



SEISMODYNAMICS AND DEEP INTERNAL ORIGIN OF THE NORTH CHINA ZONE OF STRONG EARTHQUAKES

A. A. Stepashko

*Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences,
65 Kim Yu Chen street, Khabarovsk, 680000, Russia*

Abstract: Space-and-time regularities of seismicity of the North China (Tan-Lu) zone are studied, and tectonic nature of strong earthquakes is analyzed. The concept of its genesis is still a matter of debate as this zone is located in the centre of the ancient Sino-Korean craton, i.e. thousand kilometers away from convergent margins of Eurasia and the Pacific ocean and Indo-Australian plates (Figure 1). The information on the regional cycling dynamics [Xu, Deng, 1996] is updated. Two cycles, in which strong earthquakes (14 shocks with $M \geq 7.0$) occurred in the region under study, are distinguished, i.e. from 1500 to 1700, and from 1800 to 1980 (Figure 2). The seismodynamics of the North China zone is consistent with the Circum Pacific ocean deformation wave that occurs once in 300 years at the margin between Asia and the ocean and thus causes the strongest earthquakes ($M \geq 8.8$) and eruptions of volcanoes in the Pacific ocean belt [Vikulin et al., 2009, 2010]. This wave came to the northern regions of China in the years of 1500 and 1800 (Figure 3) and triggered seismic activity cycles.

The second factor predetermining the seismicity of the Northern China is a specific structure of the region which can manifest seismic activity due to the impact of deformation waves. The genesis of the metastable structure of the region is related to tectonic restructuring of the lithosphere of the Sino-Korean craton due to shear displacements in the Tan-Lu mega-zone. Regional variations of compositions of mantle xenoliths of the Sikhote Alin orogeny demonstrate that the latent strike of the Tan-Lu faults can be traced across the south-eastern areas of Russia to the Tatar Strait. These faults are borders of the V-shaped mantle block (400 x 1500 km) (Figure 5), which composition is characterized by an anomalous content of iron and a low depletion of peridotites. The tectonic mantle block maintains its activity; being impacted by compression from the west, it is squeezed out towards the Sakhalin Island and simultaneously subject to the clockwise rotation. As a result, along and above the margins of the covered lithospheric block in the southern Far East of Russia, main seismic zones have formed (Figure 5, B), wherein earthquakes of $M \geq 5.0$ are recorded. The anomalous mantle block at the base of the Sikhote Alin used to be a part of the Sino-Korean craton; it was cut out in the Jurassic-Cretaceous period and moved in the north-eastern direction along the Tan-Lu shear fault. The lithosphere of the craton was significantly extended during closure of the remaining area, and an evident consequence of extension was formation of two Cenozoic rifting systems. In the Paleogene, the Hebei rift system occurred westward of the Tan-Lu mega-zone; it hosted earthquakes of the latest seismic cycle. The Shanxi rift system strikes in the north-eastward direction and separates the western block of the craton (called Ordos) from the western block (called Hebei); it hosted earthquakes of the earlier seismic cycle.

During restructuring of the lithosphere, rotations of tectonic blocks were of importance, along with the lithospheric extension. The specific features of the craton structure suggest two tectonophysical mechanisms of rotation. Firstly, when the triangle-shaped zone westward of Tan-Lu was being closed, the lithospheric segment rotated clockwise (Figure 5, C). Consequently, at the mobile front, a compression zone was formed; it has two maximums located NE and SW of the rotation centre. This structural pattern is typical of the lithosphere of the central part of the craton. Within the limits of two conjugated maximums westward of Tan-Lu, the crustal thickness is reduced, and the depth to the asthenosphere is sharply decreased (Figures 4, B and 4, C). The rotation of the blocks in the lithosphere resulted in formation of the gigantic anticline fold, where at the eastern area of rifting is located. Secondly, the clockwise rotation of the Hebei tectonic block triggered the counter clock rotation of the Ordos block that is located west of Hebei (Figure 6, A). At the border of the two blocks rotating in the opposite directions, grabens of the S-shaped Shanxi rift system were formed. The rotation of the tectonic blocks is evidenced by changes of strikes of ancient dykes of the craton (Figure 6, B). Regularities of migration of earthquakes in the North China zone reflect specific features of the tectonic structure of the craton (see Figure 4, A). The earthquakes of the latest cycle were caused by increasing compression of the lithospheric fold. The seismic events of the earlier cycle were associated with the rotation of the Hebei and Ordos blocks. The tectonic mechanism, that were triggered during restructuring of the lithosphere in the early Cretaceous – early Cenozoic, are still actively controlling seismicity in the North China zone.

Key words: North China seismic zone, Sino-Korean craton, Tan-Lu fault zone, lithospheric structure, deformation wave, seismic cycles, earthquake migration.

Recommended by S.I. Sherman 20 September 2011

Citation: Stepashko A.A. Seismodynamics and deep internal origin of the North China zone of strong earthquakes // Geodynamics & Tectonophysics. 2011. V. 2. № 4. P. 341–355. doi:10.5800/GT-2011-2-4-0049.

СЕЙСМОДИНАМИКА И ГЛУБИННАЯ ПРИРОДА СЕВЕРО-КИТАЙСКОЙ ЗОНЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.А. Степашко

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, Россия

Аннотация: Изучены пространственно-временные закономерности сейсмичности и проанализирована геотектоническая природа сильных землетрясений в Северо-Китайской (Тан-Луньской) зоне. Понимание ее генезиса остается дискуссионным, так как она расположена в центре древнего Сино-Корейского кратона и удалена на тысячи километров от конвергентных границ Евразии с Тихоокеанскими и Индо-Австралийской плитами (рис. 1). Уточнена динамика цикличности в зоне [Xu, Deng, 1996], и показано (рис. 2), что сильные землетрясения здесь (14 толчков с $M \geq 7.0$) разделяются на два цикла: 1500–1700 гг. и 1800–1980 гг. Такая сейсμοдинамика Северо-Китайской зоны согласуется с гипотезой Циркум-Тихоокеанской волны деформаций, которая раз в 300 лет пробегает по границе Азии и океана, вызывая самые сильные землетрясения с $M \geq 8.8$ и вулканические извержения Тихоокеанского кольца [Викунин и др., 2009, 2010]. На север Китая эта волна приходила в 1500 и 1800 гг. (рис. 3), запуская в качестве триггера сейсмические циклы.

