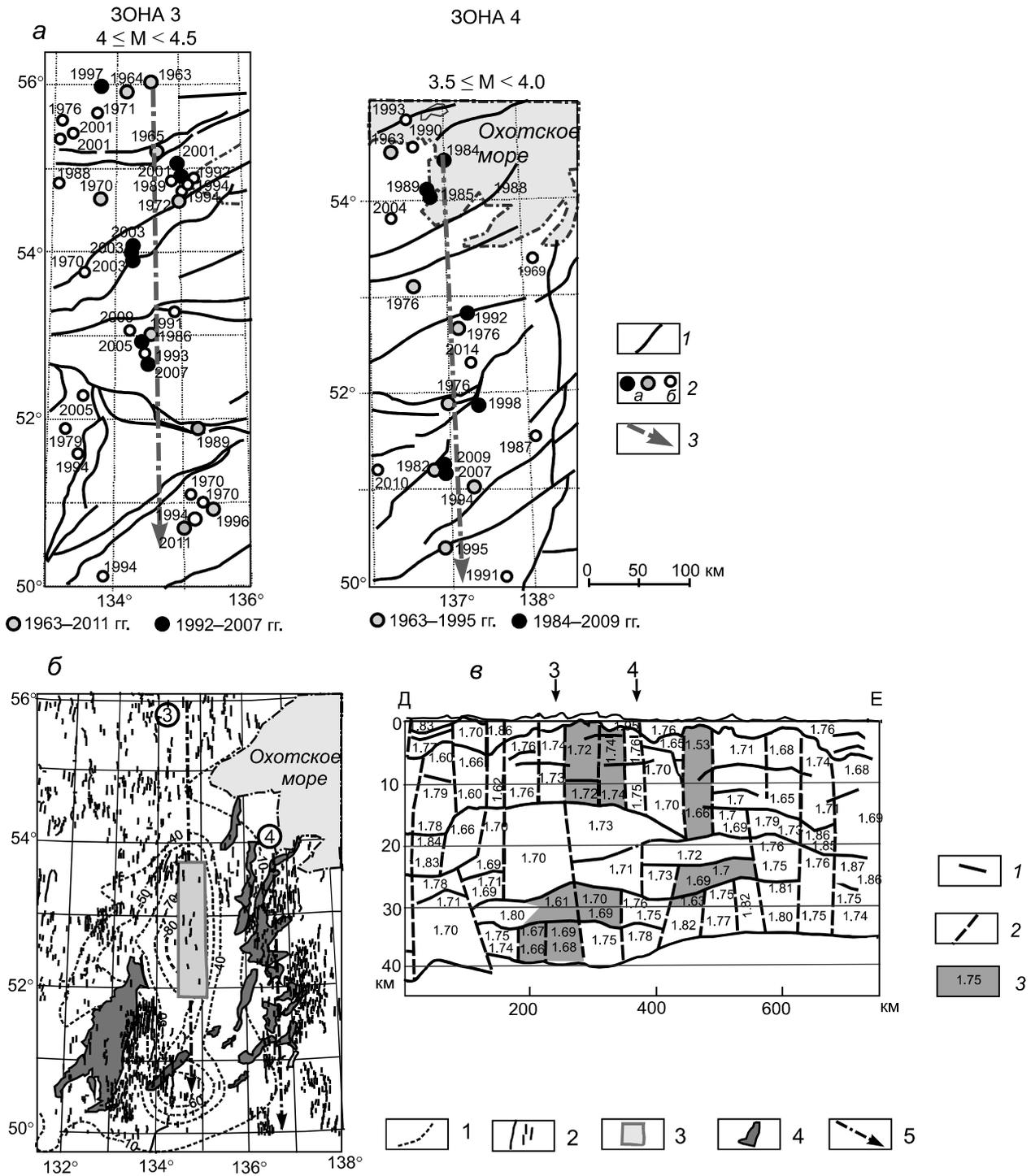


Рис. 5. Миграция землетрясений и признаки скрытых разломов субмеридионального направления в зонах 3 и 4.

