

ГЕОДИНАМИКА И ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЕЙСМИЧНОСТИ ВОСТОЧНОГО СЕГМЕНТА
АМУРСКОЙ ПЛИТЫА.А. Степашико¹, Т.В. Меркулова¹, А.Н. Диденко^{1,2}¹ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Ким Ю Чена, 65, Хабаровск, 680000, e-mail: merkulova@itig.as.khb.ru²ФГБУН Геологический институт РАН, Пыжевский пер. 7, г. Москва, 119017

Поступила в редакцию 1 февраля 2017 г.

Геодинамическая и сейсмическая активизация юго-восточной части Дальнего Востока России связана с возрождением и новообразованием деформационных зон в буферной зоне Амурской плиты при ее движении в северо-восточном направлении. Наиболее высокая коровая сейсмичность характерна для Нижнего Приамурья, в центральной части которого землетрясения магнитудой $M \geq 4.5$ формируют зону, связанную с реактивацией Буреинского орогена. Максимум регионального сжатия приурочен к меридиональному своду, под которым глубина Мохо возрастает с 36 до 40 км. Область разуплотнения в центральной части Буреинского орогена фиксируется интенсивной отрицательной аномалией силы тяжести. Современный подъем орогена определяет центробежно-подобную миграцию сейсмичности в период 1983–2009 гг., когда эпицентры землетрясений магнитудой $M \geq 5.0$ мигрировали от центра свода к его периферии.

Сильные землетрясения ($M \geq 5.0$) сосредоточены также южнее Буреинского орогена в зоне трансрегионального разлома Тан-Лу, вдоль которой очаги мигрируют в северо-восточном направлении. Геодинамическая активизация здесь определяется тангенциальным вращением (давлением) Амурской плиты, заставляющим тектонический блок центрального Сихотэ-Алиня смещаться в южном направлении. Под действием растяжения к северу от этого блока формируется коровая пластина размерами 500×950 км, которая испытывает наклон вдоль разлома Тан-Лу. На противоположной границе центрального Сихотэ-Алинского блока в области сжатия формируется одноименное горное поднятие. Блок, вращаясь по часовой стрелке, на глубине 400–600 км сталкивается с зоной субдукции Тихоокеанской плиты, где при двухстороннем давлении генерируются глубокофокусные землетрясения с магнитудой $M \geq 6.0$.

Ключевые слова: геодинамика, сейсмичность, буферная зона, Амурская плита, Дальний Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Амурская плита была впервые выделена Л.П. Зоненшайном и Л.А. Савостиным [10], исходя из расположения очагов наиболее сильных землетрясений, возникающих обычно на границах тектонических плит. Соответственно, восточная граница Амурской плиты на ее российском отрезке была проведена вдоль зоны сильных землетрясений магнитудой $M \geq 6.0$ о-ва Сахалин (рис. 1). Такой вариант конфигурации может быть обозначен как «Большая Амурская плита», и он продолжает широко использоваться при анализе кинематики плит на востоке Азии [37, 39, 41]. В этом варианте Амурская плита обязательно включает Япономорский блок, деформации и сейсмичность

которого, очевидно, определяются субдукцией Тихоокеанской плиты под окраину континента. Напротив, генезис и перемещения основной, континентальной части Амурской плиты заведомо вызваны процессами Индо-Азиатской коллизии [10].

Необходимость учитывать геодинамическую гетерогенность «Большой Амурской плиты» стала ясной при исследовании сейсмического потенциала разломной мегазоны Тан-Лу [2, 7, 22, 23, 25]. Тектоника этой мегазоны хорошо изучена в Северном Китае [38, 45, 46], где Тан-Лу разделяется на две ветви (рис. 1): западную – разлом Илань-Итун и восточную – разлом Фушунь-Мишань (другие названия: Дуньхуа-Мишань, или Дунми). Ранее Илань-Итунский отрезок

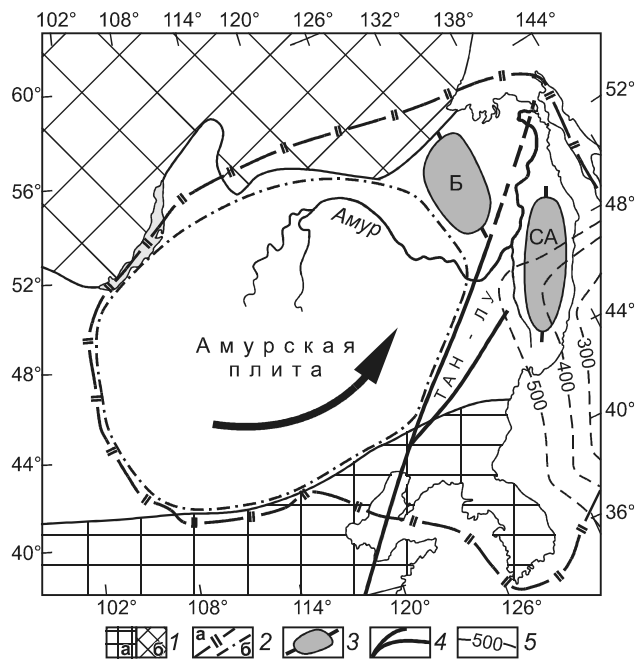


Рис. 1. Основные активизированные структуры в восточной части буферной зоны Амурской плиты.

1 – Северо-Китайский (а) и Сибирский (б) кратоны; 2 – границы Амурской плиты: а – максимальный контур, по [10], б – минимальный контур, по [11]; 3 – современные орогены: Б – Буреинский, СА – Сихотэ-Алинский; 4 – разломная мегазона Тан-Лу; 5 – изолинии зоны субдукции, в км.

мегазоны Тан-Лу рассматривался как относительно пассивный. Недавно, однако, здесь были изучены два голоценовых сейсмогенных эскарпа длиной 70 и 20 км, которые свидетельствуют о катастрофических событиях, магнитуда которых должна была превышать $M \sim 7.0$ [44]. Последнее и самое сильное из этих землетрясений, по данным радиоуглеродного датирования, произошло 1730 ± 40 лет назад. Продолжение разлома Илань-Итун мегазоны Тан-Лу на территории России прослеживается вдоль нижнего течения р. Амур [2, 22, 23, 25] в соответствии с простиранием линейной «Приамурской» зоны землетрясений магнитудой $M \geq 5.0$ [26, 27]. В этой же зоне расположены эпицентры двух известных самых сильных землетрясений Приамурья магнитудой $M \sim 6.0 \pm 0.5$, последнее из которых произошло 23.12.1914 в районе г. Николаевска-на-Амуре.

Особенности дальневосточной сейсмичности, подробно изученные в последние годы и подкрепленные первыми результатами GPS-измерений, показали необходимость переноса восточной границы Амурской плиты на запад [1, 4, 11, 20, 40]. При детальном исследовании сейсмичности предпочтение, несомненно, должен иметь современный вариант конфигурации – «Малая Амурская плита». Контур плиты в

этом случае объединяет лишь геодинамически однородную часть Центрально-Азиатского тектонического пояса (рис. 1). Такой сокращенный вариант проведения границ Амурской плиты лучше всего согласуется, что важно, и с выводами глубинных геофизических исследований [19].

Следующий важный шаг в понимании природы и особенностей сейсмичности был сделан, когда было предложено выделить область перед фронтом Амурской плиты в качестве своего рода буферной зоны [11, 12]. Исходя из понятной аналогии с речным ледоходом [8], предполагается, что фронтальная часть плиты окаймлена мозаикой относительно мелких тектонически активных блоков. Они под действием горизонтального сжатия испытывают сложные перемещения и деформации, что приводит к возрастанию сейсмической активности в буферной области. В тектонофизическом смысле удобно говорить о реактивации и новообразовании в буферной области деформационных зон разного ранга, сочетание которых формирует структуру поля напряжений вдоль фронта Амурской плиты.

Буферная зона на фронте Амурской плиты явно разделяется на два сектора (рис. 1): северный – отвечает Становому сейсмическому поясу [12, 36], восточный – включает в себя современные Буреинский и Сихотэ-Алинский орогены (от края Сибирского кратона на северо-западе до Японского моря на юге). Особенности геодинамики восточного сектора буферной зоны и закономерностям сейсмичности в этом регионе посвящена данная статья.

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И АКТИВИЗАЦИЯ БУРЕЙНСКОГО ОРОГЕНА

Нижнеамурская часть буферной зоны расположена непосредственно на фронте Амурской плиты и, видимо, по этой причине отличается наиболее сильной сейсмичностью на юге материковой части Дальнего Востока. Исторически эта активность связывалась с процессами в разломной мегазоне Тан-Лу [22, 23, 25]. Однако не меньшую роль в сейсмических деформациях Нижнего Приамурья, как показало проведенное недавно комплексное изучение [29], по всей видимости, играет Буреинский ороген. Под этим термином здесь понимается современное горное сооружение, объединяющее систему протяженных северо-восточного простирания хребтов от Селемджинского на севере до Баджальского на юге и коротких меридиональных хребтов на востоке Нижнего Приамурья. Тектоника этого сооружения и пространственно-временные особенности его активизации имеют важное значение для понимания геодинамики и сейсмичности региона.

Тектонический генезис Буреинского орогена

По нашим представлениям [29], Буреинский ороген – явно наложенное сооружение, центр которого приурочен к уникальному району, где сходятся границы главных тектонических структур: Буреинского кратонного террейна, Монголо-Охотского и Сихотэ-Алинского тектонических поясов. Здесь, по всей видимости, сочленяются основные литосферные разделы региона. Принципиально также то, что ороген находится на продолжении системы региональных разломов СВ простирания, входящих в мегазону Тан-Лу. Такая позиция в региональном строении предполагает, что появление современного Буреинского орогена произошло на завершающем палеоцен-эоценовом этапе трансляций тектонических блоков вдоль окраины континента [17, 29, 46]. Район сочленения главных тектонических структур являлся своего рода фокусом, в котором концентрировалось сжатие, вызванное перемещениями по сдвигам мегазоны Тан-Лу.

