

Обзорная статья

УДК 550.34+551.242

DOI: 10.31857/S0869769825020019

EDN: GFTUMG

Миграция землетрясений и медленные деформационные волны

В.Г. Быков✉, Т.В. Меркулова

Виктор Геннадьевич Быков

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия

bykov@itig.as.khb.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0637-0112>

Татьяна Владимировна Меркулова

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия

merkulova@itig.as.khb.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1283-5032>

Аннотация. Исследования миграции сейсмичности дают представление о физических механизмах передачи тектонических напряжений и новые возможности для оценки опасности и прогнозирования разнообразных природных катастроф, связанных с современной геодинамической активностью. В обзоре кратко представлены основные результаты исследований миграции сейсмичности и фундаментальной проблемы переноса тектонических напряжений, полученные в Институте тектоники и геофизики ДВО РАН в последнее десятилетие.

Ключевые слова: современная геодинамика, сейсмология, деформация земной коры, скрытые разломы, миграция землетрясений, медленные деформационные волны

Для цитирования: Быков В.Г., Меркулова Т.В. Миграция землетрясений и медленные деформационные волны // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 5–16. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020019>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания № 122041100034-6 Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН.

Earthquake migration and slow strain waves

V.G. Bykov, T.V. Merkulova

Victor G. Bykov

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Chief Researcher
Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, Khabarovsk, Russia
bykov@itig.as.khb.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0637-0112>

Tatjana V. Merkulova

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher
Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, Khabarovsk, Russia
merkulova@itig.as.khb.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1283-5032>

Abstract. Research of seismicity migration provide insight into the physical mechanisms of tectonic stress transmission and new opportunities for hazard assessment and prediction of various natural disasters associated with recent geodynamic activity. The review briefly presents the main results of studies of seismicity migration and the fundamental problem of tectonic stress transfer, obtained at the Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences in the last decade.

Keywords: recent geodynamics, seismology, crustal deformation, hidden faults, earthquake migration, slow strain waves

For citation: Bykov V.G., Merkulova T.V. Earthquake migration and slow strain waves. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 5–16. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020019>

Funding. This work was performed as part of the State Assignment № 122041100034-6 for the Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences.

Введение

В науках о Земле в последние годы получила развитие концепция деформационных волн Земли или волновая динамика медленных деформационных процессов, скорости которых на много порядков меньше скоростей обычных сейсмических волн. Первоосновой этой концепции служит миграция сильных землетрясений – последовательное возникновение землетрясений, образующих упорядоченную структуру в определенном направлении. Постепенно наступило понимание, что главным механизмом направленной миграции является распространение фронта деформирования, вызывающего дополнительную тектоническую нагрузку и сейсмические подвижки в сегментах разломов. Отсюда и возникли представления о волнах миграции землетрясений.

Именно с попыток объяснить причину миграции землетрясений, обнаруженной в 1958 г. в Северо-Анатолийском разломе в Турции, началось формирование концепции медленных деформационных волн Земли. В дальнейшем было установлено, что направленная миграция землетрясений распространена на Земле повсеместно.

Современная сейсмичность Азиатского континента в значительной мере определяется тектоническими процессами – Индо-Евразийской коллизией и Западно-Тихоокеанской субдукцией. Западно-Тихоокеанская зона субдукции является наиболее сейсмоактивной в Восточной Азии. Здесь возникают самые сильные землетрясения, очаги которых находятся в относительно узких зонах активных разломов – Японском, Курильском и Камчатском глубоководных желобах.

Впервые обнаруженная в области Японской островной дуги и направленная от океана к побережью миграция сдвиговой деформации [1] привела к предположению, что одним из возможных источников медленных деформационных волн, вызывающих миграцию землетрясений, являются зоны субдукции – зоны погружения океанической плиты под континентальную. Сейсмическая активность передается как вдоль, так и поперек границ литосферных плит. Перенос деформаций в виде миграции землетрясений из Западно-Тихоокеанской зоны субдукции в сторону Азиатского континента исследован недостаточно, и особенно это относится к миграции землетрясений из глубоководных желобов.

Установленные направления и скорости миграции могут быть использованы для выявления и сопоставления относительного вклада тектонических структур в современные глобальные и региональные геодинамические процессы и в вероятностном прогнозировании сейсмической опасности.

В России и за рубежом на качественно новом уровне активизировались исследования направленной миграции землетрясений. Это связано с созданием уникальных баз данных и новых методик исследования сейсмического процесса, с применением современных информационно-вычислительных технологий для обработки и анализа огромных объемов исходной информации. Все это дает возможность получать новые количественные оценки параметров миграции землетрясений для построения волновых моделей сейсмического режима Земли. В России наиболее значительных успехов в изучении миграции деформаций и землетрясений, а также в объяснении сопутствующих эффектов достигли исследователи из ИФЗ РАН, ИО РАН, ИТПЗ РАН, ИЗК СО РАН, ИФПМ СО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИМГиГ ДВО РАН. Занимаются этой проблемой и сотрудники лаборатории сейсмологии и сейсмотектоники Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН (ИТиГ) в г. Хабаровске. Некоторые наиболее важные и интересные научные результаты ИТиГ по этому направлению исследований, имеющие как фундаментальное, так и практическое значение, представлены ниже.