Вторым фактором, определяющим высокую сейсмичность Северного Китая, является особая структура региона, способная активизироваться под действием деформационных волн. Генезис метастабильной структуры связан с тектонической реорганизацией литосферы Сино-Корейского кратона в результате сдвиговых перемещений в мегазоне Тан-Лу. Как показывают региональные вариации состава мантийных ксенолитов Сихотэ-Алиньского орогена, разломы Тан-Лу скрытно продолжают на юго-востоке России вплоть до Татарского пролива. Они ограничивают клиновидный блок мантии, размерами 400 x 1500 км (рис. 5), состав которого отличается аномально высокими содержаниями железа при низкой степени истощения перидотитов. Этот мантийный тектонический блок сохраняет геодинамическую активность и под действием западного сжатия выдавливается по простиранию в направлении Сахалина, поворачиваясь одновременно по часовой стрелке. В результате вдоль границ и над границами скрытого литосферного блока образовались основные сейсмические зоны юга Дальнего Востока России (рис. 5, В), в которых сосредоточены все землетрясения с магнитудой ≥ 5.0 . Блок аномальной мантии в основании Сихотэ-Алинь первоначально являлся частью Сино-Корейского кратона, был вырезан из него в юрско-меловое время и перемещен в северо-восточном направлении по сдвигам Тан-Лу. При закрытии оставшегося пространства литосфера кратона испытала сильное растяжение, очевидным следствием которого стало образование двух систем кайнозойского рифтогенеза. К западу от мегазоны Тан-Лу в палеогене образовалась рифтовая система Хэбэй, с которой связаны землетрясения позднего сейсмического цикла. Вторая рифтовая система – Шаньси, протягивается на северо-восток, отделяя западный блок кратона – Ордос от восточного – Хэбэй. К ней приурочены землетрясения раннего цикла.

При реорганизации литосферы, наряду с растяжением, важнейшую роль играли вращения тектонических блоков. Особенности строения кратона указывают на два тектонофизических механизма ротации. Во-первых, при закрытии треугольной области к западу от Тан-Лу происходил поворот литосферного раздела по часовой стрелке (рис. 5, С). На движущемся фронте, как следствие, формировалась зона сжатия, имеющая два максимума – к северо-востоку и юго-западу от центра вращения. Именно такой структурный рисунок наблюдается для литосферы центральной части кратона. Здесь в пределах двух сопряженных максимумов к западу от Тан-Лу мощность коры сокращена, а глубина до астеносферы резко уменьшена (рис. 4, В, С). В результате вращения блоков в литосфере произошло образование гигантской антиклинальной складки, над которой расположена восточная область рифтогенеза. Во-вторых, поворот по часовой стрелке тектонического блока Хэбэй заставлял вращаться против часовой стрелки расположенный к западу от него блок Ордос (рис. 6, А). На границе блоков, поворачивающихся в противоположных направлениях, формировались грабены рифтовой системы Шаньси, имеющей S-образное простирание. Доказательством вращения тектонических блоков является изменение простирания древних даек кратона (рис. 6, В). Закономерности миграции землетрясений в Северо-Китайской зоне отражают особенности тектонического строения кратона (рис. 4, А). Землетрясения последнего цикла вызваны усилением сжатия литосферной складки. События раннего цикла связаны с вращением блоков Хэбэй и Ордос. Тектонические механизмы, которые были запущены при реорганизации литосферы в конце мела – начале кайнозоя, продолжают действовать в настоящее время, определяя особенности сейсмичности в Северо-Китайской зоне.

Ключевые слова: Сино-Корейский кратон, зона разломов Тан-Лу, структура литосферы, деформационная волна, Северо-Китайская сейсмическая зона, сейсмические циклы, миграция землетрясений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросы генезиса внутриплитной сейсмичности остаются одними из наименее разработанных и наиболее дискуссионных в современной сеймотектонике [Sherman, Zlogodukhova, 2011; Stone, 2008; Zoback, 2010]. Для их решения мало применимы методики, которые используются при прогнозе и анализе землетрясений на конвергентных границах плит. Серьезные ограничения имеют разломно-блоковые модели геологической среды, в которых анализ сейсмичности зачастую оказывается оторван от особенностей геодинамики региона. В очередной раз катастрофа в провинции Сычуань (12.05.2008 Wenchuan earthquake, $M=7.9$) продемонстрировала недостаточность «эмпирического» подхода, когда исследование ограничивается изучением деформаций в наиболее крупных разломах или в тех из них, которые представляются наиболее опасными [Stone, 2008]. Зачастую сильные толчки неожиданно происходят во второстепенных разломах или в тех нарушениях, которые оставались до события необнаруженными.

При обсуждении теоретических проблем внутриплитной сейсмичности две общих идеи заслуживают, с нашей точки зрения, особого внимания, но разработаны пока недостаточно. Во-первых, первопричиной многих событий являются, по-видимому, деформационные волны, которые обеспечивают привнос необходимой сейсмической энергии и выступают, возможно, в роли триггера землетрясений [Bykov, 2005; Vikulin, 2008; Уломов, 1993; Sherman, 2009; Scholz, 1977]. Во-вторых, для образования зон высокой сейсмичности необходимо определенное «метастабильное» строение литосферы [Sherman, Zlogodukhova, 2011]. Можно предполагать существование своего рода региональных структурных «ловушек», способных поглощать энергию деформационных волн и преобразовывать ее в энергию сильных землетрясений. Строение таких «ловушек» может быть различно, но, когда речь идет о зонах самых сильных землетрясений, такие структуры имеют, по всей видимости, литосферный масштаб и охватывают не только кору, но и верхнюю мантию. Судя по нашему опыту [Stepashko, 2010, 2011], именно структурные особенности литосферной мантии могут играть решающую роль при региональных деформациях, определяя генезис и расположение зон сильных землетрясений.

Показательным примером генезиса внутриплитной сейсмичности является Северо-Китайская зона сильных землетрясений, которая занимает центральную часть Сино-Корейского (Северо-Китайского) кратона, расположенную к югу от Пекина. В региональном обзоре сейсмичности Китая [Xu, Deng, 1996] она выделена под названием «Активная тектоническая провинция Северного Китая», а в сводке сейсмических зон плане-

ты [Sherman, Zlogodukhova, 2011] обозначена как Тан-Луньская зона. Судя по летописям, за последние примерно 1200 лет здесь только в пределах Северо-Китайской равнины было порядка 50 землетрясений с магнитудой ≥ 6.0 [Liu, 1987]. Именно в этой зоне произошли крупнейшие на памяти человечества мировые катастрофы. При землетрясении в провинции Шаньси (1556 г., $M \sim 8$) погибло более 830 тыс. человек, а в самом катастрофическом землетрясении XX века в городе Таншань (1976 г., $M=7.8$) стихия уничтожила только по официальным данным около 240 тыс. человек. По всей видимости, Северо-Китайскую зону следует относить к наиболее опасным областям внутриплитной активности Земли, поскольку здесь исключительно высока плотность населения, находится исторический и экономический центр китайской цивилизации.