На протяжении позднего мезозоя Восточная Азия континента развивалась под воздействием «тихоокеанского» сжатия, направленного, в целом, на северо-запад. Важную роль при этом играли левосдвиговые перемещения вдоль мегазоны Тан-Лу, вызванные косою субдукцией палеотихоокеанских плит под континент. Левосдвиговое поле напряжений оставалось господствующим и при образовании Буреинского орогена на палеоцен-эоценовом этапе. Такой характер деформаций согласуется с северо-западной траекторией палеотихоокеанских плит в конце меланачале кайнозоя [43]. Радикальная смена кинематики в Нижнеамурском регионе произошла в конце миоцена, когда поле напряжений здесь приобрело правосдвиговый характер [17, 24]. В это время, вероятно, регион попал под воздействие горизонтального давления, вызванного перемещением Амурской плиты и направленного, в целом, с запада на восток. Началась активизация существовавших ранее структур, ключевым элементом которой стало возрождение Буреинской области сжатия.

Современная активизации орогенного сооружения

Закономерное и вполне наглядное отражение позиция и особенности строения Буреинского орогена находят в морфотектонике региона, где ему отвечает Турано-Буреинско-Баджальское горное сооружение [5]. Особенности рельефа четко подразделяют ороген на две части (рис. 2). В западной доминируют крупные протяженные хребты северо-восточного направления: Селемджинский, Турана, Буреинский,

Баджальский. Три последних хребта субпараллельны друг другу, и их ориентировка наследует простирание разломов мегазоны Тан-Лу. На востоке Буреинского орогенного сооружения характер рельефа резко меняется. Расположенные здесь хребты: Дуссе-Алинь, Ям-Алинь, Эзоп высокие, но короткие, их простирание имеет меридиональную или северо-западную ориентировку (рис. 2). Вместе они формируют общее Ямалинское сводовое поднятие [35], которое ориентировано субмеридионально и поперечно к господствующим на западе морфотектоническим структурам. Именно в пределах Ямалинского свода находятся 12 главных горных вершин Нижнего Приамурья, высота которых превышает 2000 м, причем высота 5 из них больше 2300 м. В этой небольшой области расположен центр Буреинского орогена, в котором происходит наиболее интенсивное воздымание, следовательно, сосредоточена современная геодинамическая активность.

Дополнительный максимум орогенного поднятия выделяется южнее, там, где находятся три другие горные вершины высотой выше 2000 м и расположен второй свод Буреинского орогена. Двойное региональное поднятие хорошо выражено в рельефе базисной поверхности, проведенной по минимальным отметкам рельефа [35]. Короткие, низкогорные хребты восточной части Нижнего Приамурья: Магу, Чаятын и другие сохраняют северо-восточную ориентировку, подчеркивая доминирующее значение разломов суперсистемы Тан-Лу в строении региона. В целом рельеф демонстрирует выраженную асимметрию Буреинского орогена с относительно пологим западным крылом и высоким, поперечно расположенным, восточным сводом, в котором интенсивность подъема максимальна. Асимметрия структуры подчеркнута крутым эскарпом (рис. 2), который на востоке отделяет Буреинский ороген от Тугур-Чукчагир-Эворонской меридиональной системы впадин.

Интенсивный подъем Буреинского орогена сопровождается разуплотнением коры и, видимо, верхней мантии, которое проявляется в сильной отрицательной аномалии гравитационного поля [29]. Положение аномалии совпадает с центральным сводом орогена, и она, так же как поверхность рельефа, имеет северный и южный максимумы (рис. 2), в северном из которых интенсивность аномалии возрастает до экстремальных значений. Области разуплотнения отвечает изолированное понижение поверхности Мохо, где мощность коры возрастает от 36 до 40 км. Позиция и простирание этого прогиба совпадают с меридиональным сводовым поднятием рельефа [29]. Выраженная асимметрия рельефа орогена является

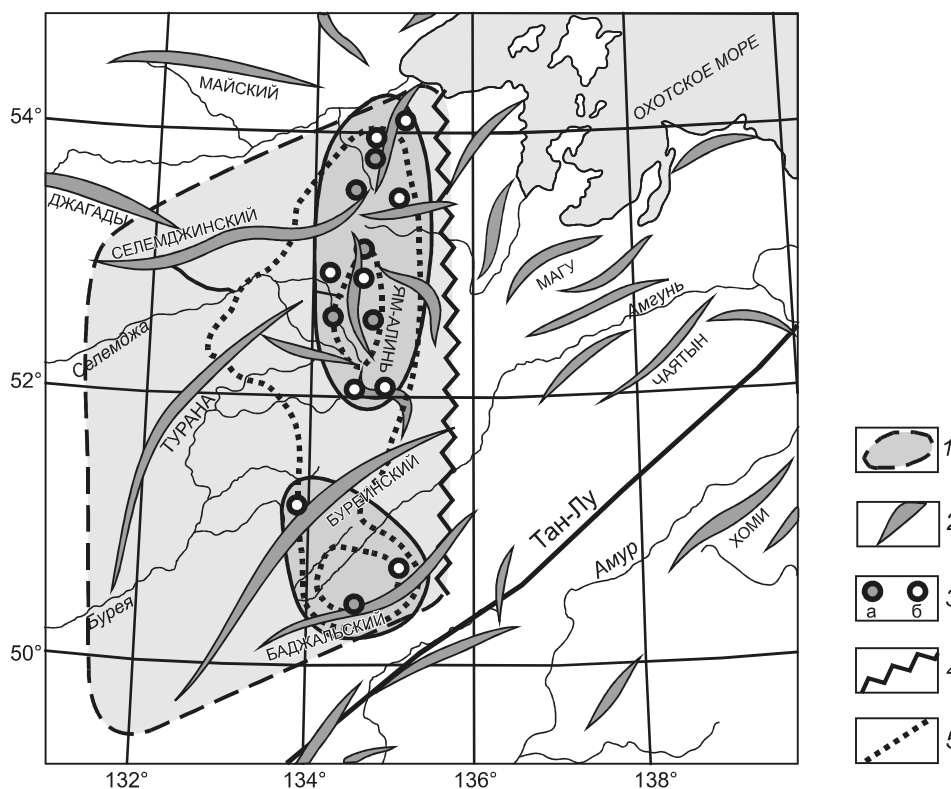


Рис. 2. Позиция Буреинского орогена в морфоструктуре Нижнего Приамурья.

1 – границы горного сооружения орогена; 2 – главные хребты; 3 – горные вершины: а – высотой > 2300 м, б – высотой > 2000 м, оконтурены два сводовых поднятия орогена; 4 – Ямалинский тектонический уступ (эскарп), по [35]; 5 – контур центра орогена по гравитационным данным, выделены два плотностных минимума.

доказательством того, что его современное возрождение вызвано горизонтальным сжатием с запада. Деформации, обусловленные давлением Амурской плиты, транслируются по северо-восточным разломам и накапливаются в области свода над местом сочленения региональных тектонических поясов.

Вклад Буреинского орогена в сейсмичность региона

Землетрясения Нижнего Приамурья обычно относятся к событиям слабой и умеренной интенсивности. За короткий период систематических наблюдений, начиная с конца девятнадцатого века, в регионе было зафиксировано лишь несколько десятков толчков с магнитудой $M \geq 4.5$. Если использовать параметры всех зафиксированных событий, то эпицентральное поле Нижнего Приамурья демонстрирует выраженный рассеянный и незакономерный характер (рис. 3 А). Даже мегазона Тан-Лу не находит определенного отражения в распределении эпицентров. Слабо проявлены в рисунке сейсмичности и литосферные разделы, ограничивающие Сибирский кратон и Монголо-Охотский тектонический пояс.

Единственная, но важная структурная особенность площадного распределения проявляется в существовании трех кластеров концентрации эпицентров на западе региона (рис. 3 А). В первом приближении эти кластеры могут быть объединены в изогнутую на восток зону меридионального направления. Как особый сейсмогенный линеймент она была впервые выделена, по-видимому, В.Е. Кузнецовым и интерпретирована им как зона сжатия на фронте литосферной пластины, надвинутой в восточном направлении [18, 23]. По мнению К. Маккея [40], именно в этом направлении, а не вдоль р. Амур, как общепринято, должна проводиться мегазона Тан-Лу. В последнее время эта полоса эпицентров все чаще используется для маркирования восточного края Амурской плиты [11, 12, 20].

Появление и позиция кластеров, в которых сосредоточены слабые землетрясения, обусловлена, по нашему мнению, геодинамически активными структурами Нижнего Приамурья (рис. 3 А). Южный максимум ($\sim 49^\circ$ с.ш., $\sim 132^\circ$ в.д.) приурочен с западной стороны к мегаразлому Тан-Лу. Центральный кластер концентрации эпицентров, вытянутый субмеридио-

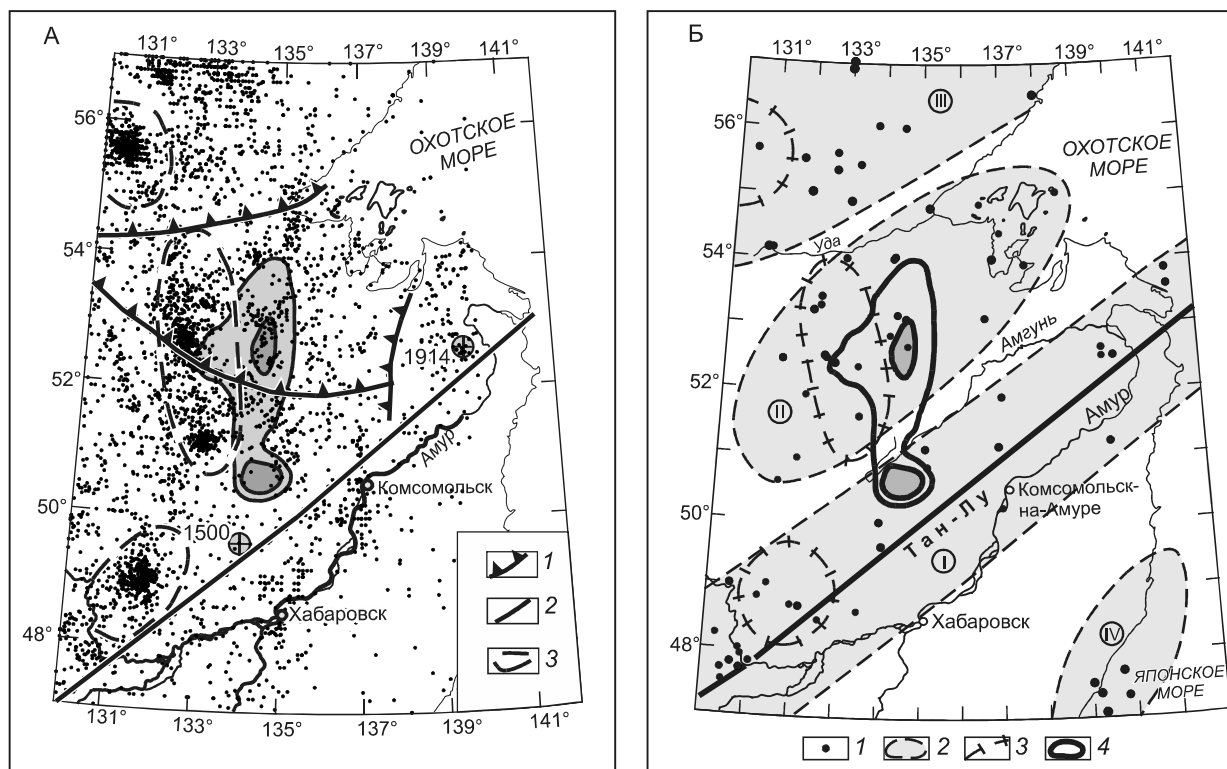


Рис. 3. Особенности эпицентрального поля Нижнего Приамурья.