Миграция сейсмичности на границах литосферных плит

В зоне взаимодействия Амурской и Евразийской литосферных плит (от Южной Якутии до Охотоморского побережья) региональная миграция сейсмической активности практически не была исследована, и это было учтено при выборе территории для статистического анализа и геодинамического моделирования миграции сейсмичности. В отличие от стандартного регионального подхода в ходе исследований ИТиГ был применен комплексный анализ перемещения эпицентров землетрясений, включающий традиционные статистические методы и методы кластерного анализа, адаптированные для градации геодинамических зон. Впервые на строго количественной основе была проведена градация геодинамических зон по сейсмическим, геоморфологическим и тектоническим критериям и особенностям.

Для изучения динамики сейсмичности и сопоставления результатов в отдельных областях исследуемая зона вдоль северной и северо-восточной частей границы Амурской и Евразийской литосферных плит была разделена на отдельные кластеры (рис. 1). При выделении кластеров принимался критерий группирования землетрясений вблизи активных разломов, геоморфологические и тектонические особенности территории. Установлено, что миграция максимумов сейсмической активности от меридионального восточного обрамления Амурской плиты до меридиональной Тукурингра-Джагдинской сейсмической зоны происходит с постоянной скоростью 16,2 град/год (2,5 км/сут). В упорядоченных по долготе кластерах максимумы сейсмической активности смещаются в течение года с востока на запад и образуют пространственные циклы (рис. 1). Период пространственной синхронизации сейсмической активности равен 7,26 градусов и точно соответствует удвоенной линейной протяженности тектонических неоднородностей [2].

Сотрудники ИТиГ в ходе исследования динамики сейсмичности вдоль северной границы Амурской плиты получили примечательный результат (рис. 2). Оказалось, что здесь миграция эпицентров слабых землетрясений ($2 \leq M \leq 4$) инициируется перемещением фронта