Китайскими геологами сделано очень многое для всестороннего изучения характера и природы сейсмичности Северо-Китайской зоны [Ван и др., 1990; Liu, 1987; Liu et al., 2007; Nabelek et al., 1987; Wang, 1987; Xu, Deng, 1996; и многие другие]. Тем не менее ряд принципиальных вопросов ее генезиса продолжает оставаться дискуссионным. В данной работе, исходя из нашего опыта анализа глубинного строения [Stepashko, 1998, 2001] и его значения для сеймотектоники [Stepashko, 2010, 2011], сделана попытка уточнить некоторые существенные аспекты образования Северо-Китайской зоны. Это тем более важно, так как закономерности, которые здесь наблюдаются, делают этот регион показательным примером значимости деформационных волн и структуры литосферной мантии в генезисе внутриплитной сейсмичности.

2. ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧНОСТИ СИНО-КОРЕЙСКОГО КРАТОНА

Само существование Северо-Китайской зоны выглядит парадоксальным с точки зрения общих представлений современной сеймотектоники [Stone, 2006]. Она занимает центральную часть древнего Сино-Корейского кратона (рис. 1, А), возраст фундамента которого составляет порядка 1700 млн лет [Ye et al., 1987]. Позиция необычна, так как континентальные ядра являются, как правило, наиболее пассивными в геодинамическом отношении, а сейсмическая активность концентрируется в гораздо более молодых и мобильных структурах их обрамления. Хорошей иллюстрацией этого общего положения является слабая сейсмичность кратона Янцзы, расположенного непосредственно к югу от Сино-Корейского [Xu, Deng, 1996].

Современная геодинамика также не предполагает высокой активности в Северо-Китайской сейсмической зоне. По крайней мере, с палеогена (~55–50 млн лет назад) тектоническая эволюция на востоке Азиат-

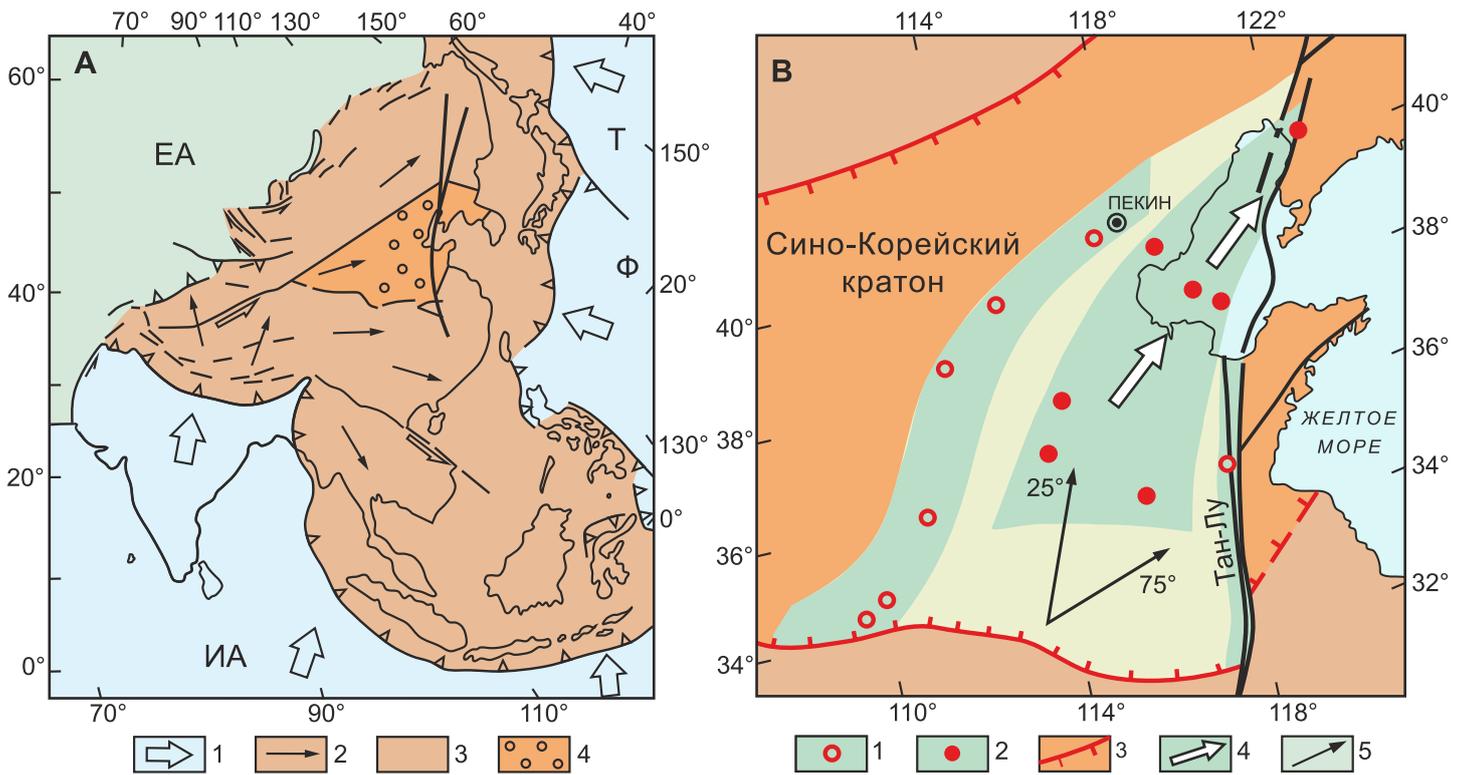


Рис. 1. Внутриплитная позиция Северо-Китайской сейсмической зоны в центральной части Восточноазиатской области тектонической деструкции. А – геодинамическое положение Сино-Корейского кратона в структуре Восточной Азии: 1 – направления движения плит; 2 – траектории перемещения блоков по данным GPS-измерений; 3 – область кайнозойской тектонической деструкции на востоке континента; 4 – Сино-Корейский кратон и положение в его пределах Северо-Китайской сейсмической зоны. Основные плиты: ЕА – Евразийская, Т – Тихоокеанская, Ф – Филиппинская, ИА – Индо-Австралийская. В – позиция Северо-Китайской сейсмической зоны в центральной части Сино-Корейского кратона: 1 – эпицентры землетрясений раннего цикла (таблица); 2 – эпицентры землетрясений позднего цикла; 3 – границы кратона; 4 – направление миграции деформационного фронта по [Scholz, 1977]; 5 – средняя ориентировка разломов в очагах слабых (~75°) и сильных (~25°) землетрясений. Основные разломы сдвиговой мегазоны Тан-Лу показаны линиями черного цвета; зеленым цветом выделен треугольный контур сейсмической зоны; темно-зеленым цветом подчеркнуты сейсмические пояса по [Ван и др., 1990].