А – вариации регионального распределения коровых землетрясений магнитудой $M > 2.0$ за период 1940–2011 гг., отдельно показаны эпицентры самых сильных толчков 1500 и 1914 гг. Серым тоном показана отрицательная аномалия гравитационного поля.

1 – границы Сибирского кратона и Монголо-Охотского тектонического пояса; 2 – мегаразлом Тан-Лу; 3 – три кластера концентрации землетрясений.

Б – зональность распределения сильных землетрясений. 1 – эпицентры землетрясений магнитудой $M \geq 4.5$ за период 1888–2011 гг.; 2 – сейсмические зоны: I – Приамурская, II – Буреинская, III – восточной части Станового пояса, IV – Совгаванская; 3 – кластеры концентрации эпицентров; 4 – гравитационная аномалия, фиксирующая центр Буреинского орогена.

нально вдоль меридиана $\sim 133^\circ$, с запада обрамляет центральную часть орогенного свода. В этом кластере даже намечаются два роя эпицентров, отвечающих двум центрам сжатия Буреинского орогена, которые выделяются как в рельефе, так и в аномалиях гравитационного поля. Третий кластер эпицентров находится уже на Сибирском кратоне ($\sim 55.5^\circ$ с.ш., $\sim 130.5^\circ$ в.д.), и землетрясения здесь необходимо относить к Становому сейсмическому поясу. Как на юге Приамурья в мегазоне Тан-Лу, так и в центре его, у границы Буреинского орогена, районы концентрации землетрясений смещены к западу относительно тектонических структур. Такая особенность подтверждает роль западного сжатия в геодинамической активизации региона.

Основные сейсмические зоны буферной зоны, в которых концентрируются деформации, хорошо проявлены в распределении наиболее сильных землетрясений магнитудой $M \geq 4.0$ (рис. 3 Б). В южной части Дальнего Востока обнаруживаются четыре

сейсмические зоны, две из которых расположены в Нижнем Приамурье. Первая зона, «Приамурская» по [26, 27], хорошо известна, протягивается вдоль мегаразлома Тан-Лу и, очевидно, связана с ним генетически. Положение второй сейсмической зоны Нижнего Приамурья, удобно называть ее «Буреинской», совпадает с главным северным центром орогена, в котором происходит наиболее интенсивный подъем, и где расположена самая сильная отрицательная аномалия гравитационного поля. По количеству землетрясений магнитудой $M \geq 4.0$, зафиксированных за последние ~ 100 лет, «Буреинская» зона не уступает «Приамурской». Именно двум выделенным сейсмическим зонам отвечают южный и центральный кластеры эпицентрального поля (рис. 3 Б), что подчеркивает единую природу сейсмической активности в регионе. Третий кластер, очевидно, соответствует сейсмической зоне, объединяющей толчки магнитудой $M \geq 4.0$, которая расположена на краю Сибирского кратона.

Анализ сейсмической зональности предполагает, что подъем Буреинского орогена является главным фактором образования сильных землетрясений в центральной части Нижнего Приамурья. С деформациями коры над сводом, по всей видимости, связано и смещение гипоцентров снизу вверх, при одновременном уменьшении магнитуды толчков, ранее обнаруженное в Нижнем Приамурье при детальном мониторинге сейсмичности 1983–2002 гг. [5]. Периодическая вертикальная миграция, с глубины ~ 30 км до ~ 10 км, обнаруживается также для сильных землетрясений двадцатого столетия в мегазоне Тан-Лу [26]. Процесс геодинамической активизации в регионе имеет, видимо, глубинную природу, и деформации распространяются от основания коры в направлении земной поверхности.

ГЕОДИНАМИКА НИЖНЕАМУРСКОЙ КОРОВОЙ ПЛАСТИНЫ

Механизма активизации орогена, объясняющего генезис сильных землетрясений над центром воздымания, однако, недостаточно для понимания северо-восточного удлинения Буреинской сейсмической зоны (рис. 3 Б). Такое простираие ее ортогонально к меридиональному положению центрального поднятия орогена предполагает существование дополнительно геодинамического фактора, воздействующего на деформационное поле Нижнего Приамурья.

Морфотектоника коровой пластины

Важную независимую информацию для понимания региональных деформаций содержит карта вертикальных движений земной поверхности, построенная по данным повторного инструментального нивелирования [16]. В Нижнем Приамурье она показывает, как отмечалось [21], закономерную смену поднятия опусканием в направлении с северо-запада на юго-восток (рис. 4 А). Парадоксально, но Буреинский орогенный массив при прямом геодезическом изучении как единая доминирующая структура воздымания не обнаруживается. Он расположен в обширной области умеренного поднятия, которое происходит со скоростью ~ 2–3 мм/год.

Ключевым элементом вертикальных деформаций в Нижнем Приамурье является широкая область опускания, в центре которой и параллельно р. Амур протягивается мегаразлом Тан-Лу (рис. 4 Б). В полосе вдоль Тан-Лу сосредоточены все участки быстрого погружения, в которых происходит опускание со скоростями до ~ 4–11 мм/год. В северо-западном направлении область погружения сменяется областью медленного, а затем интенсивного поднятия. Здесь

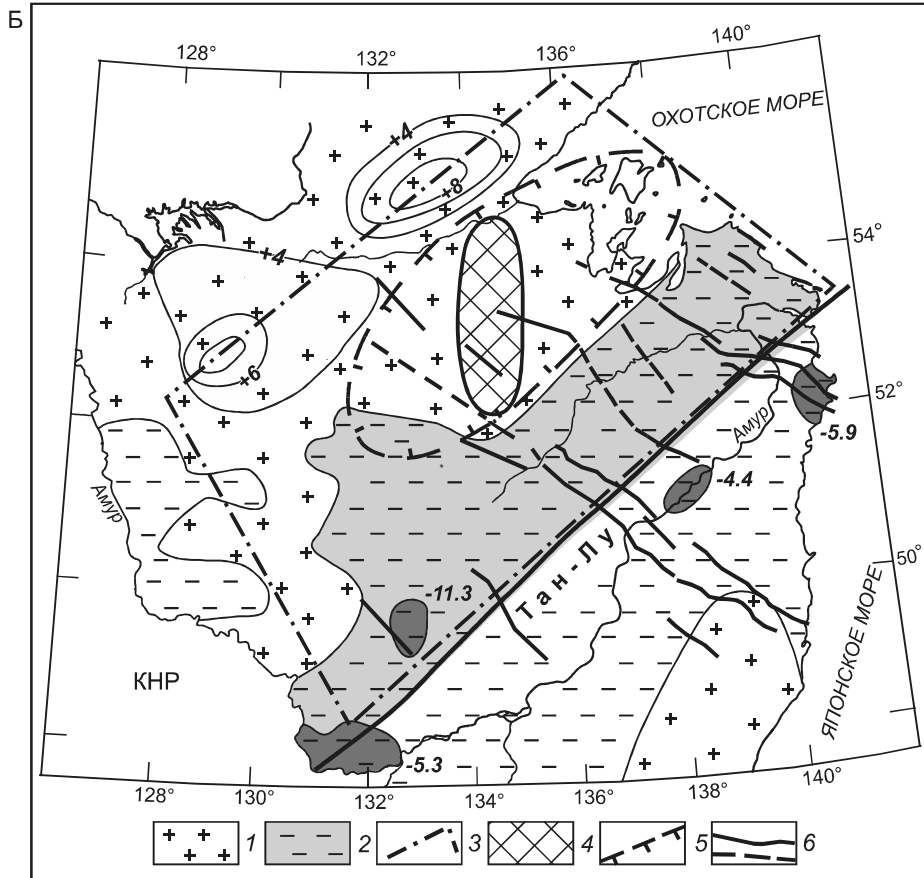
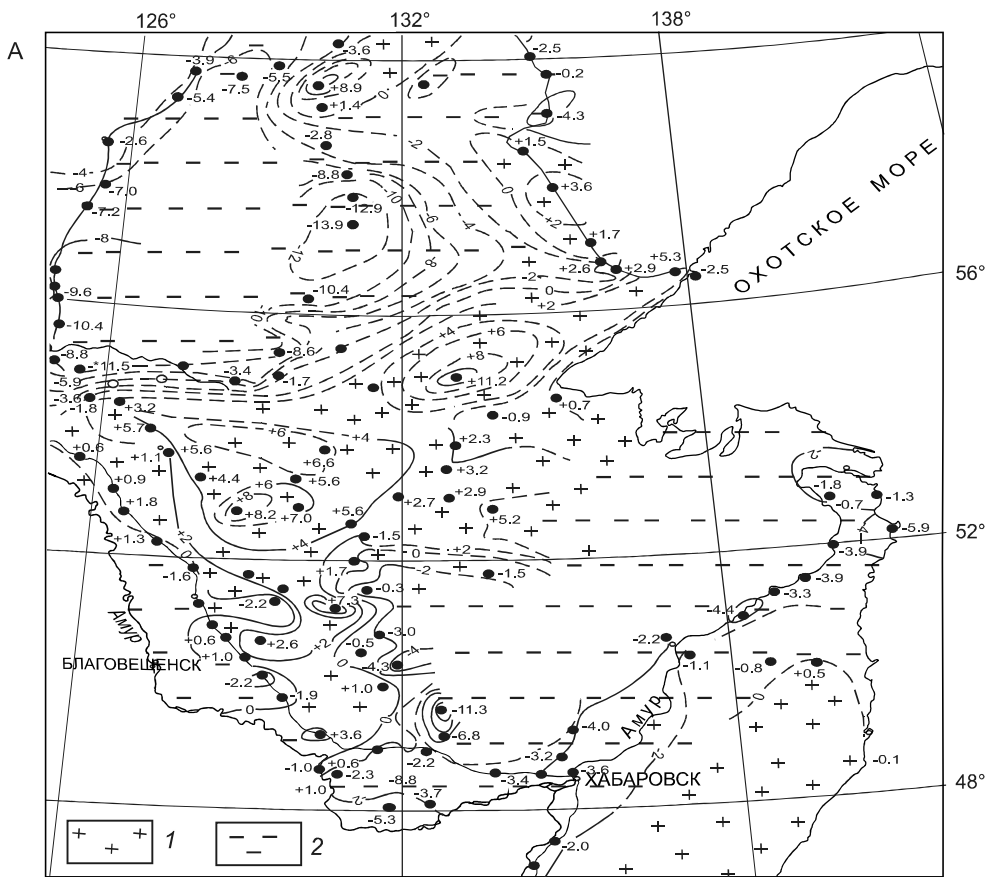
на карте повторного нивелирования обнаруживаются два сближенных максимума (рис. 4 А), в которых скорость воздымания достигает 8–11 мм/год. Цепь двух поднятий ориентирована на северо-восток, параллельно зоне мегаразлома Тан-Лу. Геометрически, таким образом, все Нижнее Приамурье может быть представлено как корова мегапластина или микроплита, площадью ~ 950 на ~ 500 км. Юго-восточный край мегапластины в настоящее время погружается вдоль разлома Тан-Лу, что сопровождается интенсивным подъемом ее противоположного северо-западного края.