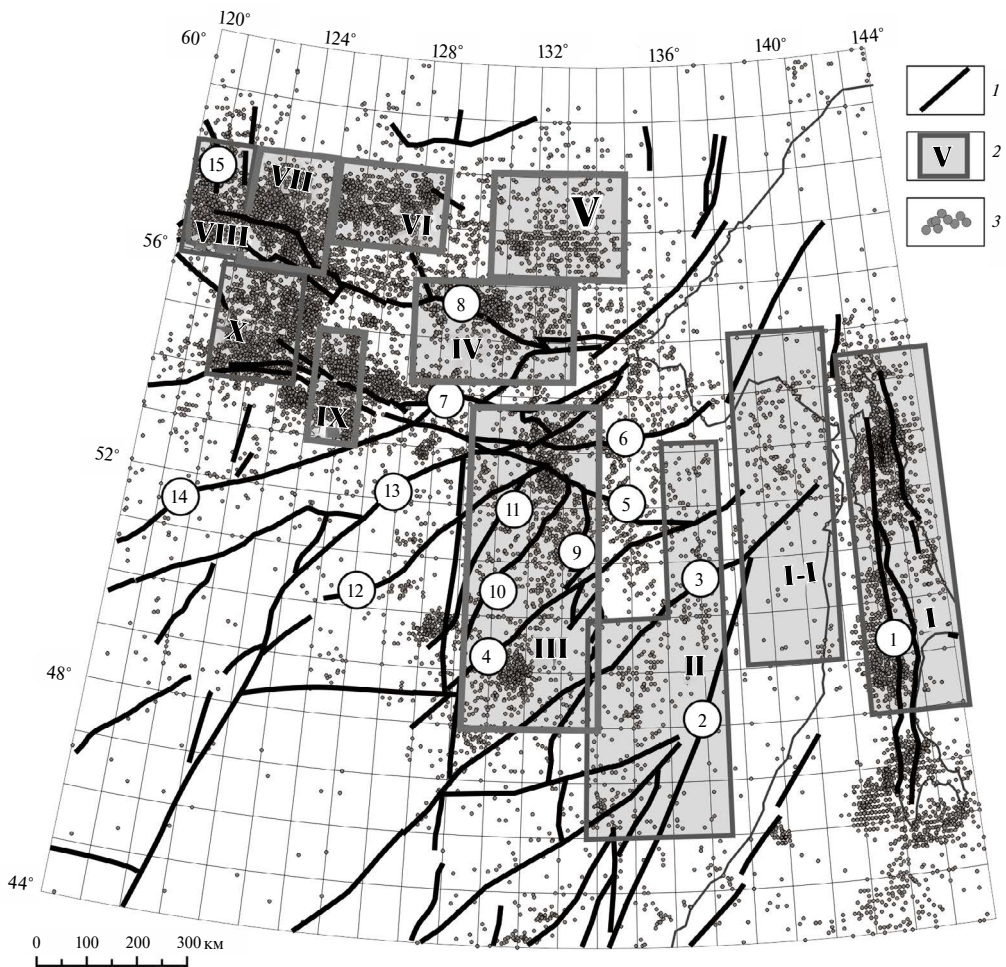


Рис. 1. Распределение очагов землетрясений в пределах северной, северо-восточной и восточной границ Амурской плиты. 1 – разломы, 2 – эпицентры землетрясений; 3 – условные границы кластеров. Условные сейсмоактивные блоки: I – Сахалин, I-I – приграничная восточная зона, II – восточная зона Тан-Лу, III – западная зона Тан-Лу, IV – юго-восточная зона Олекмо-Становой сейсмической зоны (ОСЗ), V – северо-восточная зона ОСЗ, VI – центральная зона ОСЗ, VII – западная зона ОСЗ, VIII – восточное замыкание Байкальской рифтовой зоны, IX – центральная зона южной ветви ОСЗ, X – западная зона южной ветви ОСЗ. Разломы (цифры в кружках): 1 – Центрально-Сахалинский; 2 – Центрально-Сихотэ-Алинский; 3 – Ишу-Харпинский; 4 – Хинганский; 5 – Пауканский; 6 – Тугурский; 7 – Северо-Тукурингский; 8 – Становой; 9 – Тастахский; 10 – Мельгинский; 11 – Западно-Туранский; 12 – Селемджинский; 13 – Буссе-Норский; 14 – Синлунгоу; 15 – Темулякитский

деформационной волны с востока на запад со средней скоростью около 1000 км/год [3, 4]. Эта волна модулируется медленным деформационным процессом со скоростью порядка 10–20 км/год, который зарождается в Японско-Курило-Камчатском сегменте Тихоокеанской зоны субдукции. При этом происходят синхронные квазипериодические изменения сейсмической активности в равноотстоящих зонах с пространственными периодами 360–420 км, которые сравнимы с длиной медленных деформационных волн (250–450 км), выделенных на территории Приамурья и Прибайкалья [5].

При изучении взаимосвязи геофизических полей с активными тектоническими структурами и сейсмичностью были обнаружены совпадающие по времени и по направлению перемещения аномалий полей силы тяжести и магнитных полей вблизи северной границы Амурской плиты. Миграция аномалий происходит со скоростью от 200 до 1200 км/год, сопоставимой со скоростью миграции слабой сейсмической активности ($2 \leq M \leq 4$), что может

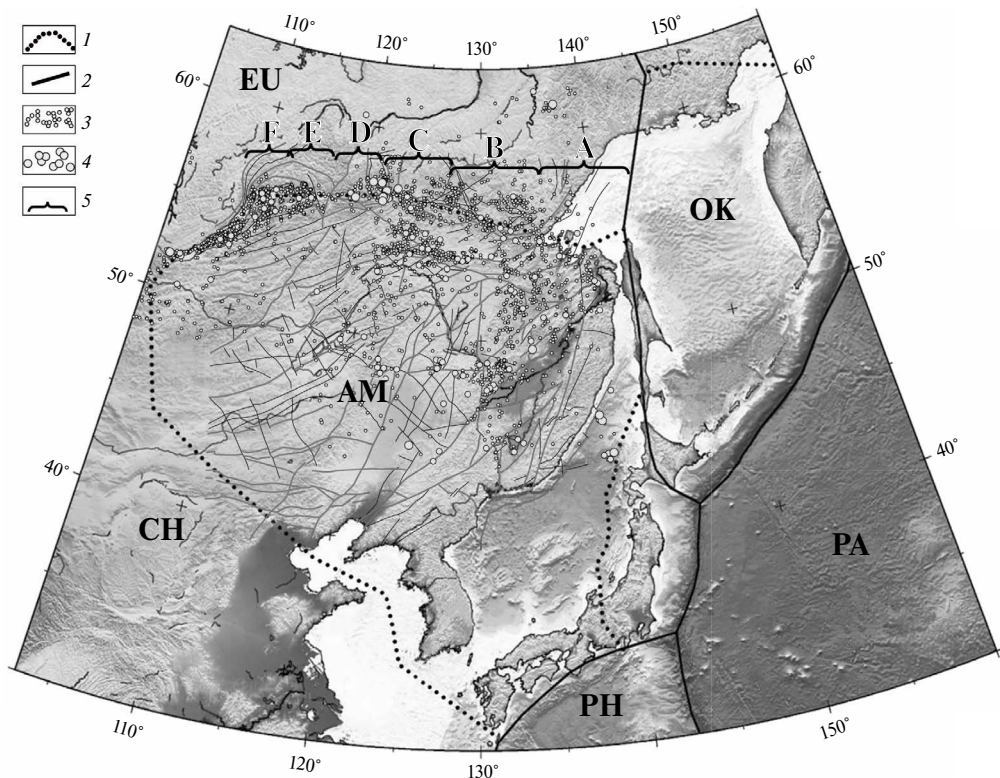


Рис. 2. Распределение эпицентров землетрясений вдоль северной границы Амурской плиты. 1 – границы литосферных плит; 2 – эпицентры землетрясений с магнитудой $M > 3$; 3 – эпицентры землетрясений с магнитудой $M > 5$; 4 – основные тектонические нарушения; 5 – пространственные циклы сейсмической активности. Литосферные плиты: EU – Евразийская, РА – Тихоокеанская, РН – Филиппинская, СН – Китайская, АМ – Амурская, ОК – Охотская

означать движение единого внутреннего источника возмущений напряженного состояния земной коры, вызывающего тектономагнитные, гравитационные и сейсмические эффекты. Этим источником может быть миграция деформаций земной коры в виде медленных волн, которые оказывают влияние на разломные зоны и, тем самым, модулируют изменение слабой сейсмической активности в течение года.