а – миграция землетрясений в зонах 3 и 4: 1 – региональные разломы, по [10]; 2 – землетрясения: *а* – миграционных цепочек, *б* – прочие; 3 – миграционная цепочка и ее направление; *б* – признаки разломов субмеридионального направления: 1 – изолинии региональной аномалии гравитационного поля; 2 – оси аномалий магнитного поля; 3 – зона аномально низких значений V_p/V_s , по [19]; 4 – осадочные впадины; 5 – миграционные цепочки зон 3 и 4; *в* – зоны миграции 3 и 4 в структуре земной коры по профилю ГСЗ (положение профиля показано на рис. 2): 1 – сейсмические границы; 2 – тектонические нарушения; 3 – области пониженных значений V_p/V_s .

ции региональной сейсмичности. Предполагается, что направление и скорости миграции сейсмичности могут служить дополнительной информацией о геодинамических источниках сейсмичности Приамурья и выявлении сейсмоактивных на современном этапе скрытых разломов.

Основные результаты настоящего исследования сводятся к следующему.

Проведенный анализ миграции землетрясений и смещения зон максимального выделения сейсмической энергии по зонам разного направления на территории Приамурья расширил представления о медленных деформационных процессах на континентальной окраине Амурской плиты. Исследование миграции землетрясений с $M \geq 4.5$ и более слабых событий $3.5 \leq M < 4.5$, а также развитие сейсмического процесса, отраженное на пространственно-временных диаграммах, указывают, что миграционные цепочки с запада вызваны воздействием западного сжатия, в то время как обратное направление с востока обусловлено влиянием деформационных процессов в Тихоокеанской зоне субдукции.

Детальное изучение тенденций миграции землетрясений Приамурья и определение ее направления, скорости не только существенно дополняет полученные ранее другими исследователями результаты, но и обобщает эти данные на основе более строгих методик. Процесс миграции землетрясений при анализе миграции с включением событий $4.0 \leq M < 4.5$ развивается по сложному сценарию, периодически изменяющемуся с разнонаправленным характером. Однонаправленная миграция очагов землетрясений с $4.0 \leq M < 4.5$ и $3.5 \leq M < 4.0$ устанавливается только для зон меридионального направления с севера на юг. В большинстве случаев скорость миграции землетрясений Приамурья составляет от 7 до 45 км/год и соответствует скоростям миграции в прилегающих сейсмоактивных областях.

Сопоставление местоположения выделенных на территории Приамурья зон, где направленная миграция очагов землетрясений продолжается далеко за границы установленных разломов или вообще не соответствует геологическим разломам на дневной поверхности, с доступными данными (аномалии магнитного и гравитационного полей, профили ГСЗ, МТЗ) об известных геолого-геофизических признаках тектонической нарушенности позволяет с уверенностью утверждать, что направление миграции землетрясений может служить первоосновой для выделения скрытых разломов. Разломы такого типа, обнаруженные по миграции землетрясений в Приамурье, имеют преимущественно северо-западное и субмеридиональное простираение.