Наряду с Буреинским орогеном, Нижнеамурская микроплита является еще одной активизированной структурой буферной зоны, испытывающей, судя по данным повторного нивелирования, интенсивные современные деформации (рис. 4 Б). Северо-восточное простираие Буреинской сейсмической зоны параллельно южному краю пластины вдоль мегазоны Тан-Лу. Именно вдоль такого продольного направления наклон и деформации коровой пластины близки к постоянным значениям. Естественно предполагать, что деформации Нижнеамурской пластины при наклоне должны сопровождаться также оживлением поперечных тектонических нарушений. Интересно, что цепочки слабых землетрясений Нижнего Приамурья часто трассируют линеаменты северо-западного простираия, которые как раз ориентированы в направлении наклона коровой пластины.

Таким образом, если положение центра Буреинской сейсмической зоны обусловлено орогенным поднятием, то ее выраженное удлинение, по-видимому, отражает особенности деформаций Нижнеамурской пластины.

Генезис Нижнеамурской тектонической пластины (микроплиты)

В генезисе Нижнеамурской мегапластины важную роль, видимо, сыграл подъем Буреинского орогена, который сопровождался своего рода потерей прочности верхнего слоя коры в буферной зоне. Но главная причина наблюдаемых деформаций мегапластины связана с опусканием ее юго-восточного края вдоль мегаразлома Тан-Лу. Анализ землетрясений на юге Дальнего Востока показывает [26–28], что здесь проходит северо-западная граница Сихотэ-Алинского литосферного блока, который, вращаясь, движется в южном направлении (рис. 5). При его горизонтальном перемещении возникает, очевидно, линейная зона растяжения вдоль северной границы блока, там, где происходит опускание края Нижнеамурской мегапластины. По всей видимости, оба тектонофизиче-



ских процесса, и вертикальное поднятие орогена, и горизонтальное вращение Сихотэ-Алинского блока, взаимодействуя, формируют поле деформаций мегапластины и контролируют сейсмичность Нижнего Приамурья.

Объяснение динамики активизации сейсмогенных нарушений

Детальный мониторинг сейсмического режима Нижнего Приамурья, проведенный В.А. Бормотовым с соавторами, обнаружил необычную пульсацию активности сейсмогенных линеаментов в период 1983–2002 гг. [5]. В первой половине периода с 1983 по 1987 гг. наблюдалась синхронная активизация линеаментов субмеридионального направления (рис. 6 А). Это начало сейсмического цикла, и, судя по расположению линеаментов, активизация деформаций связана с поднятием Буреинского орогена. Землетрясения этого времени преимущественно имеют магнитуду $M \geq 2.5$ и происходят на значительной глубине. Через 10 лет структурный рисунок принципиально изменился. Доминирующую роль в интервале 1998–2002 гг. стали играть, по данным мониторинга, линеаменты северо-западного и сопряженного северо-восточного простирания (рис. 6 Б). Именно эти направления нарушений отвечают геометрии и деформациям Нижнеамурской коровой пластины. Линеаменты этой диагональной системы трассируются преимущественно слабыми толчками с магнитудами в диапазоне $M = 1.3-1.8$. Очаги этих землетрясений главным образом сосредоточены в верхнекоровом горизонте [5]. Все тенденции предполагают, что сейсмический процесс развивался в цикле снизу вверх. В начале цикла активизировалась глубинная структура Буреинского орогена. По мере развития процесса интенсивность сейсмичности снижалась, но усиливались более поверхностные деформации Нижнеамурской коровой пластины и возникали линеаменты, отражающие смену поля напряжений.

Рис. 4. Особенности морфологии и деформаций Нижнеамурской мегапластины (микрочелюсти) по результатам повторного нивелирования.

А – фрагмент карты современных вертикальных движений по геодезическим данным [16]. Области поднятия (1) и опускания (2) показаны изолиниями.

Б – геометрия Нижнеамурской мегапластины.

1 – области преимущественного поднятия, изолиниями показаны два максимума подъема, значения изолиний в мм/год; 2 – область преимущественного опускания, темно-серым выделены районы быстрого погружения, цифры – максимальные значения в мм/год; 3 – границы мегапластины; 4 – центр Буреинского орогена; 5 – контур Буреинской сейсмической зоны; 6 – линеаменты СЗ простирания.

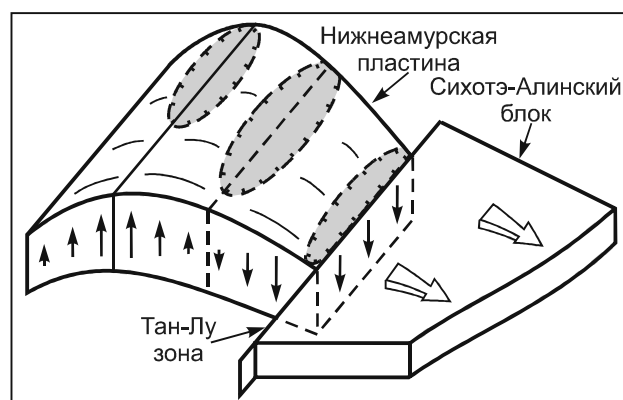


Рис. 5. Принципиальная модель образования и наклона Нижнеамурской мегапластины при горизонтальном вращении Сихотэ-Алинского тектонического блока. Серым тоном показано параллельное положение сейсмических зон.

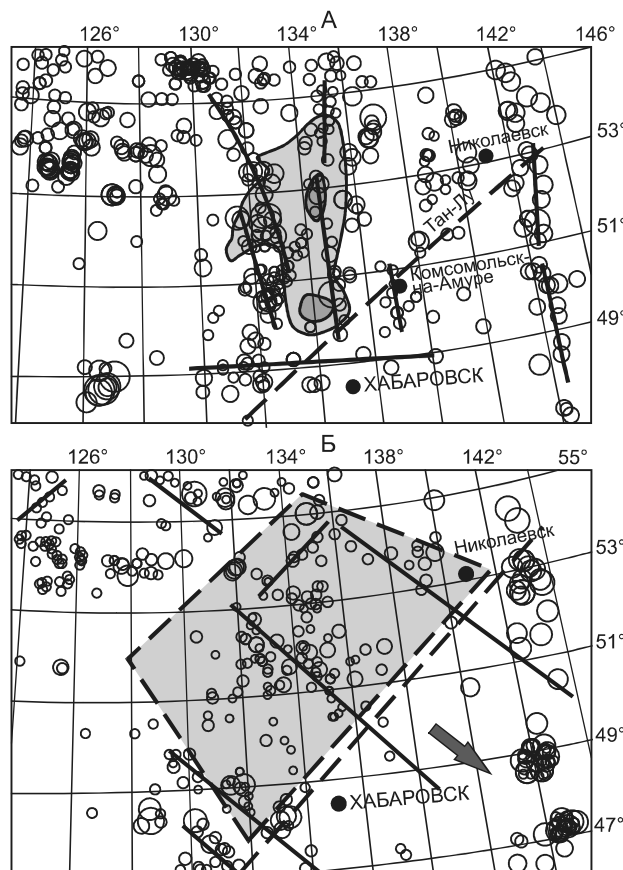


Рис. 6. Смена рисунка сейсмогенных линеаментов Нижнего Приамурья при усилении сейсмической активности в течение цикла в соответствии с [5].

А – начало сейсмического цикла в 1983–1987 гг., активизируются зоны нарушений, обрамляющие ороген, центральная часть которого выделена серым цветом.

Б – развитие сейсмического цикла в 1998–2002 гг., активизируются нарушения, связанные с деформацией Нижнеамурской мегапластины, показанной серым тоном, стрелкой отмечено направление растяжения и наклон мегапластины. Кружки – эпицентры землетрясений глубиной менее 70 км.