Fig. 1. The intra-plate position of the North China seismic zone in the central part of the tectonic destruction area in East Asia. А – geodynamic position of the Sino-Korean craton in the structure of East Asia: 1 – directions of plate movements; 2 – trajectories of block movements as per GPS data; 3 – areas of the Cenozoic tectonic destruction in the eastern part of the continent; 4 – Sino-Korean craton and its extension in the North China seismic zone. Main plates: EA – Eurasian; T – Pacific ocean; Ф – Philippine; ИА – Indo-Australian. В – position of the North China seismic zone in the central part of the Sino-Korean craton: 1 – earthquake epicentres of the earlier cycle (see Table); 2 – earthquake epicentres of the latest cycle; 3 – margins of the craton; 4 – direction of migration of the deformation front according to data from [Scholz, 1977]; 5 – average orientations of faults in foci of weak (~75°) and strong (~25°) earthquakes. The main faults of the Tan-Lu shear mega-zone are shown by black lines; the triangle-shaped seismic zone is shown in green; seismic belts shown according to data from [Ван и др., 1990] are dark green.

ского континента была обусловлена встречным столкновением океанических плит: Индо-Австралийской, Тихоокеанской, Филиппинской, с Евразийской плитой (рис. 1, А). В таких условиях сильные землетрясения концентрируются, естественно, вдоль коллизионных границ основных плит. Сино-Корейский кратон расположен изолированно и максимально удален от этих границ (рис. 1, А). Здесь геодинамическое воздействие океанических плит должно, и это подтверждается данными GPS-измерений, ослабевать до минимальных значений, что совсем не предполагает появления зоны сильных землетрясений.

Современные кинематические и геологические дан-

ные показывают, что в настоящее время главную геодинамическую роль на востоке Азии играет горизонтальное сжатие в Гималайской зоне коллизии. Под воздействием Индо-Австралийской плиты происходит разрушение окраины континента, дробление его коры на тектонические блоки, постепенно сползающие на восток в сторону Тихого океана [Gatinsky, Rundquist, 2004; Зоненшайн и др., 1990; Molnar, Tapponier, 1975; и др.]. Наиболее ярко этот процесс отражается в результатах GPS-измерений, которые для Северного Китая показывают перемещения блоков с запада на восток в субширотном направлении [Liu et al., 2007]. Судя по сводке фокальных механизмов [Ван и др., 1990], с

Землетрясения сейсмической зоны Северного Китая

Earthquakes of the North China seismic zone

№	Дата	Район	Широта	Долгота	Магнитуда	Δ Т, год
Первый цикл, 1500–1700 гг.						
1	19.01.1501	Чаофу	34.8	110.1	7	-
2	23.01.1556	Хуасянь	34.5	109.7	8	55
3	28.06.1626	Линцзо	39.4	114.2	7	70
4	25.07.1668	Яньчэн	35.3	118.6	8.5	42
5	02.09.1679	Саньхэ	40.0	117.0	8	11
6	22.11.1683	Юаньнин	38.7	112.7	7	4
7	18.05.1695	Линьфэнь	36.0	111.5	8	12
Второй цикл, 1800–1980 гг.						
8	12.06.1830	Цысянь	36.4	114.2	7.5	135
9	13.06.1888	Бохайвань	38.5	119.0	7.7	58
10	01.08.1937	Хэнзе	35.2	115.2	7	49
11	22.03.1966	Нинпу	37.5	115.1	7.2	29
12	18.07.1967	Бохай	38.2	119.4	7.4	1
13	04.02.1975	Хайчэн	40.7	122.8	7.3	8
14	28.07.1976	Таншань	39.6	118.2	7.8	1

П р и м е ч а н и е. Названия и параметры землетрясений по [Ван и др., 1990], Δ Т – длительность паузы между данным землетрясением и предыдущим.

N o t e. Earthquake names and parameters are given according to [Ван и др., 1990]. Δ Т – duration of a quiescent period between the given earthquake and the previous earthquake.

этим согласуются, однако, лишь слабые землетрясения Северо-Китайской зоны, азимут простирания разломов в очагах которых составляет в среднем 75° (рис. 1, В). Средний азимут простирания нарушений для сильных толчков резко отличается и имеет ССВ направление $\sim 25^\circ$ [Ван и др., 1990]. Это различие ставит под сомнение прямое воздействие Индо-Азиатской коллизии на генезис сильных землетрясений Северо-Китайской зоны.

Существование области сильной сейсмичности на Сино-Корейском кратоне противоречит, таким образом, как общим представлениям сейсмотектоники, так и характеру современной геодинамики на востоке Азии. Тем не менее в Северо-Китайской сейсмической зоне за период с 1500 г. по настоящее время произошло 17 землетрясений магнитудой ≥ 7.0 [Xu, Deng, 1996]. Параметры 14 самых сильных (таблица) по сводке [Ван и др., 1990] ниже используются при анализе пространственно-временных закономерностей сейсмического процесса. Эпицентры всех землетрясений локализованы в границах Сино-Корейского кратона в пределах и к западу от мегасистемы сдвигов Тан-Лу (рис. 1, В). В первом приближении они объединяются в три сейсмических пояса [Ван и др., 1990]. Эпицентры западного пространственно приурочены к рифтовой системе Шаньси (Shanxi) [Xu, Deng, 1996]. Землетря-

сения второго – центрального – пояса смещены на восток (рис. 1, В) и пространственно отвечают многочисленным грабнам равнины Хэбэй (Hebei). Землетрясения третьего – восточного – пояса локализованы в разломной мегазоне Тан-Лу.