Выявленные тенденции в картине миграции эпицентров землетрясений в региональном масштабе, например, пространственные циклы с фазовым смещением максимумов сейсмической активности, позволили идентифицировать динамику сейсмичности в пределах зоны взаимодействия Амурской, Евразийской и Охотской литосферных плит как волновой процесс.

Миграция сейсмичности из Японского и Курило-Камчатского глубоководных желобов вглубь Азиатского континента

На основе данных об исторических землетрясениях на территории Китая, Японии и Кореи выявлена миграция сильнейших землетрясений ($M \sim 8$) с востока на запад из Японского и Нанкайского глубоководных желобов в континентальную часть Китая на расстояние 2600 км [6]. Миграция продолжалась в течение 130 лет (1610–1740 гг.) и представляла собой поперечную миграцию, направление которой совпадало с направлением субдукции Тихоокеанской плиты. Скорость миграции постепенно уменьшалась от желоба к континенту и составляла 20 км/год от Нанкайского желоба до Чангбайшана, 14 км/год – от Чангбай-

шана до Удалянчи, 22 км/год – от Нанкайского желоба до Танчэна, 16 км/год – от Танчэна до Иньчуаня. В этом регионе известны еще два аналогичных события поперечной миграции со скоростью 36 и 34 км/год, которые произошли с 1498 по 1556 г. и с 1843 по 1927 г. соответственно [6].

Миграция землетрясений очень похожа на распространение фронтов деформации от желоба во внутреннюю часть Японии [1, 2], т.е. также с востока на запад, но только более значительного масштаба. Скорость миграции деформации составляла 14–22 км/год [6], что сравнимо со скоростью миграции деформации земной коры в Японии (10–100 км/год [1, 7]) и скоростью миграции сейсмичности от Японской дуги в Северо-Восточный Китай через Корейский полуостров (20–30 км/год [8]).

Не менее значительный результат состоит в установлении переноса деформаций в виде миграции землетрясений субширотного направления из Западно-Тихоокеанской зоны субдукции в сторону Азиатского континента (рис. 3) [9]. Скорость миграции землетрясений по профилю АВ п-ов Камчатка – Охотск составляет от 18 до 40 км/год. Скорость миграции землетрясений ($M \geq 4,5$) через северную часть о-ва Сахалин на разных глубинных уровнях имеет значения от 20 до 40 км/год. по профилю EF, пересекающему о-в Хоккайдо, миграция землетрясений ($M \geq 4,0$) проходит со скоростью 15–23 км/год, что хорошо согласуется с данными [6, 8]. Результаты расчетов современной миграции землетрясений из зоны Японско-Курило-Камчатского глубоководного желоба вглубь Азии и выявленная японскими учеными в Восточной Азии медленная миграция деформаций с востока на запад со скоростью 10–140 км/год предполагают волновой механизм геодинамического воздействия Западно-Тихоокеанской субдукции на Азиатский континент [10].

Проведены расчеты миграции землетрясений ($M \geq 6,5$) из Японского и Курило-Камчатского желобов в сторону Азиатского континента во временном интервале с 1960 по 2015 г. по профилям, расположенным севернее тех сегментов Японского желоба, где ранее уже проводились исследования миграции деформаций и землетрясений. Расстояние между параллельными профилями составляет около 1220 км, а их протяженность достигает 3000 км по профилю, пересекающему о-в Хоккайдо, миграция землетрясений происходит со скоростью около

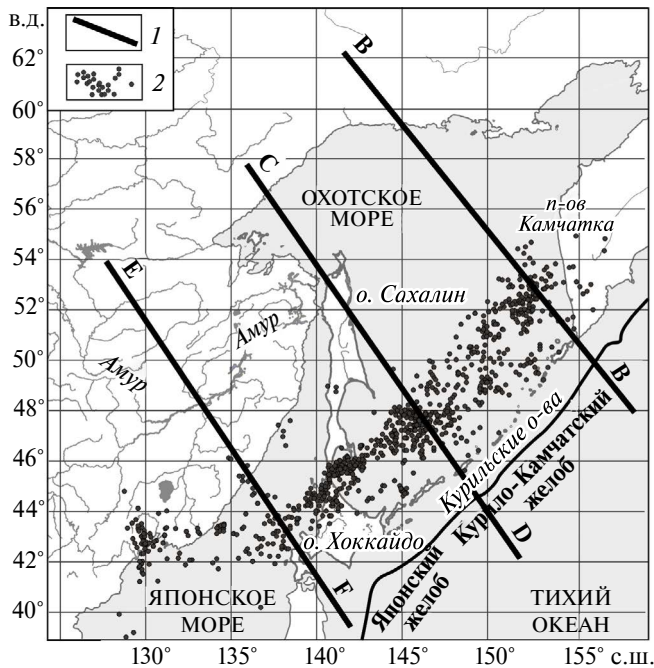


Рис. 3. Распределение сильных землетрясений в Курило-Камчатской зоне субдукции и профили исследования миграции землетрясений. 1 – положение профилей, 2 – землетрясения с $M \geq 6,0$

20 км/год, скорость миграции из Курило-Камчатского желоба через о-в Сахалин на разных глубинных уровнях имеет значения 30–40 км/год [11]. Индо-Евразийская коллизия генерирует на территории Азиатского континента последовательности землетрясений меридионального направления, а Западно-Тихоокеанская субдукция – субширотного направления [9].