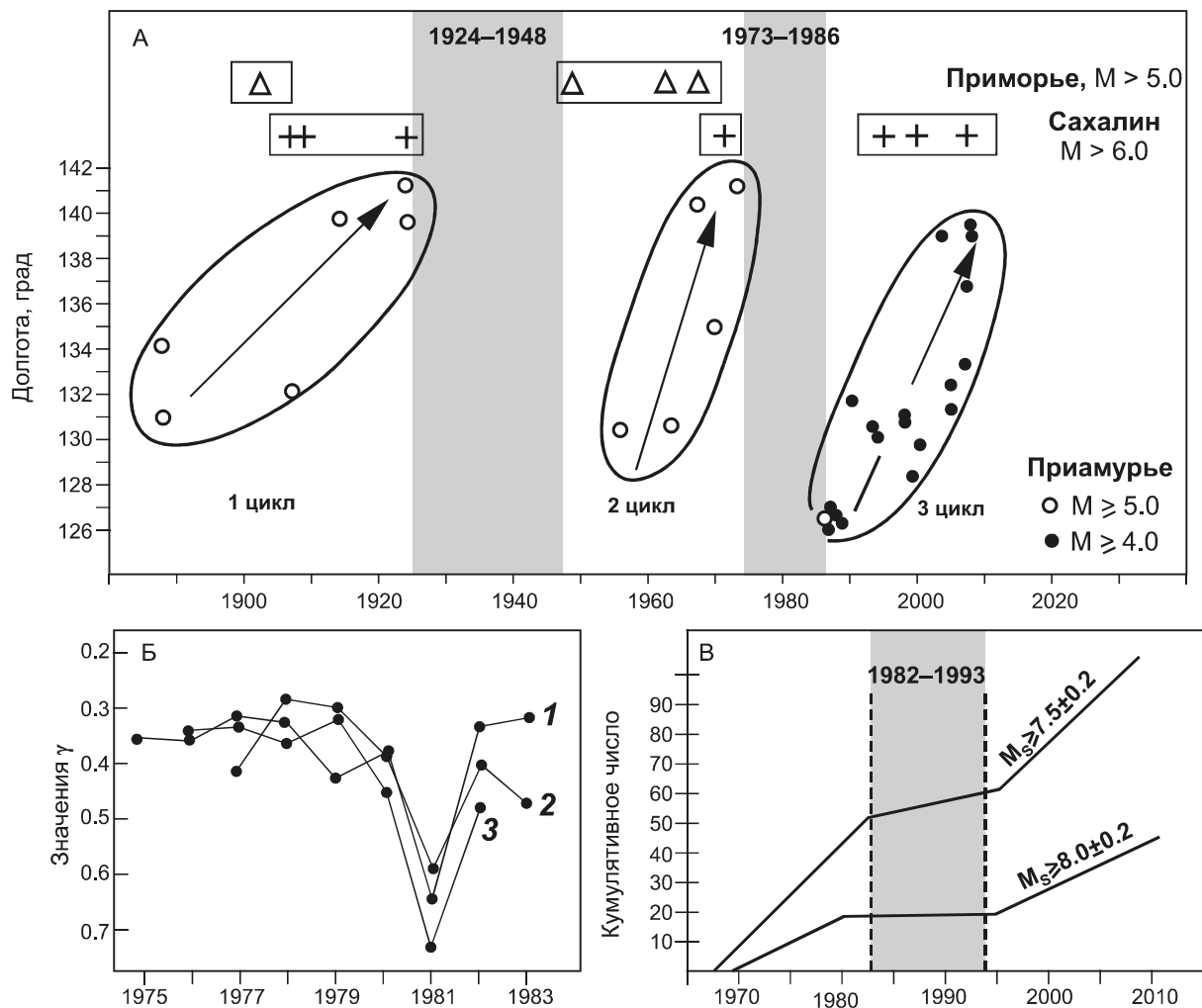


Рис. 7. Сейсмические циклы в южной части Дальнего Востока России.

А – три цикла сильных землетрясений в Приморской, Сахалинской и Приамурской зонах, по [27]. Стрелки показывают миграцию эпицентров с запада на восток в Приамурской сейсмической зоне. Б – минимум выделения сейсмической энергии 1981 г. на Дальнем Востоке, по Л.С. Оскорбину [25]. Районы: 1 – Янкан-Тукурингра-Джагдинский, 2 – Турано-Буреинский, 3 – Становой. В – планетарный минимум сейсмической активности для землетрясений двух диапазонов магнитуды в глобальной базе данных, по [33].

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ

Цикличность землетрясений в буферной зоне Амурской плиты

Датировки сильных землетрясений показывают [27], что с начала XX века в сейсмических зонах юга Дальнего Востока России (Приамурская, Приморская и Сахалинская) имели место три цикла сейсмической активности, в каждом из которых эпицентры землетрясений мигрировали с запада на восток (рис. 7 А). Последний цикл сейсмической активности в Приамурье начался в восьмидесятые годы, и, как показано Л.С. Оскорбиным в [25], предшествовавшая ему пауза обнаруживается на графиках повторяемости землетрясений восточных районов буферной зоны

Амурской плиты: Янкан-Тукурингра-Джагдинского, Турано-Буреинского и Станового (рис. 7 Б). Минимум активности во всех трех случаях приходится на 1981 год, что соответствует середине паузы 1973–1986 гг. в распределении сильных землетрясений. Полагаем, этот же спад сейсмической активности (рис. 7 В) проявился и в глобальном масштабе [33].

Миграция сейсмичности при поднятии орогена

Достаточно полные данные по параметрам землетрясений Буреинской зоны, которые имеются только для событий последнего сейсмического цикла (табл.), позволяют увидеть особенности миграции активности. Первые сильные землетрясения магнитудой $M \geq 5$ здесь произошли в 1985–1986 гг. Эпицентры всех событий магнитудой $M \geq 5$ начала цикла

сосредоточены в узкой полосе, положение которой совпадает с центральным поднятием Буреинского орогена (рис. 8 А). Подъем орогена наглядно демонстрируют более поздние землетрясения 1994–2007 гг., которые центробежно мигрируют от центра сейсмической зоны к ее периферии.

Более слабые землетрясения следующего диапазона магнитуд, $M = 4.5–4.9$, начались немного раньше – в 1983–1984 гг. (табл.). Расположение эпицентров этих толчков наглядно демонстрируют противоположную по направлению, «центростремительную», миграцию деформационной активности (рис. 8 Б). Ранние землетрясения восьмидесятых годов происходили на периферии Буреинской зоны, затем сейсмичность мигрировала к ее центру. Эпицентры последних землетрясений с магнитудой $M = 4.5–4.9$, которые произошли в период 2005–2009 гг., сосредоточены на ограниченной площади в центре Буреинской зоны и точно над центром поднятия орогена. Судя по центростремительной миграции землетрясений с магнитудой $M = 4.5–4.9$, сейсмическая активность в Буреинской зоне, видимо, завершилась к 2007–2009 гг., и в целом сейсмический цикл продолжался с ~1983 г. по ~2009 гг. Начало, продолжительность и завершение этого цикла также обнаруживается в миграции сейсмичности с запада на восток в Приамурской сейсмической зоне (рис. 7 А).

ОБСУЖДЕНИЕ

Современная геодинамика буферной зоны Амурской плиты

Закономерности миграции сильных землетрясений в Приамурской сейсмической зоне имеют ключевое значение для понимания природы деформаций Сихотэ-Алинского региона. Для событий, эпицентры которых сосредоточены вдоль Тан-Лу, выделяются три цикла, в каждом из которых, что принципиально важно, сейсмическая активность систематически смещается с запада на восток (рис. 7 А). Такое направление миграции позволяет уверенно исключить влияние Тихоокеанской зоны субдукции, или Охотоморской плиты, как существенных геодинамических факторов активизации Нижнего Приамурья. Результаты исследования подтверждают доминирующее значение Амурской плиты в современной геодинамике (рис. 9), перемещение которой с запада на восток, по всей видимости, определяет высокий уровень напряженного состояния в Сихотэ-Алинском регионе.

Учитывая особенности активизации Нижнего Приамурья, кажется целесообразным, а при детализации геодинамических и сейсמודинамических исследований просто необходимым, исключить этот регион

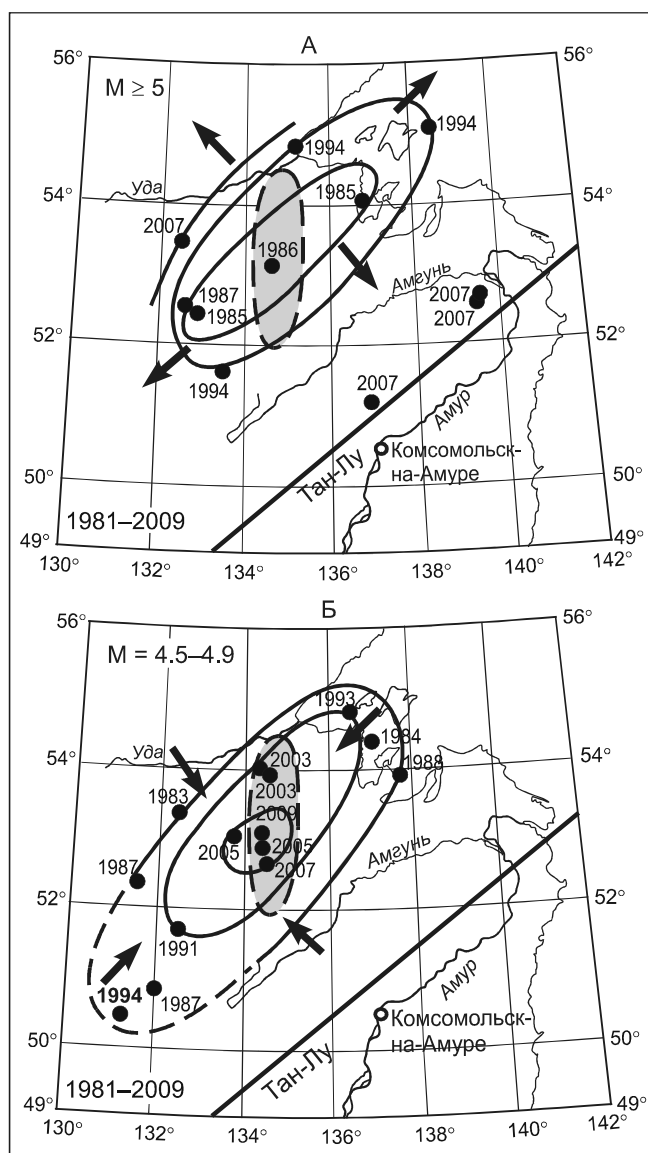


Рис. 8. Пространственно-временные вариации сейсмичности в Буреинской зоне в последнем цикле.