На северо-востоке кратона все пояса, сближаясь, соединяются, формируя в целом треугольную конфигурацию Северо-Китайской сейсмической зоны (рис. 1, В). Ее ограничивает на западе полоса грабенов системы Шаньси, на востоке – мегазона Тан-Лу, на юге край Сино-Корейского кратона. В границах этой же области, как неоднократно отмечалось [Ma, Wu, 1987; Ye et al., 1987], сосредоточены также все главные рифтовые системы Северного Китая. В ее центре степень растяжения коры достигает, видимо, 30 %. Такая взаимосвязь областей рифтогенеза и сейсмичности, явно, не случайна. Однако землетрясения Северо-Китайской зоны заведомо не могут быть прямым следствием рифтогенных процессов, так как главная фаза регионального растяжения давно закончилась. И хотя вдоль северного края кратона небольшие осадочные впадины формировались и в миоцен-четвертичное время, на основной территории процессы рифтогенеза господствовали в эоцене, завершились в олигоцене, а в миоцене сменились пострифтовым прогибанием [Ma, Wu, 1987; Ye et al., 1987].

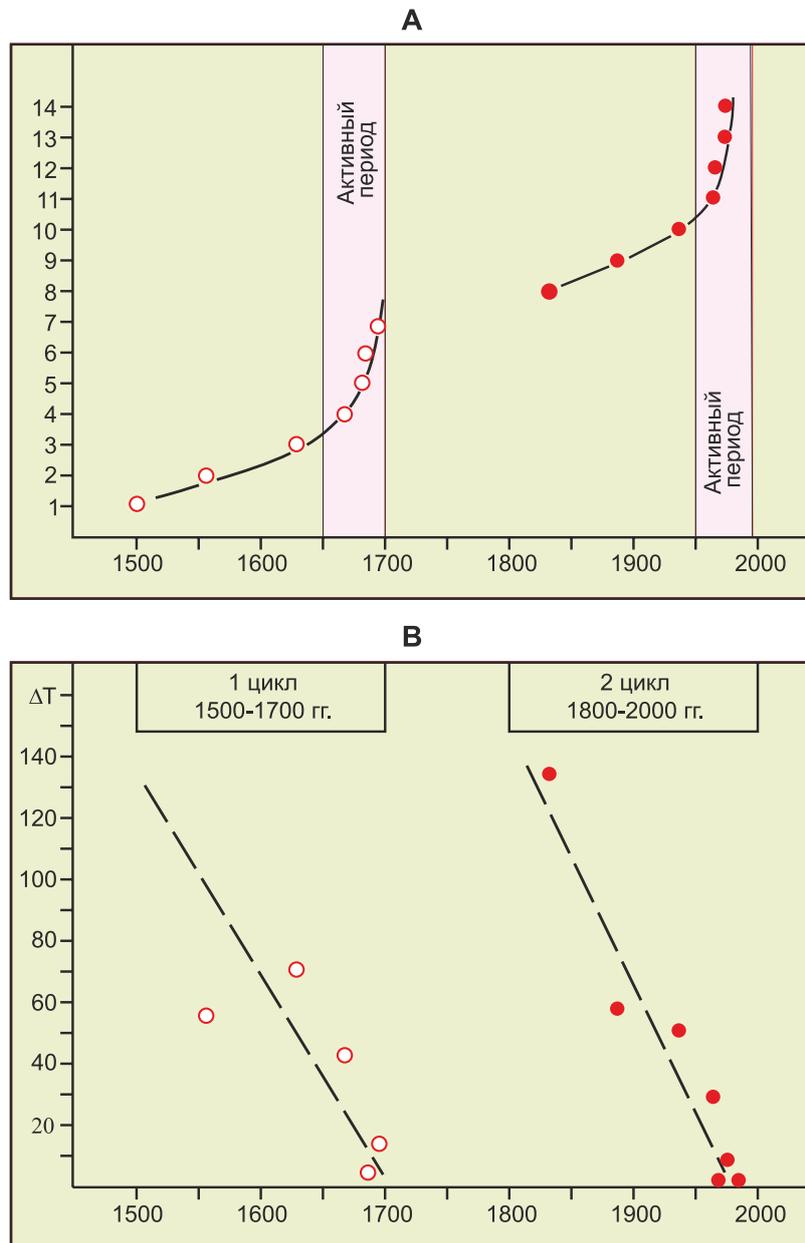


Рис. 2. Сейсмические циклы Северо-Китайской зоны. А – кумулятивная кривая сильных землетрясений зоны. Ось абсцисс – даты землетрясений, ось ординат – порядковый номер землетрясения. Розовым цветом выделены активные периоды по [Xu, Deng, 1996]. В – закономерное сокращение сейсмопаузы (ΔT по оси ординат) между землетрясениями в циклах. Разными кружками обозначены землетрясения двух циклов.

Fig. 2. Seismic cycles of the North China seismic zone. A – cumulative curve of strong earthquakes in the zone. X axis – earthquake dates; Y axis – earthquake numbers. Pink colour marks active periods shown according to data from [Xu, Deng, 1996]. B – regular reduction of the quiescent period (ΔT at Y axis) between earthquakes in the cycles. Circles of various sizes show earthquakes of the two cycles.

3. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ СЕВЕРО-КИТАЙСКОЙ ЗОНЫ И ЦИРКУМ-ТИХООКЕАНСКАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ ВОЛНА

Самой яркой особенностью Северо-Китайской зоны является сейсмическая цикличность, причем землетрясения пограничных поясов – западного и восточного – имеют гораздо более ранний возраст (таблица), по сравнению с землетрясениями центрального пояса. По

мнению китайских сейсмологов, следует выделять два цикла землетрясений (рис. 2, А), первый продолжался с 1500 г. по 1700 г., второй – с 1700 г. по 1976 г. [Xu, Deng, 1996]. Каждый цикл в этом случае начинался продолжительным спокойным периодом и завершался кратким периодом очень высокой сейсмической активности. Такое деление, как показывает закономерное уменьшение длительности паузы между землетрясе-

ниями (ΔT) в зависимости от времени (рис. 2, В), недостаточно отражает динамику сейсмического процесса. Из графика следует, что частота землетрясений в каждом из циклов систематически возрастает, достигая максимума к концу цикла. Затем следует длительная пауза продолжительностью порядка 100 лет. Начала двух циклов отвечают рубежам ~ 1500 , ~ 1800 гг., они продолжаются примерно 200 лет и повторяются через 300 лет. Последний сейсмический цикл завершился Тяньшаньским землетрясением (1976 г.), и затем началась предположительно столетняя пауза. С 1976 г. в Северо-Китайской зоне на протяжении 35 лет не было сильных землетрясений.