Существующие базы сейсмологической информации дают возможность выделять цепочки направленной миграции эпицентров землетрясений и таким образом определять расположение скрытых разломов в тестовом режиме без непосредственного проведения сейсмологических наблюдений. Однако использование данных только о миграции землетрясений не всегда может дать надежное выделение и масштабы скрытых разломов.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИТиГ ДВО РАН и при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Беликов В.М., Ишанкулиев Г.А. Миграция коровых землетрясений // Динамические процессы в геофизической среде. М.: Наука, 1994. С. 149–167.
2. Бормотов В.А., Войтенко А.А. Закономерности миграции землетрясений Приамурья // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17, № 2. С. 51–60.
3. Быков В.Г. Отношение скоростей продольных и поперечных сейсмических волн и физико-механические свойства горных пород // Тихоокеан. геология. 1994. № 1. С. 103–115.
4. Быков В.Г. Предсказание и наблюдение деформационных волн Земли // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 3. С. 721–754.
5. Викулин А.В. Миграция очагов сильнейших Камчатских и Северо-Курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология. 1992. № 1. С. 46–61.
6. Викулин А.В. Миграция и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений: I Российско-японский семинар, г. Хабаровск, 26–29 сентября 2000 г. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. С. 205–224.
7. Викулин А.В., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р., Иванчин А.Г., Водичар Г.М., Долгая А.А., Гусяков В.К. Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, № 3. С. 34–54.
8. Горбунова Е.А., Шерман С.И. Медленные деформационные волны в литосфере: фиксирование, параметры, геодинамический анализ (Центральная Азия) // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 18–25.
9. Диденко А.Н., Захаров В.С., Гильманова Г.З., Меркулова Т.В., Архипов М.В. Формализованный анализ коровой сейсмичности Сихотэ-Алинского орогена и прилегающих территорий // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 2. С. 58–69.
10. Забродин В.Ю., Рыбас О.В., Гильманова Г.З. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2015. 132 с.
11. Золотов Е.Е., Ракитов В.А. Структура литосферы Приамурья по данным МОВЗ-ГСЗ // Региональная геология и металлогения. 2000. № 10. С. 236–240.

12. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 5–17.
13. Каплун В.Б. Геоэлектрическая модель литосферы Комсомольского и Баджалского рудных районов по данным МТЗ // Тихоокеан. геология. 2004. Т. 23, № 6. С. 84–93.
14. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: Изд-во ГЕОС, 2016. 424 с.
15. Кузьмин Ю.О. Деформационные автоволны в разломных зонах // Физика Земли. 2012. № 1. С. 3–19.
16. Левин Б.В., Ким Чун Ун, Нагорных Т.В. Сейсмичность Приморья и Приамурья в 1888-2008 гг. // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 6. С. 16–22.
17. Макаров В.И., Шукин Ю.К. Оценка активности скрытых разломов // Геотектоника. 1979. № 1. С. 96–109.
18. Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Циклы землетрясений и тектонические волны. Душанбе: Дониш, 1989. 142 с.
19. Нагорных Т.В., Поплавская Л.И. Локализация аномалий поля скоростных характеристик среды в регионе Приморья и Приамурья // Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР. М.: Наука, 1989. С. 92–105.
20. Новопашина А.В., Саньков В.А. Особенности миграции сейсмической активности сдвиговых разломных зон на примере границ Североамериканской и Тихоокеанской плит // Тихоокеан. геология. 2015. Т. 34, № 2. С. 67–81.
21. Новопашина А.В., Саньков В.А. Миграция реализованной сейсмической энергии в различных геодинамических условиях // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 1. С. 139–163.
22. Овсюченко А.Н., Трофименко С.В., Новиков С.С., Диденко А.Н., Имаев В.С. Задачи прогноза сейсмической опасности территории Нижнего Приамурья: палеосейсмологический и сейсмологический аспекты // Тихоокеан. геология. 2018. Т. 37, № 2. С. 59–75.
23. Ребецкий Ю.Л. Закономерности разрывообразования в земной коре и тектонофизические признаки метастабильности разломов // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 3. С. 629–652.
24. Ружич В.В., Кочарян Г.Г., Левина Е.А. Оценка геодинамического влияния зон коллизии и субдукции на сейсмотектонический режим Байкальского рифта // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, № 3. С. 383–406.
25. Сафонов Д.А., Нагорных Т.В., Коваленко Н.С. Сейсмичность региона Приамурье и Приморье. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. 104 с.
26. Сейсмотектоника и сейсмическое районирование Приамурья / В.В. Николаев, Р.М. Семенов, Л.С. Оскорбин, Л.П. Карсаков, Ю.Ф. Малышев, Ф.С. Онухов, В.Н. Ставров. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние. 1989. 128 с.
27. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Вахромеев А.Г., Черемных А.В., Бобров А.А., Когут Е.И. Разломы и сейсмичность юга Сибирской платформы: особенности проявления на разных масштабных уровнях // Литосфера. 2008. № 4. С. 3–21.
28. Соколов С.Ю. Состояние геодинамической подвижности в мантии по данным сейсмотомографии и отношению скоростей Р и S волн // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. Вып. 24. № 2. С. 55–67.
29. Степашко А.А. Глубинные основы сейсмотектоники Дальнего Востока: Приамурская и Приморская зоны // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 1. С. 3–15.
30. Степашко А.А., Меркулова Т.В. Глубинная структура, генезис и сейсмическая активизация Буреинского орогена, Дальний Восток России // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 4. С. 3–17.
31. Трофименко С.В. Тектоническая интерпретация статистической модели распределения азимутов гравимагнитных полей Алданского щита // Тихоокеан. геология. 2010. Т. 29, № 3. С. 64–77.
32. 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.
33. Тяпкин К.Ф., Кивелюк Т.Т. Изучение разломных структур геолого-геофизическими методами. М.: Недра, 1982. 239 с.
34. Шерман С.И. Нестационарная тектонофизическая модель разломов и ее применение для анализа сейсмического процесса в деструктивных зонах литосферы // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8, № 1. С. 71–80.
35. Шерман С.И., Сорокин А.П., Сорокина А.Т., Горбунова Е.А., Бормотов В.А. Новые данные об активных разломах и зонах современной деструкции литосферы Приамурья // Докл. АН. 2011. Т. 439, № 5. С. 685–691.
36. 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.
37. Bird P. An updated digital model of plate boundaries // Geochem. Geophys. Geosys. 2003. V. 4, N 3. P. 1027.
38. Bykov V.G., Trofimenko S.V. Slow strain waves in blocky geological media from GPS and seismological observations on the Amurian plate // Nonlin. Processes Geophys. 2016. V. 23, N 6. P. 467–475.
39. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F. Geologically current plate motions // Geophys. J. Int. 2010. V. 181, N 1. P. 1–80.
40. Levina E.A., Ruzhich V.V. The seismicity migration study based on space-time diagrams // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6, N 2. P. 225–240.
41. Liu M., Stein S., Wang H. 2000 years of migrating earthquakes in North China: How earthquakes in midcontinents differ from those at plate boundaries // Lithosphere. 2011. V. 3. P. 128–132.
42. Scholz C.H. Large earthquake triggering, clustering, and the synchronization of faults // Bull. Seismolog. Soc. Am. 2010. V. 100, N 3. P. 901–909.
43. Senatorski P. Interactive dynamics of faults // Tectonophysics. 1997. V. 277, N 1–2. P. 199–207.
44. Trofimenko S.V., Bykov V.G., Merkulova T.V. Space-time model for migration of weak earthquakes along the northern boundary of the Amurian microplate // J. Seismology. 2017. V. 21, N 2. P. 277–286.
45. Wang S., Zhang Z. Plastic flow waves ('slow waves') and seismic activity in Central Eastern Asia // Earthquake Research in China. 2005. V.19, N 1. P. 74–85.

Рекомендована к печати А.Н. Диденко

после доработки 4.02.2020 г.

принята к печати 21.02.2020 г.

*V.G. Bykov, T.V. Merkulova***Seismicity migration and hidden faults in the Priamurye region**

The detection of tectonic fracturing zones in the form of hidden faults, which are not exposed at the surface but are capable of generating intense seismic oscillations and cause dangerous geological phenomena, is considered as a problem of vital importance to be solved in the Priamurye region. A comprehensive approach is proposed under which the earthquake migration data serve as a basis for the detection of hidden faults, and the geophysical and morphostructural data are involved as additional information to validate the obtained results. The earthquake migration tendencies are studied in detail and the migration direction and velocity are estimated. Based on these data, tectonic fracturing zones are identified in the Priamurye region and the hidden faults and their segments exhibiting persistent earthquake migration are defined. The data on the direction and velocity of the earthquake epicenter migration will contribute to the solution of the problem concerned with the forecast and natural hazard assessment in the Priamurye region.

***Key words:* earthquake migration, geodynamics, hidden faults, Priamurye.**