Пунктиром и серым тоном показан центр поднятия орогена в соответствии с координатами его главных горных вершин, стрелки показывают направления миграции толчков в цикле. А – центробежная миграция самых сильных землетрясений с $M \geq 5.0$. Б – центростремительная миграция землетрясений с $M = 4.5–4.9$.

из состава Амурской плиты. Его следует рассматривать как самостоятельную часть буферной зоны [11], обрамляющую Амурскую плиту и находящуюся под ее прямым геодинамическим влиянием (рис. 9). Роль Амурской плиты при этом остается центральной, так как именно ее горизонтальное давление определяет характер поля напряжений и порождает комплекс процессов активизации, которые проявляются в деформациях и сейсмичности.

Таблица. Землетрясения магнитудой $M \geq 4.5$ Буреинской сейсмической зоны.

Год	Месяц	День	Долгота	Широта	Магнитуда	Глубина, км
1942	7	-	132.10	51.90	4.5	15
1960	8	10	133.0	54.00	4.5	15
1975	6	29	132.20	53.20	5.3	25
1976	9	11	136.60	53.10	4.5	15
Сейсмический цикл конца 20 века – начала 21 века						
1983	7	30	132.50	53.40	4.8	--
1984	3	24	137.00	54.40	4.5	8
1985	6	12	132.80	52.40	5.2	9
1985	11	9	136.80	54.00	5.7	10
1986	1	6	134.58	53.08	5.4	10
1987	3	5	132.53	52.51	5.2	16
1987	8	8	131.96	50.93	4.6	--
1987	8	21	131.47	52.44	4.6	--
1988	8	30	137.64	53.91	4.7	10
1991	5	21	132.58	52.48	4.6	--
1993	6	12	136.47	54.84	4.7	--
1994	1	26	131.53	50.57	4.5	7
1994	1	28	135.17	54.78	5.7	12
1994	3	1	138.53	55.01	5.0	7
1994	5	5	133.45	51.59	5.3	7
2003	7	18	134.28	54.03	4.6	16
2003	10	16	134.24	54.00	4.7	19
2005	8	13	133.54	52.34	4.7	18
2005	9	30	134.36	52.96	4.6	11
2007	8	4	134.46	52.74	4.6	19
2007	9	15	132.39	53.41	5.0	12
2009	4	13	134.36	53.14	4.5	11

Структуры геодинамической активизации

Область сжатия и разуплотнения Буреинского орогена является ключевым элементом в геодинамике Нижнеамурской части буферной зоны (рис. 9). Здесь давление Амурской плиты реактивирует северо-восточные разломы системы Тан-Лу, вдоль которых деформации транслируются в пределы Буреинского орогена и накапливаются в его центральном своде [29]. Буреинская область сжатия преобразует горизонтальный стресс в вертикальный подъем, и этот процесс является главной причиной возрастания сейсмичности в центральной части Нижнего Приамурья. Вторым геодинамически активным элементом региона является Нижнеамурская коровая мегапластина, наклон которой играет важную роль в распределении региональных напряжений и оживлении дизъюнктивных нарушений.

Образование и деформации коровой мегапластины закономерно связаны, по нашему мнению, с современной геодинамикой Сихотэ-Алинского литосферного блока, который является ключевым элементом восточной части буферной зоны. Границы этого

тектонического блока (рис. 9) в северо-восточном Китае проходят по двум главным ветвям мегазоны Тан-Лу: Илань-Итунскому и Фушунь-Мишаньскому [38, 45]. Северо-восточные продолжения этих разломов на территории России не столь отчетливо выражены в тектоническом строении. Результаты регионального картирования показывают, что Илань-Итунский разлом протягивается вдоль русла Амура и затем продолжается в низовьях реки Киселевским разломом [9]. Фушунь-Мишаньская ветвь мегазоны Тан-Лу в России продолжается Алчанским разломом. По данным магнитотеллурического изучения, оба главных разлома мегазоны Тан-Лу прослеживаются глубоко в мантию [13–15]. Восточные границы Сихотэ-Алинского блока также выделяются в закономерностях вариаций состава ксенолитов мантии и внутриплитных неоген-четвертичных базальтов [26]. Положение литосферного блока и его треугольная конфигурация хорошо прослеживаются в контуре клиновидного астеносферного поднятия, обнаруженного на юге Дальнего Востока по данным геоэлектрических исследований [15]. Геодинамическое значение Сихотэ-Алинского тектонического блока первостепенно, так как сейсмические зоны, в которых сосредоточены очаги сильных землетрясений Приамурья, Приморья и Сахалина, обрамляют именно его границы [26, 27].

Причиной активизации Сихотэ-Алинского тектонического блока является его косое столкновение с Амурской плитой, которая вращается против часовой стрелки. Восточный край Амурской плиты движется на северо-восток (рис. 9), судя по ориентировке осей сжатия в очагах землетрясений в направлении $70-75^\circ$ СВ [37]. Такая траектория значительно, примерно на $\sim 50^\circ$, отклоняется от ортогональной относительно мегазоны Тан-Лу и, следовательно, границы Сихотэ-Алинского тектонического блока. Как результат косого давления плиты, сжатие перераспределяется по ортогональным направлениям, вдоль и поперек простирания Сихотэ-Алинского блока (рис. 9). В такой ситуации литосферный блок, во-первых, выдавливается по простиранию в восточном направлении, формируя поле деформаций перед своим фронтом и, как важное следствие, определяя генезис Сахалинской сейсмической зоны [26]. Во-вторых, поперечное сжатие должно приводить к горизонтальному вращению Сихотэ-Алинского блока в южном направлении. Действительно, для Алчанского разлома, расположенного на фронте тектонического блока, установлены шарьирование в юго-восточном направлении [9]. По-видимому, вращение Сихотэ-Алинского блока по часовой стрелке и его горизонтальное движение в юго-восточном направлении началось существенно раньше современного этапа. Об этом свидетельствуют многочисленные срывы, текто-

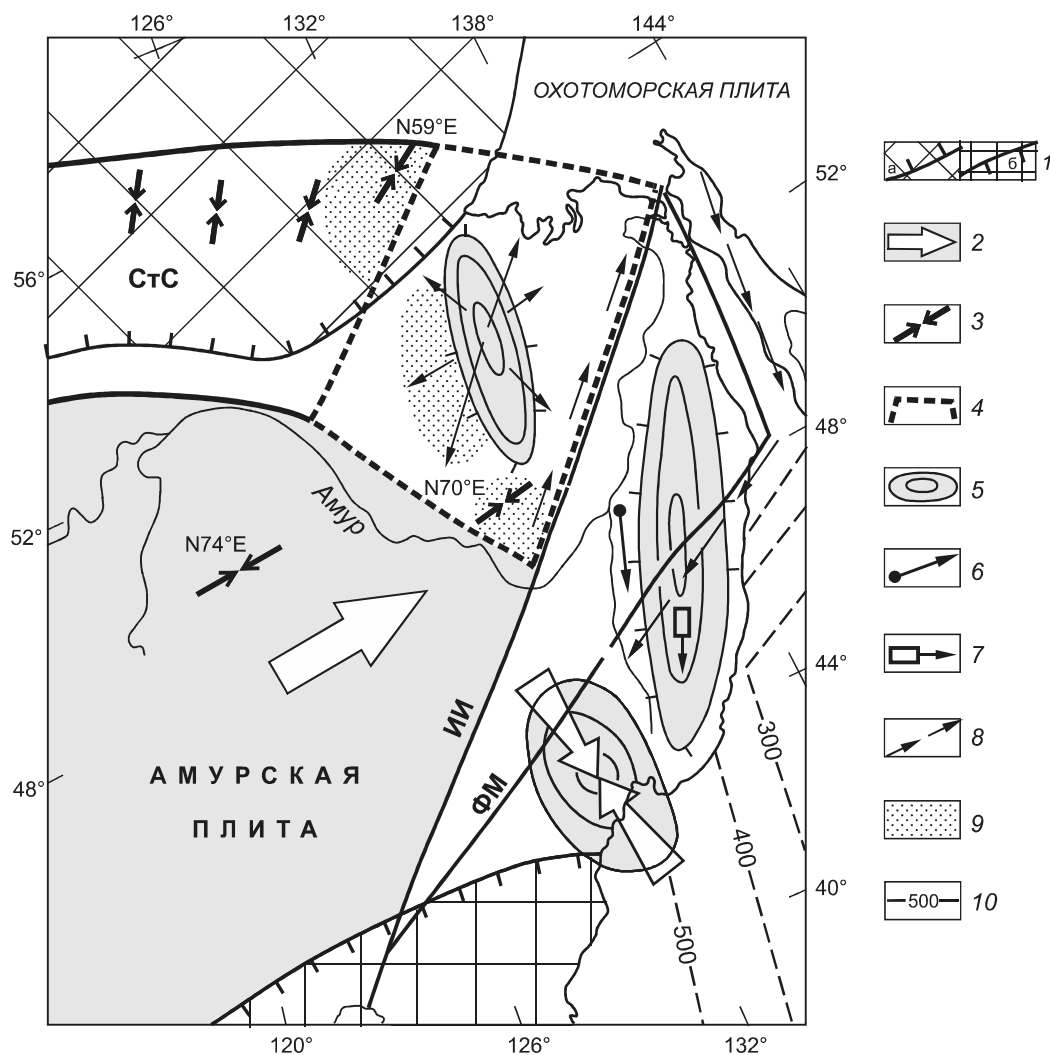


Рис. 9. Геодинамика и структура буферной зоны на восточном фронте Амурской плиты.

1 – Сибирский (а) и Северо-Китайский (б) кратоны и их границы; 2 – Амурская плита, стрелка показывает ее траекторию; 3 – направления сжатия в очагах землетрясений, по [1, 37]; 4 – границы Нижнеамурской коровой пластины; 5 – главные области сжатия: Бурейнский и Сихотэ-Алинский орогены, зона аномальной сейсмичности на глубине 500 км. Направления современных горизонтальных перемещений по GPS данным: 6 – относительно пункта Благовещенска, по [1], 7 – остаточные значения векторов смещений, по [30, 31]; 8 – траектории миграции землетрясений вдоль границ литосферного блока, по [27]; 9 – кластеры концентрации слабых землетрясений Нижнего Приамурья; 10 – изолинии глубины зоны субдукции в км. Илань-Итунский (ИИ) и Фушунь-Мишаньский (ФМ) разломы мегазоны Тан-Лу показаны как глубинные границы литосферного блока. СтС – Становой сектор буферной зоны Амурской плиты.