Циклическое изменение сейсмической активности на севере Китая предполагает ее генетическую связь с распространением в литосфере деформационных волн [Вуков, 2005; Уломов, 1993; Sherman, 2009]. В модели сейсмичности Китая [Wang, Zhang, 2005] волны пластических деформаций образуются в Гималайской зоне при коллизии Индийского блока с Евразией. Периодически они мигрируют на север и восток, вызывая сильные землетрясения на территории всего Китая, в том числе в Северо-Китайской сейсмической зоне. В этой модели, однако, деформационные волны имеют периоды ~ 10 , ~ 93 и ~ 106 лет. Сейсмические циклы, которые наблюдаются в Северо-Китайской зоне, повторяются через ~ 300 лет и с этой моделью не согласуются.

В упомянутой модели сейсмичности деформационные волны на севере Китая распространяются с запада на восток [Wang, Zhang, 2005], что хорошо отвечает (см. рис. 1, А) субширотным траекториям тектонических перемещений по результатам GPS-измерений [Liu et al., 2007]. Но с этой ориентировкой, как отмечалось (см. рис. 1, В), согласуются только слабые землетрясения Северо-Китайской зоны. Для сильных же землетрясений фокальные механизмы предполагают совсем иную – северо-восточную или близкую к меридиональной – ориентировку регионального сжатия. Именно такая траектория миграции фронта деформаций в 60–70-е гг. прошлого века (см. рис. 1, В) была обнаружена С. Шольцем в районе п-ова Ляодун и залива Бохайвань [Scholz, 1977]. С перемещением этого фронта были связаны, по крайней мере частично, сильные землетрясения, которые завершали второй сейсмический цикл в Северо-Китайской зоне.

Предполагаемый северо-восточный вектор миграции сейсмичности заставляет обратить внимание на гипотезу Циркум-Тихоокеанской деформационной волны, которая периодически перемещается с юга на север вдоль окраины Азиатского континента, усиливая сейсмичность по периферии Тихого океана [Вуков, 2005; Kuznetsov, Keilis-Borok, 1997]. Недавно была высказана гипотеза о том, что эта деформационная волна вызывает в Тихоокеанском кольце разрядку не только сейсмической, но и вулканической энергии [Викулин и др., 2009, 2010] (рис. 3). Такое допущение дало воз-

можность использовать, наряду с датировками шести самых сильных землетрясений XVII–XX вв. с $M \geq 8.8$, более полные данные о двадцати двух самых сильных вулканических извержениях Тихоокеанского кольца, которые произошли за последние 2000 с лишним лет [Викулин и др., 2009, 2010]. При анализе «смешанной» выборки катастрофических событий было обнаружено семь деформационных волн, которые раз в ~ 300 лет мигрируют вдоль окраины Тихого океана от Новой Зеландии до Южной Америки [Викулин и др., 2009, 2010]. Скорость миграции волн деформаций составляет ~ 100 км/год. Прямым подтверждением этой гипотезы стало землетрясение 27.02.2010 г. в Чили магнитудой 8.8 (рис. 3).

Сейсмическая цикличность в Северо-Китайской зоне обнаруживает несомненную связь с Циркум-Тихоокеанской деформационной волной. Во-первых, предполагаемое северо-восточное направление миграции землетрясений в зоне согласуется с траекторией перемещения волны деформаций по границе океана и континента. Во-вторых, цикличность землетрясений в зоне совпадает с периодичностью Циркум-Тихоокеанской волны. Независимо рассчитанный интервал в обоих случаях составляет ~ 300 лет. В соответствии с гипотезой Викулина за последние столетия вдоль окраины Азии прошло две волны деформаций, которым отвечают линии под номерами 6 и 7 (рис. 3). Первая зародилась в районе Новой Зеландии в 1400 г. и через 100 лет, пройдя ~ 10000 км, достигла Северного Китая, где в ~ 1500 г. начался первый цикл сильных землетрясений (рис. 3). Вторая Циркум-Тихоокеанская волна зародилась в ~ 1700 г. и через 100 лет – в ~ 1800 г. – вызвала в Северном Китае начало второго цикла землетрясений. Следующая волна деформаций (№ 8, рис. 3) формируется, видимо, в настоящее время. Вызванное ею начало сейсмического цикла следует ожидать в Северо-Китайской зоне в районе 2100 г.

Циркум-Тихоокеанские волны деформаций генетически связаны, по оценкам всех исследователей, с тектоническими процессами в зоне субдукции в районе о-ва Тонга – Новая Зеландия [Викулин и др., 2009; Kuznetsov, Keilis-Borok, 1997; Маламуд, Николаевский, 1985]. Здесь же находится главный планетарный максимум плотности землетрясений, вызванный коллизией двух основных океанических плит: Тихоокеанской и Индо-Австралийской [Fridman, Klimenko, 2002]. С учетом масштаба тектонических процессов, не удивительно, что волна деформаций, которая здесь, видимо, генерируется, способна вызывать самые сильные землетрясения и вулканические извержения Тихоокеанского кольца. Особенности распределения сейсмичности по вертикали в районе Новой Зеландии показывают [Маламуд, Николаевский, 1985], что наиболее благоприятным местом генерации деформационных волн является граница литосферы и астеносферы. Судя по продолжительности сейсмических циклов (рис. 3), землетрясения в Северо-Китайской зоне продолжались