Миграция сейсмичности и скрытые разломы Приамурья

В сейсмоактивных районах довольно часто связь сейсмических событий с разломами, выделенными по геологическим данным, не фиксируется, и поэтому возникает проблема выделения скрытых разломов, не вышедших на поверхность Земли, но способных генерировать интенсивные сейсмические колебания и опасные геологические явления. Скрытые разломы представляют серьезную сейсмическую опасность для многих районов Приамурья и Приморья с развитой экономикой и инфраструктурой. При этом отсутствует общепринятая методика обнаружения сейсмогенерирующих разломов указанного типа.

Сейсмическая миграция на территории Дальнего Востока была достаточно подробно исследована в северо-западной части Тихого океана [12] и в Сахалино-Японском сейсмическом поясе [13]. Миграция сейсмичности на территории Приамурья практически не изучалась, если не считать фрагментарные исследования территории Восточного Приамурья, прилегающей к Тан-Лу-Курской зоне сейсмоактивных разломов [14], и поиски зон современной деструкции литосферы и отдельных групп активных разломов Приамурья [5].

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 миграции региональной сейсмичности и возможность идентификации скрытых разломов по параметрам миграции землетрясений на территории Приамурья.

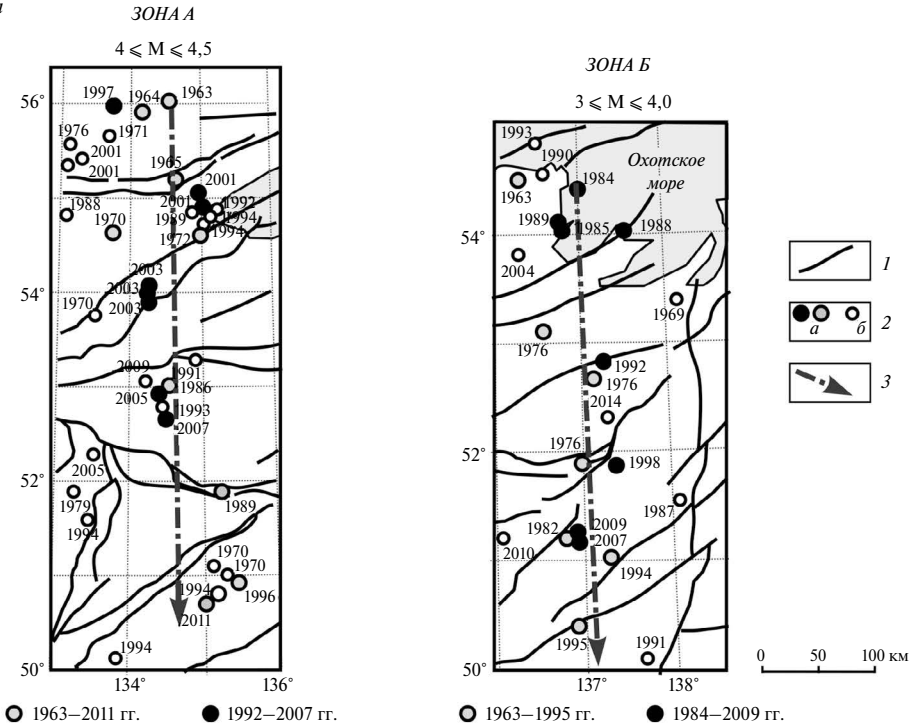
В ходе исследований предложен комплексный подход, в котором данные о миграции землетрясений служат первоосновой для выделения скрытых разломов, а геофизические и морфоструктурные данные привлекаются в качестве дополнительной информации для подтверждения полученных результатов. Детально изучены тенденции 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 (рис. 4). В большинстве случаев скорость миграции землетрясений Приамурья составляет от 7 до 45 км/год и сопоставима со скоростями миграции в прилегающих сейсмоактивных областях. Полученные данные о направлении миграции эпицентров указывают, что миграционные цепочки с запада вызваны воздействием сжатия, а миграция с востока обусловлена влиянием деформационных процессов в Западно-Тихоокеанской зоне субдукции [15].

Знание скорости миграции сейсмичности и ее направления дает возможность сделать вероятностную оценку времени и места следующего землетрясения, а также установить геодинамические источники активизации разломов Приамурья.