нические покровы и другие структуры горизонтального перемещения северо-восточного простирания, которые были обнаружены при цифровом моделировании рельефа Нижнеамурского региона [34]. Возможно, процесс поворота и миграции разломной мегазоны Тан-Лу в сторону Тихого океана был важным элементом регионального растяжения континентальной окраины на протяжении мела и кайнозоя.

Предполагаемые направления горизонтальных перемещений в Сихотэ-Алинском регионе, в общем, подтверждаются данными GPS измерений, проведенных на востоке Амурской плиты в последние годы

[1, 30–32, 42]. Результаты, полученные с помощью космической геодезии, пока не позволяют обнаружить согласованной и полной региональной картины. Тем не менее, ряд важных результатов GPS измерений согласуются с предполагаемой нами динамикой. Прежде всего, данные геодезии подтверждают высокую активность разломной мегазоны Тан-Лу и необходимость проведения границы Амурской плиты вдоль нее [1]. Активизация мегазоны Тан-Лу тем более интересна, так как GPS данные указывают на современную пассивность Центрально-Сихотэ-Алинского разлома [42]. Влияние его на сейсмичность

также не наблюдается. Предполагаемое вращение по часовой стрелке тектонического блока Центрального Сихотэ-Алиня согласуется с наблюдениями на Амуро-Зейской геодинамической сети [1]. Для ее пункта «КНАЖ», расположенного в пределах тектонического блока, установлено наиболее быстрое смещение, 3.65 мм/год, в юго-западном направлении относительно пункта «Благовещенск» (рис. 9). Эта же южная ориентировка существенно преобладает в остаточных значениях векторов смещения, определенных по GPS данным для пунктов Сихотэ-Алинской геодинамической сети [30–32].

Ключевым доказательством вращения Сихотэ-Алинского литосферного блока по часовой стрелке является периодическая миграция сильных землетрясений Сахалина с севера на юг перед фронтом блока [26]. Интересно, что вдоль юго-восточной границы Сихотэ-Алинского литосферного блока обнаруживается миграция эпицентров землетрясений с востока на запад. Полная картина миграции землетрясений вдоль границ блока: сначала – с запада на восток, затем – с севера на юг, наконец – с востока на запад (рис. 9) убедительно демонстрирует характер активизации тектонического блока под воздействием Амурской плиты.

Важным элементом буферной зоны является орогенное поднятие Сихотэ-Алиня, хорошо выраженное в рельефе региона. Современное горообразование здесь подтверждается методами повторного геодезического нивелирования [16]. Так же как для Буреинского орогена, воздымание Сихотэ-Алинского горного сооружения компенсировано увеличением мощности коры до ~ 40 км [6]. Центр Сихотэ-Алинского орогена совпадает с южной границей литосферного блока (рис. 9), что позволяет рассматривать его как зону сжатия и разуплотнения, вызванную вращением литосферного блока по часовой стрелке. По сравнению с Буреинским интенсивность современного поднятия Сихотэ-Алинского орогена значительно ниже. Более слабой в этой части региона является и сейсмическая активность. Эти различия, видимо, связаны с тем, что Амурская плита прямо воздействует только на Буреинское орогенное сооружение. Сихотэ-Алинский же ороген оказывается «экранирован», так как сжатие, порождаемое Амурской плитой, прежде всего «расходится» на перемещение самого литосферного блока.

Важным элементом активизации в буферной зоне является уникальная Приморская глубинная зона сжатия (рис. 9), в которой сосредоточены гипоцентры землетрясений магнитудой 6.0–7.0 в интервале глубин 400–600 км [27]. Аномальная интенсивность деформаций в Приморской глубинной зоне объясняется, вероятно, тем, что здесь происходит столкновение сме-

щающегося к югу Сихотэ-Алинского литосферного блока с основанием субдуцирующей на запад Тихоокеанской плиты. Именно встречное давление способно, по нашему мнению, обеспечить наблюдаемый аномальный уровень сейсмичности.

Иерархия геодинамических процессов в буферной зоне

Проведенный анализ демонстрирует сложную взаимосвязь тектонофизических процессов, которые определяют геодинамику буферной зоны в Сихотэ-Алинском регионе. Отличительным свойством является иерархическая организация тех разномасштабных деформаций, которые образуются или активизируются перед фронтом Амурской плиты. Основную роль играет коллизия Индийской и Евразийской плит, закономерными следствиями которой было как образование Амурской плиты, так и ее последующая миграция в восточном направлении [10]. Под давлением Амурской плиты произошла реактивация тектонических структур, которые появились ранее на завершающем этапе аккреционного становления региона: Буреинского орогена, разломной мегазоны Тан-Лу, Сихотэ-Алинского литосферного блока (рис. 9). Напротив, Нижнеамурская коровая мегапластина в современной конфигурации, видимо, является новообразованной тектонической структурой. Позднекайнозойскими, вероятно, являются также Приморская область сжатия и Сихотэ-Алинский ороген, которые сформировались на фронте литосферного блока при его ротации. При детальном обсуждении геодинамики последних двух структур, видимо, следует учитывать встречное сжатие, связанное с зоной Тихоокеанской субдукции. Взаимодействие перечисленных геодинамических процессов определяет исключительную гетерогенность поля деформаций в буферной зоне.

Особенности миграции сейсмичности в буферной зоне

Закономерности пространственной миграции землетрясений заслуживают особого внимания, так как в них отражены ключевые факторы геодинамической активизации. Смещение с юго-запада на северо-восток эпицентров землетрясений вдоль мегаразлома Тан-Лу можно отнести к линейному типу миграции, вероятно, обычному для зон крупных региональных разломов [3]. Однако разрядка напряжений в Приамурской зоне демонстрирует интересную особенность по сравнению с зонами других крупных разломов. Эпицентры землетрясений расположены не равномерно по обеим сторонам мегаразлома Тан-Лу, но систематически смещены к северо-западу от него. Асимметричный характер распределения сейсмично-

сти показывает, что речь идет не просто об активизации деформаций вдоль самого разлома. Скорее можно предполагать, что мегазона Тан-Лу выступает своего рода вертикальным барьером для распространяющегося с запада сжатия, при столкновении с которым происходит разрядка напряжений. Для пространственного анализа выделившейся энергии и выявления их связи с тектоническими структурами был проведен расчет энергии на единицу площади [7], который показал, что наиболее активные участки земной коры связаны с Харпийско-Курско-Приамурской зоной северо-восточного простирания, являющейся северным сегментом трансрегиональной разломной системы Тан-Лу.

Этот эффект может объяснить появление южно-го кластера слабых землетрясений в районе с координатами центра $\sim 49^\circ$ с.ш., $\sim 132^\circ$ в.д. (рис. 3 А). Морфология центрального кластера мелких землетрясений, вытянутого вдоль ~ 133 -го меридиана, повторяет положение и конфигурацию центральной части Буреинского орогена. И в данном случае район разрядки напряжений смещен на запад, что также связано с давлением Амурской плиты.

Периодическое сжатие, вызывая подъем орогена, приводит к образованию Буреинской зоны, изменение положения землетрясений в которой принципиально отличается от линейной миграции сейсмичности в Приамурской зоне. Эпицентры сильных землетрясений ($M \geq 5.0$) Буреинской зоны демонстрируют центробежную тенденцию, в то время как миграция землетрясений диапазона $M = 4.5-5.0$ происходила центростремительно. Возможно, что такое сочетание двух противоположных направлений миграции является особенностью сейсмомодинамической активизации именно изометричных структур орогенного воздымания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокий уровень региональных деформаций, которые вызываются горизонтальным перемещением Амурской плиты, приводит к образованию и/или реактивации областей сжатия и растяжения в буферной зоне перед фронтом плиты. Самой высокой сейсмичностью в регионе отличаются структуры Нижнеамурского сектора: разломная мегазона Тан-Лу и современный Буреинский ороген, с активизацией которых связаны две зоны землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$. Для этих зон характерны разные типы миграции землетрясений. Первый (линейный) проявляется в систематическом смещении эпицентров толчков с запада на восток вдоль мегазоны Тан-Лу. Миграция второго (центрального) типа обнаруживается в Буреинской зоне, где эпицентры сильных толчков в период

1990–2010 гг. мигрируют от апикальной части орогенного сооружения к его периферии. Результаты повторного геодезического нивелирования [16] показывают, что при геодинамической активизации Нижнего Приамурья происходит также образование коровой мегапластины, размеры которой $\sim 930 \times 500$ км, значительно влияющей на особенности поля региональных деформаций и распределение сейсмогенных нарушений.

Юго-восточный край Нижнеамурской мегапластины, проходящий вдоль мегазоны Тан-Лу, испытывает интенсивное прогибание, которое компенсируется подъемом ее северо-западного края [16]. Наклон мегапластины связан с зоной растяжения, которая формируется при вращении по часовой стрелке литосферного блока, расположенного в центральной части Сихотэ-Алиня. Горизонтальное сжатие на фронте вращающегося тектонического блока сопровождается образованием Сихотэ-Алинского орогенного сооружения. Южное направление тектонической ротации согласуется с результатами GPS измерений. Другим результатом горизонтального сжатия стало образование на глубине 500–600 км зоны сильных землетрясений магнитудой $M \geq 6.0$ при столкновении вращающегося литосферного блока с зоной субдукции Тихоокеанской плиты.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашурков А.П., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В., Сорокин А.П., Серов М.А., Бызов Л.М. Кинематика Амурской плиты по данным GPS-геодезии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 2. С. 299–311.
2. Бормотов В.А., Меркулова Т.В. Кайнозойский этап развития северной ветви Тан-Лу–Охотской рифтовой системы: глубинное строение и сейсмогеодинамика // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 26–41.
3. Вилькович В.Е., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И. Волны тектонических деформаций на крупных разломах // Докл. АН СССР. 1974. Т. 219, № 1. С. 77–80.
4. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В. Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // Геотектоника. 2004. № 1. С. 3–20.
5. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
6. Глубинное строение и металлогения Восточной Азии / Отв. ред. А.Н. Диденко, Ю.Ф. Малышев, Б.Г. Саксин. Владивосток: Дальнаука, 2010. 332 с.
7. 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.