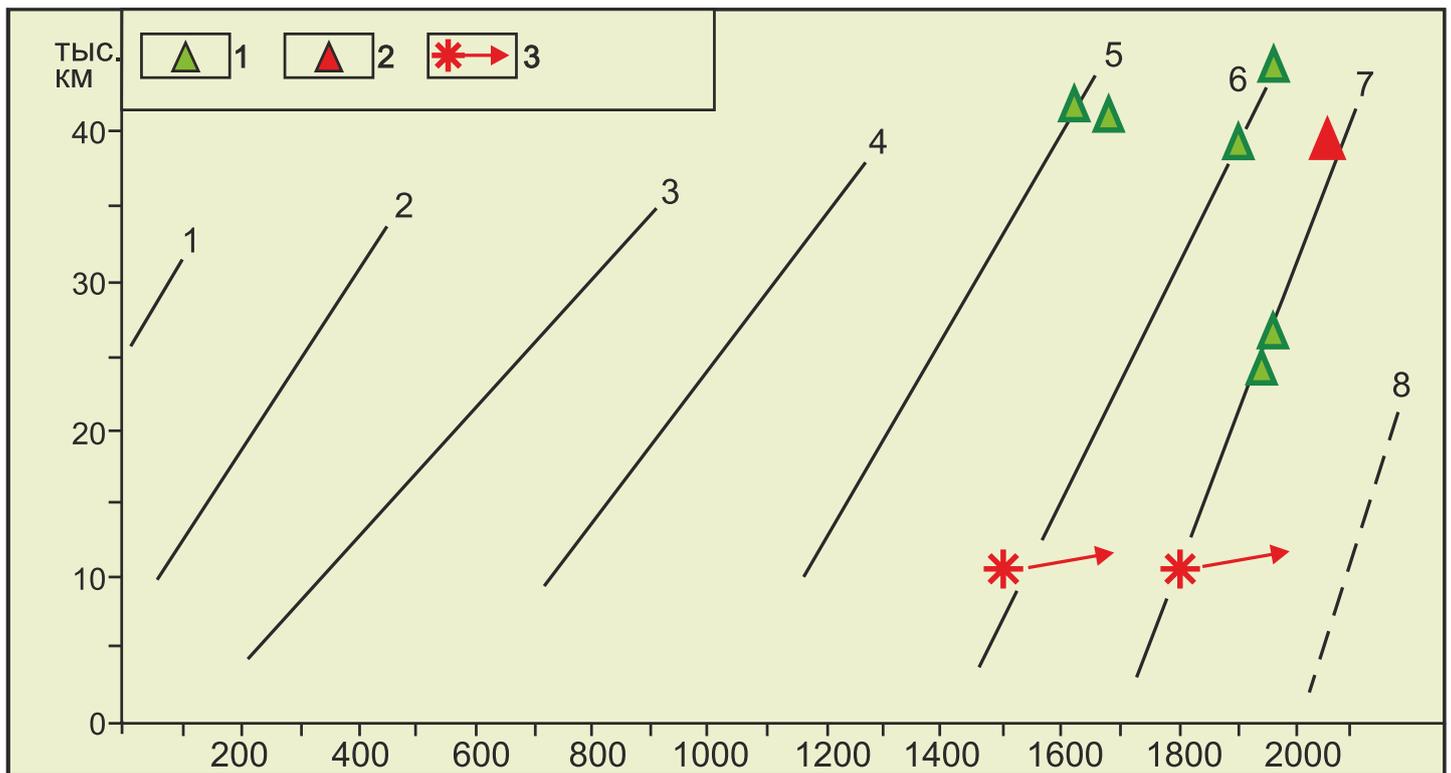


Рис. 3. Пространственно-временные закономерности миграции Циркум-Тихоокеанской деформационной волны вдоль окраин Тихого океана. По оси абсцисс – годы катастрофических извержений вулканов и землетрясений Тихоокеанского кольца; по оси ординат – их расстояние от Новой Зеландии, тыс. км. Под номерами 1–8 показаны линии регрессии, описывающие периодическую миграцию волны деформаций по: 1 – землетрясения с магнитудой ≥ 8.8 по [Викулин и др., 2010]; 2 – землетрясение 27.02.2010 г. в Чили с $M=8.8$; 3 – циклы сильных землетрясений в Северо-Китайской сейсмической зоне: звездочками показаны годы, когда они начинаются, стрелками – их продолжительность.

Fig. 3. Space-and-time regularities of migration of the Circum Pacific deformation wave along the margins of the Pacific ocean. X axis – dates of catastrophic eruptions of volcanoes in the Pacific ocean belt; Y axis – distances from volcanoes to New Zealand (K km). Regression lines numbered from 1 to 8 reflect regular migration of the deformation wave according to data: 1 – strong earthquakes ($M \geq 8.8$) according to data from [Викулин и др., 2010]; 2 – 27.02.2010 earthquake ($M=8.8$) in Chile; 3 – cycles of strong earthquakes in the North China seismic zone: stars show cycle-start years, and arrows show duration of the cycles.

еще много лет после того, как фронт деформаций уходил далеко на север. Следовательно, Циркум-Тихоокеанская деформационная волна является лишь триггером, который провоцирует разрядку напряжений.

4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ МИГРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СТРОЕНИЕ ЛИТОСФЕРЫ СИНО-КОРЕЙСКОГО КРАТОНА

Деформационная волна, распространяясь в мантии вдоль окраины континента, именно в пределах Северо-Китайской зоны вызывает сильные землетрясения. Причина этого кроется в особом тектоническом строении литосферы Сино-Корейского кратона. Прежде всего, обращает на себя внимание пространственная связь сильных землетрясений Северного Китая с областями рифтогенеза [Liu, 1987; Wang, 1987]. В центральной части кратона выделяются две крупных

кайнозойских рифтогенных системы: западная и центральная (рис. 4, А).

Расположенная на западе система Шаньси имеет S-образную конфигурацию и объединяет впадины южного и восточного обрамления блока Ордос [Liu, 1987; Wang, 1987; Ye et al., 1987]. Рифтогенез здесь начался в палеогене на юго-западе (грабен Вейхэ) и постепенно смещался в северо-восточном направлении. Современная активность сохраняется, по всей видимости, в четвертичных впадинах вдоль северного края кратона. Эпицентры землетрясений первого цикла образуют вытянутый и изогнутый сейсмический пояс (рис. 4, А), повторяющий контур рифтогенной системы Шаньси. Первые землетрясения цикла (1501 и 1556 гг.) произошли на юге пояса (рис. 4, А), однако в целом миграция сейсмичности происходит не в северном направлении, а с запада – северо-запада на восток – юго-восток. При этом фронт деформации повторяет