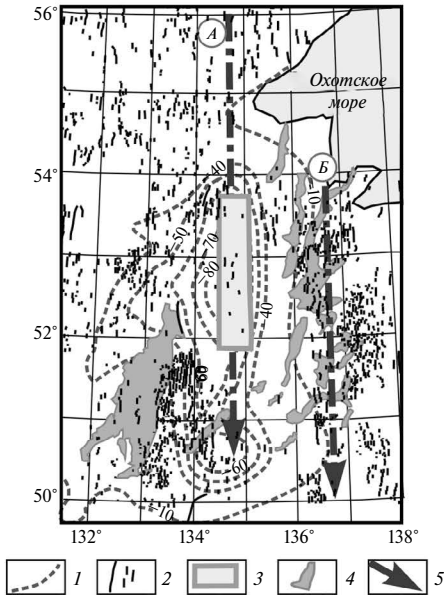
Сопоставление местоположения выделенных на территории Приамурья зон, где направленная миграция очагов землетрясений продолжается далеко за границы установленных разломов или вообще не соответствует геологическим разломам на дневной поверхности, с доступными данными (аномалии магнитного и гравитационного 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 простирание.

Каталоги землетрясений 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.

а



б



в

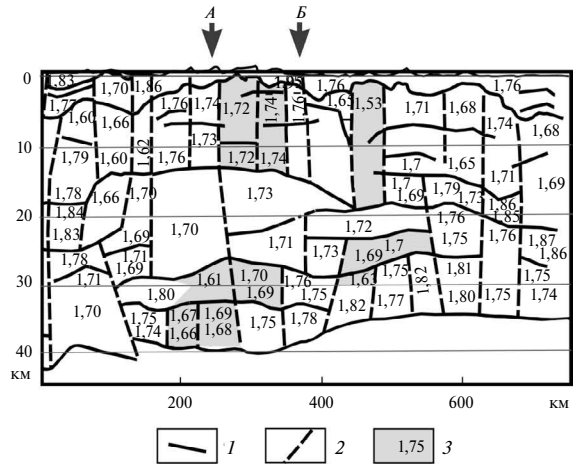


Рис. 4. Миграция землетрясений и признаки скрытых разломов субмеридионального направления. а – миграция землетрясений в зонах А и Б: 1 – региональные разломы; 2 – землетрясения (а – миграционные цепочки, б – прочие); 3 – миграционная цепочка и ее направление. б – признаки разломов субмеридионального направления: 1 – изолинии регионального поля; 2 – оси аномалий магнитного поля; 3 – зона аномально низких значений V_p/V_s ; 4 – осадочные впадины; 5 – миграционные цепочки. в – зоны миграции 3 и 4 в структуре земной коры по профилю ГСЗ: 1 – сейсмические границы; 2 – тектонические нарушения; 3 – области пониженных значений V_p/V_s

Волновая динамика медленных деформационных процессов

Волновая динамика медленных деформационных процессов включает перенос локализованной деформации и медленных возмущений геодинамических полей, вызывающих миграцию землетрясений.

Актуальность этого направления исследований определяется не только его фундаментально-поисковым характером, но и необходимостью разработки методов анализа сейсмической активизации и выделения новых прогностических признаков разнообразных природных катастроф, связанных с современной геодинамической активностью.

Основные наблюдаемые эффекты переноса локализованной деформации – волны скольжения на контакте блоков горных пород – воспроизведены в ИТиГ с применением обобщенного уравнения \sin -Гордона [16]. Предложенная модель учитывает все основные факторы неустойчивого скольжения (трение, шероховатость контакта и «зацепление» выступов) и объясняет природу уединенных деформационных волн, фиксируемых на контакте блоков. Из расчетов следует, что прохождение уединенной волны, так же, как и в лабораторных опытах [17], ослабляет контакт, что при неизменной внешней нагрузке вызывает динамическую подвижку – смещение блоков или бортов разлома. Прохождение волны вдоль разлома как бы «раздвигает» на некоторое время его борта, сжатые статическим напряжением, что приводит к скольжению блоков по разлому. Происходит так называемое дилатансионное разрыхление контакта бортов разлома [18].

Совсем недавно были рассмотрены возможные режимы переноса локализованной деформации в разломно-блоковой системе и выяснены физические условия перехода системы из нелинейного (солитонного или автоволнового) режима скольжения в режим, при котором наступает обычное диффузионное рассеяние напряжения [19]. Основным результатом состоит в том, что формирование режимов скольжения в разломах непосредственно связано с наличием в геологической среде медленной динамики, т.е. существенно более медленных, чем сейсмические, волновых процессов. Именно медленная динамика управляет скольжением в разломах, а значит, и миграцией землетрясений.

Заключение

В основе концепции миграции сейсмичности лежит идея о главенствующей роли деформационных процессов, вызывающих изменения физических параметров геологической среды, которые проявляются в геофизических полях разной природы.

Накопилось немало сведений о пространственной корреляции сейсмической и вулканической активности и миграции деформаций, на основе которых можно с полной уверенностью утверждать, что сейсмичность и извержения вулканов управляются неким волновым процессом внутри Земли и являются его проявлением на земной поверхности.