8. Добрецов Н.Л., Псахье С.Г., Ружич В.В., Попов В.Л., Шилько Е.В., Гранин Н.Г., Тимофеев В.Ю., Астафуров С.В., Димаки А.В., Старчевич Я. Ледовый покров озера Байкал как модельная среда для изучения тектонических процессов в земной коре // Докл. АН. 2007. Т. 412, № 5. С. 656–660.
9. Забродин В.Ю., Рыбас О.В., Гильманова Г.З. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2015. 132 с.
10. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. Введение в геодинамику. М.: Недра, 1979. 311 с.
11. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Николаев В.В., Семенов Р.М. Буферные сейсмогенные структуры между Евразийской и Амурской литосферными плитами на юге Сибири // Тихоокеан. геология. 2003. Т. 22, № 6. С. 55–61.
12. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктура Олекмо-Становой сейсмической зоны (Южная Якутия) // Литосфера. 2005. № 2. С. 21–40.
13. Каплун В.Б. Результаты магнитотеллурических зондирований в пределах западной части Сихотэ-Алинской складчатой системы // Тихоокеан. геология. 1994. № 5. С. 141–153.
14. Каплун В.Б. Предварительные результаты глубинных магнитотеллурических зондирований по профилю п. Облучье-оз.Гасси (Хабаровский край) // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17, № 2. С. 122–135.
15. Каплун В.Б. Электропроводность и структура литосферы Приамурья: Автореф. дис.... канд. геол.-минер. наук. Хабаровск, 2002. 24 с.
16. Карта современных вертикальных движений по геодезическим данным на территорию СССР (СВДЗК) / Под ред. Л.А. Кашина М.: ГУГК, 1989. 4 л.
17. Кудымов А.В., 2010. Кайнозойские поля напряжения в зоне Киселевского разлома Нижнего Приамурья // Тихоокеан. геология. Т. 29, № 6. С. 49–56.
18. Кузнецов В.Е. Глубинное строение и современная геодинамика Приамурья // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17, № 2. С. 61–67.
19. Малышев Ю.Ф., Подгорный В.Я., Шевченко Б.Ф., Романовский Н.П., Каплун В.Б., Горнов П.Ю. Глубинное строение структур ограничения Амурской литосферной плиты // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 2. С. 3–17.
20. Мирошниченко А.И., Сорокин А.П., Саньков В.А., Лухнев А.В., Ашурков С.В., Сорокина А.Т., Панфилов Н.И., Серов М.А., Шерман С.И. Космическая геодезия в задачах геодинамики: современные движения в Зейско-Буреинском бассейне // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 71–79.
21. Мониторинг сейсмогенных зон Хабаровского края / Ф.Г. Корчагин, В.А. Бормотов, В.Г. Быков и др. Владивосток: Дальнаука, 2002. 240 с.
22. Николаев В.В. Танлу-Курский разлом: структура фундамента и сейсмичность. Проблемы тектоники, энергетические и минеральные ресурсы Северо-Западной Пацифики. Хабаровск: ДВО АН СССР, 1992. С. 81–91.
23. Николаев В.В., Врублевский А.А., Ахмадулин В.А., Кузнецов В.Е. Геодинамика и сейсмическое районирование материковой части Дальнего Востока. Владивосток: ДВО РАН, 2000. 90 с.
24. Пересторонин А.Н., Развозжаева Е.П. Система кайнозойских депрессий Приамурья и Приморья: строение, тектоническая позиция и геодинамическая интерпретация // Тихоокеан. геология, 2011. Т. 30, № 2. С. 58–74.
25. Сейсмоструктура и сейсмическое районирование Приамурья / В.В. Николаев, Р.М. Семенов, Л.С. Оскорбин и др. Новосибирск: Наука, 1989. 128 с.
26. Степашко А.А. Глубинные основы сейсмоструктуры Дальнего Востока: Сахалинская зона // Тихоокеан. геология. 2010. Т. 29, № 3. С. 50–63.
27. Степашко А.А. Глубинные основы сейсмоструктуры Дальнего Востока: Приамурская и Приморская зоны // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 1. С. 3–15.
28. Степашко А.А. Структура литосферной мантии Сибирского кратона и сейсмомодели деформационных волн в Байкальской сейсмической зоне // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4, № 4. С. 387–415.
29. Степашко А.А., Меркулова Т.В. Глубинная структура, генезис и сейсмическая активизация Буреинского орогена // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 4. С. 3–17.
30. Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Ардюков Д.Г. и др. Результаты анализа данных GPS измерений (2003–2006 гг.) на Дальнем Востоке по Сихотэ-Алинской сети // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 4. С. 39–49.
31. Тимофеев В.Ю., Казанский А.Ю., Ардюков Д.Г., Метелкин Д.В., Горнов П.Ю., Шестаков Н.В., Бойко Е.В., Тимофеев А.В., Гильманова Г.З. О параметрах вращения Сибирского домена и его восточного обрамления в различные геологические эпохи // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 4. С. 21–31.
32. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Соловьев В.М., Шибачев С.В., Петров А.Ф., Горнов П.Ю., Шестаков Н.В., Бойко Е.В., Тимофеев А.В. Межплитные границы дальневосточного региона России по результатам GPS измерений, сейсморозведочных и сейсмологических данных // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 4. С. 489–507.
33. Уломов В.И. О глобальных изменениях сейсмического режима Земли в период 1965–2005 гг. // Докл. АН. 2007. Т. 414, № 3. С. 398–401.
34. Усиков В.И. 3D-модели рельефа и строение верхней части земной коры Приамурья // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 6. С. 14–33.
35. Уфимцев Г.Ф., Алексеев С.Н., Онухов Ф.С. Морфотектоника Нижнего Приамурья // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 6. С. 81–93.
36. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Акад. изд-во «ГЕО», 2014. 359 с.
37. Barth A., Wenzel F. New constraints on the intraplate stress field on the Amurian plate deduced from light earthquake focal mechanisms // Tectonophysics. 2010. V. 482. P. 160–169.
38. Chen D., Zhang F., Chen H., Dilek Y., Yang S., Meng Q., Yang C. Structural architecture and tectonic evolution of the Fangzheng sedimentary basin (NE China), and implications for the kinematics of the Tan-Lu fault zone // J. Asian Earth Sci., 2015. V. 106. P. 34–48.
39. Heki K., Miyazaki S., Takahashi H., Kasahara M., Kimata F., Miura S., Vasilenko N.F., Ivashchenko A., An K.-D. The Amurian Plate motion and current plate kinematics in eastern Asia // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, B12. P. 29147–29155.
40. Mackey K.G., Fujita K., Gounbina L.V., Koz'min B.M., Imaev V.S., Imaeva L.P., Sedov B.M. Explosion contamination of the Northeast Siberian seismicity catalog: implications for natural earthquake distributions and location of the Tan-Lu

- Fault in Russia // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2003. V. 93, N 2. P. 737–746.
41. Petit C., Fournier M. Present-day velocity and stress field of the Amurian Plate from thin-shell finite-element modelling // *Geophys. J. Int.* 2005. V. 160. P. 357–369.
42. Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Takahashi H., Kasahara M., Bormotov V.A., Bykov V.G., Kolomiets A.G., Gerasimov G.N., Vasilenko N.F., Prytkov A.S., Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Kato T. Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS observations // *Geophys. J. Int.* 2011. V. 184. P. 529–540.
43. Song Y., Ren J., Stepashko A.A., Li J. Post-rift geodynamics of the Songliao Basin, NE China: Origin and significance of T11 (Coniacian) unconformity // *Tectonophysics.* 2014. V. 634. P. 1–18.
44. Wei M., Liu Y., Jao D., Shen J., Xiaolong P. Evidence for Holocene activity of the Yilan-Yitong fault, northeastern section of the Tan-Lu fault zone in Northeast China // *J. Asian Earth Sci.* 2013. V. 67–68. P. 207–216.
45. Xu J.W., Zhu G., Tong W., Cui K., Liu Q. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: a major shear system to the northwest of the Pacific Ocean // *Tectonophysics.* 1987. V. 134. P. 273–310.
46. Yu Z., Wu S., Zou D., Feng D., Zhao H. Seismic profiles across the middle Tan-Lu fault zone in Laizhou Bay, Bohai Sea, eastern China // *J. Asian Earth Sci.* 2008. V. 33. P. 383–394.
47. Zhang Y., Dong S., Shi W. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China // *Tectonophysics.* 2003. V. 363. P. 243–258.

Рекомендована к печати В.Г. Быковым

A.A. Stepashko, T.V. Merkulova, and A.N. Didenko

Geodynamics and regularities of seismicity in the eastern segment of the Amurian plate

Geodynamic and seismic activation in the southeastern part of the Far Eastern Russia is associated with nucleation of strain waves in the buffer zone of the Amurian plate when it moves northeastward. The highest crustal seismicity is typical of Lower Priamurye in which central part a zone of $M \geq 4.5$ earthquakes originated that was related to reactivation of the Bureya orogen. The maximum of the regional compression is confined to the meridional dome, under which the depth of the Moho discontinuity increases from 36 down to 40 km. The area of lower rock density in the central part of the Bureya orogen is exhibited by an intense negative gravity anomaly. A contemporary uplift of the orogen initiated the centrifugal-like migration of seismicity during 1983–2009, when epicenters of $M \geq 5.0$ earthquakes migrated from the center of the dome to its periphery.

Strong earthquakes ($M \geq 5.0$) are also concentrated south of the Bureya orogen in the transregional Tan-Lu fault zone, where the earthquake foci migrate in the northeastern direction. Geodynamic activation is controlled here by the tangential rotation (pressure) of the Amurian plate, forcing a tectonic block of the Central Sikhote-Alin to move in the southern direction. North of the block, a 500×950 km crustal plate is formed due to extension, that is inclined along the Tan-Lu fault. In the compression area, a mountain uplift of the same name is formed at the opposite boundary of the Central Sikhote-Alin block. Being rotated clockwise, the block interacts with the subduction zone of the Pacific plate at a depth of 400–600 km, where deep-focus earthquakes with $M \geq 6.0$ are generated due to bilateral pressure.

Key words: geodynamics, seismicity, buffer zone, Amurian Plate, the Russian Far East.