Проблема миграции сейсмичности имеет мировоззренческий характер и дает возможность построить целостное представление о коллективном поведении блоков, разломов и землетрясений, которое определяется многочисленными неразделимыми и одновременно протекающими на больших пространственно-временных масштабах процессами. Эти процессы невозможно полностью воспроизвести в лабораторных опытах или при математическом моделировании. Поэтому при решении задач современной геодинамики и физики землетрясений нужны дополнительные представления или инструменты, которые дают возможность количественно оценить поведение исследуемой системы в целом.

На наш взгляд, представления о медленных деформационных волнах (деформационных волнах Земли) являются «подходящим инструментом» для описания широкого спектра наблюдаемых особенностей обычных и «медленных» землетрясений, миграции медленного скольжения и сейсмического тремора; для понимания природы миграции сейсмичности и механизмов перераспределения и переноса тектонических напряжений. Эти представления дают возможность уже сегодня решать конкретные задачи геодинамики и сейсмологии [20–22] и даже проблемы планетарного масштаба (такие как потепление климата и разрушение ледников в полярных областях Земли [23, 24]).

Результаты исследований сотрудников ИТиГ, представленные в этом кратком обзоре, подтверждают волновой характер медленных деформационных процессов. Перечисленные достижения соответствуют современному мировому уровню научных исследований, востребованы при решении проблем современной геодинамики, служат информационной основой для выявления сейсмогенерирующих тектонических структур и уточнения природных опасностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kasahara K. Migration of crustal deformation // *Tectonophysics*. 1979. Vol. 52, No. 1–4. P. 329–341.
2. 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.
3. 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. Vol. 23, No. 6. P. 467–475.
4. 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. Seismol*. 2017. Vol. 21, No. 2. P. 277–286.
5. 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.
6. Zhao G., Yao L. Earthquake migration in East Asia mainland (I) – the migration of huge earthquakes and volcanic activity from West Pacific trench to the Chinese mainland // *Acta Seismologica Sinica*. 1995. Vol. 8, No. 4. P. 541–549.
7. Ishii H., Sato T., Tachibana K., Hashimoto K., Murakami E., Mishina M., Miura S., Sato K., Takagi A. Crustal strain, crustal stress and microearthquake activity in the northeastern Japan arc // *Tectonophysics*. 1983. Vol. 97, No. 1–4. P. 217–230.
8. Mino K. Migration of great earthquake along the subduction zone, of Japan Archipelago // *J. Seismol. Soc. Japan*. 1988. Vol. 41, No. 3. P. 375–380.
9. Bykov V.G., Merkulova T.V. Stress transfer and the impact of the India-Eurasia Collision and the Western Pacific Subduction on the geodynamics of the Asian Continent // *Open J. Earthquake Res*. 2022. Vol. 11, No. 4. P. 73–88.
10. Bykov V.G., Merkulova T.V., Andreeva M.Y. Stress transfer and migration of earthquakes from the Western Pacific subduction zone toward the Asian continent // *Pure Appl. Geophys*. 2022. Vol. 179, No. 11. P. 3931–3944.
11. Быков В.Г., Меркулова Т.В. Волновое геодинамическое воздействие тектонических процессов на Амурскую плиту // *Тихоокеан. геология*. 2021. Т. 40, № 4. С. 72–86.
12. Викулин А.В. Миграция очагов сильнейших Камчатских и Северо-Курильских землетрясений и их повторяемость // *Вулканология и сейсмология*. 1992. № 1. С. 46–61.
13. Викулин А.В. Миграция и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // *Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений: I Российско-японский семинар (Хабаровск, 26–29 сентября 2000 г.)*. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. С. 205–224.
14. Бормотов В.А., Войтенок А.А. Закономерности миграции землетрясений Приамурья // *Тихоокеан. геология*. 1998. Т. 17, № 2. С. 51–60.
15. Быков В.Г., Меркулова Т.В. Миграция сейсмичности и скрытые разломы в Приамурье // *Тихоокеан. геология*. 2020. Т. 39, № 4. С. 38–52.
16. Bykov V.G. Sine-Gordon equation and its application to tectonic stress transfer // *J. Seismol*. 2014. Vol. 18, No. 3. P. 497–510.
17. Rubinstein S.M., Cohen G., Fineberg J. Detachment fronts and the onset of dynamic friction // *Nature*. 2004. Vol. 430, No. 7003. P. 1005–1009.
18. Николаевский В.Н. Геомеханика. Современные главы. М.: ИФЗ РАН, 2014. 484 с.
19. Быков В.Г. Формирование режимов скольжения в разломах и медленные деформационные волны // *Физическая мезомеханика*. 2019. Т. 22, № 4. С. 39–46.
20. Антоновская Г.Н., Конечная Я.В., Басакина И.М. Влияние срединно-океанических хребтов на сейсмичность архипелага Новая Земля // *Геотектоника*. 2023. № 6. С. 78–93.

21. Владимирова И.С. Исследование особенностей сейсмогенной активизации Чилийской субдукционной зоны в начале XXI в. // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507, № 2. С. 309–315.
22. Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Шкарубо С.И., Ананьев Р.А., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А. Неотектоника восточной части шельфа Баренцева моря: сейсмичность, разломы и воздействие Атлантико-Арктической рифтовой системы // Вулканология и сейсмология. 2024. № 1. С. 73–89.
23. Лобковский Л.И. Возможный сейсмогенно-триггерный механизм резкой активизации эмиссии метана и потепления климата в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3 (39). С. 62–72.
24. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Владимирова И.С., Алексеев Д.А. Сильнейшие землетрясения и деформационные волны как возможные триггеры потепления климата в Арктике и разрушения ледников в Антарктике // Вестник РАН. 2023. Т. 93, № 6. С. 526–538.

REFERENCES

1. Kasahara K. Migration of crustal deformation. *Tectonophysics*. 1979;52(1–4):329–341.
2. Trofimenko S.V., Bykov V.G., Merkulova T.V. Seismicity Migration in the Zone of Convergent Interaction between the Amur Plate and the Eurasian Plate. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2015;9(3):210–222.
3. Bykov V.G., Trofimenko S.V. Slow strain waves in blocky geological media from GPS and seismological observations on the Amurian plate. *Nonlinear Processes Geophysics*. 2016;23(6):467–475.
4. 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. *Journal of Seismology*. 2017;21(2):277–286.
5. Sherman S.I. Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2013;4(2):83–117.
6. Zhao G., Yao L. Earthquake migration in East Asia mainland (I) – the migration of huge earthquakes and volcanic activity from West Pacific trench to the Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica*. 1995;8(4):541–549.
7. Ishii H., Sato T., Tachibana K., Hashimoto K., Murakami E., Mishina M., Miura S., Sato K., Takagi A. Crustal strain, crustal stress and microearthquake activity in the northeastern Japan arc. *Tectonophysics*. 1983;97(1–4):217–230.
8. Mino K. Migration of great earthquake along the subduction zone, of Japan Archipelago. *Journal of the Seismological Society of Japan*. 1988;41(3):375–380.
9. Bykov V.G., Merkulova T.V. Stress transfer and the impact of the India-Eurasia Collision and the Western Pacific Subduction on the geodynamics of the Asian Continent. *Open Journal of Earthquake Research*. 2022;11(4):73–88.
10. Bykov V.G., Merkulova T.V., Andreeva M.Y. Stress transfer and migration of earthquakes from the Western Pacific subduction zone toward the Asian continent. *Pure and Applied Geophysics*. 2022;179(11):3931–3944.
11. Bykov V.G., Merkulova T.V. The wave geodynamic impact of tectonic processes on the Amurian plate. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2021;15(4):345–358.
12. Vikulin A.V. Migratsiya ochagov sil'neyshikh Kamchatskikh i Severo-Kuril'skikh zemletryaseniy i ikh povtoryayemost'. *Vulkanologiya i Seysmologiya*. 1992;(1):46–61.
13. Vikulin A.V. Migration and oscillations seismic activity and wave motions of the Earth's crust. In: *Problems of geodynamics and earthquake forecasting*, The I Russian-Japanese workshop (Khabarovsk, September 26–29, 2000). Khabarovsk: ITiG FEB RAS; 2001. P. 205–224.
14. Bormotov V.A., Voitenok A.A. Patterns of earthquake migration in Priamurie Region. *Geology of the Pacific Ocean*. 2000;15(2):291–306.
15. Bykov V.G., Merkulova T.V. Earthquake migration and hidden faults in the Priamurye Region. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2020;14(4):326–339.
16. Bykov V.G. Sine-Gordon equation and its application to tectonic stress transfer. *Journal of Seismology*. 2014;18(3):497–510.
17. Rubinstein S.M., Cohen G., Fineberg J. Detachment fronts and the onset of dynamic friction. *Nature*. 2004;430(7003):1005–1009.
18. Nikolayevskiy V.N. *Geomekhanika. Sovremennyye glavy*. Moscow: IFZ RAN; 2014. 484 s. (In Russ.).

19. Bykov V.G. Development of sliding regimes in faults and slow strain waves. *Physical Mesomechanics*. 2020;23(3):271–278.
20. Antonovskaya G.N., Konechnaya Ya.V., Basakina I.M. The Influence of Mid-Oceanic Ridges on the Seismicity of the Novaya Zemlya Archipelago. *Geotectonics*. 2023;57(6):759–773.
21. Vladimirova I.S. Study of the features of seismogenic activation of the Chilean Subduction Zone at the beginning of the 21st century. *Doklady Earth Sciences*. 2022;507(2):1112–1117.
22. Sokolov S.Yu., Abramova A.S., Shkarubo S.I., Ananiev R.A., Moroz E.A., Zарaiskaya Yu.A. Neotectonics of the Barents Sea Shelf Eastern Part: Seismicity, Faults and Impact of the Atlantic–Arctic Rift System. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2024;18(1):64–77.
23. Lobkovsky L.I. Possible seismogenic trigger mechanism of abrupt activation of methane emission and climate warming in the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*. 2020;39(3):62–72.
24. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Vladimirova I.S., Alekseev D.A. The strongest earthquakes and deformation waves as possible triggers of climate warming in the Arctic and the destruction of glaciers in Antarctica. *Vestnik of the RAS*. 2023;93(6):526–538.