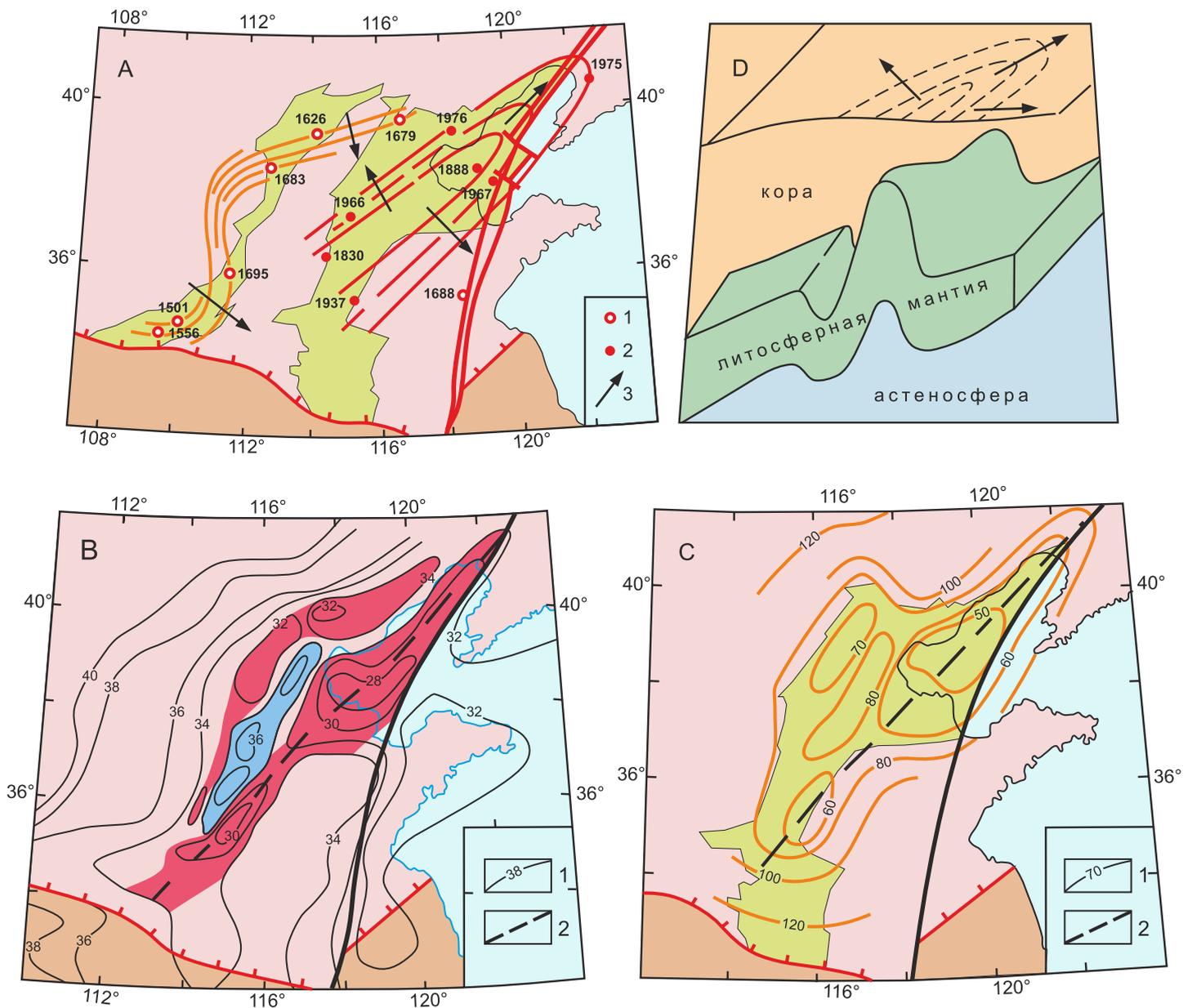


Рис. 4. Закономерности миграции сильных землетрясений в Северо-Китайской зоне и структура литосферы Сино-Корейского кратона. *A* – пространственная связь сейсмичности с рифтогенезом: 1, 2 – эпицентры землетрясений двух циклов, цифрами показаны годы событий; 3 – направления миграции сейсмичности в каждом из циклов; изохронами показана предполагаемая конфигурация фронтов деформаций. Западная и восточная системы рифтогенеза выделены зеленым цветом. *B* – схема региональных вариаций глубины поверхности Мохо: 1 – изолинии мощности коры в км по [Ye et al., 1987] с упрощениями; 2 – линия максимального сокращения мощности коры. Красным цветом выделены поднятия, синим – опускания кровли мантии. *C* – схема вариаций глубины подошвы литосферной мантии: 1 – изолинии высокопроводящей астеносферы в км по [Liu, 1987]; 2 – осевая линия астеносферного поднятия (предполагаемый замок литосферной складки). Зеленым цветом показана рифтовая система Хэбэй. *D* – принципиальная модель литосферной складки, расположенной в основании кратона. Пунктиром и стрелками обозначены направления миграции сейсмичности над апикальной частью литосферной складки.

Fig. 4. Locations regularities of migration of strong earthquakes in the North China seismic zone, and the lithospheric structure of the Sino-Korean craton. *A* – spatial relation between seismicity and rifting: 1, 2 – epicentres of earthquakes in two cycles (numbers show years when the earthquakes occurred); 3 – directions of seismicity migration in each cycle; isochrone lines show forecasted configurations of deformation fronts. The western and eastern rifting systems are shown in green. *B* – scheme showing regional variations of depths of the Moho discontinuity: 1 – isolines of the crustal thickness (km) according to data from [Ye et al., 1987] (simplified); 2 – line of the maximum reduction of the crustal thickness. Uplifts are shown in red; areas of sinking of the mantle top are shown in blue. *C* – scheme showing variations of depths of the lithospheric mantle bottom: 1 – isolines of the high-conductivity asthenosphere (km) according to data from [Liu, 1987]; 2 – the axial line of the asthenospheric uplift, i.e. the forecasted hinge of the lithospheric fold. The Hebei rift system is shown in green. *D* – conceptual model of the lithospheric fold located at the base of the craton. Dotted lines and arrows show directions of seismicity migration above the apical part of the lithospheric fold.

S-образный изгиб, характерный для полосы грабенов рифтогенной системы Шаньси.

Рифтовые грабены второй системы Хэбэй (рис. 4, А) образуют широкую изогнутую область в пределах Великой Китайской равнины [Liu, 1987; Ye et al., 1987]. К этой рифтогенной системе пространственно приурочены эпицентры землетрясений второго сейсмического цикла. Первые толчки здесь (1830, 1937 гг.) также были на юге, однако особенности миграции землетрясений в данном случае резко отличаются (рис. 4, А). Изохроны описывают вытянутую поверхность вариаций, от центра к периферии которой происходит миграция землетрясений. Узкая осевая часть вариационной поверхности имеет северо-восточное простирание и ориентирована согласно с траекторией перемещения деформационного фронта (см. рис. 1, В), намеченной С. Шольцем [Scholz, 1977]. Рисунок миграции сейсмичности во втором цикле необычен и явно не связан с конфигурацией рифтогенной системы Хэбэй (рис. 4, А). Его закономерный характер и генетический смысл обнаруживаются при анализе глубинного строения Сино-Корейского кратона.

Структура верхней части литосферы зафиксирована в региональных вариациях мощности коры на севере Китая [Ye et al., 1987]. В направлении с запада на восток глубина поверхности М постепенно уменьшается от 40 до 32 км (рис. 4, В), затем выделяется узкая полоса, в которой Мохо вновь погружается до 36 км. Ее сменяет вытянутое поднятие кровли мантии, ориентированное в северо-восточном направлении. Оно имеет два максимума, в которых кора кратона резко сокращена до 30–28 км. Далее на восток глубина поверхности М возрастает и затем меняется слабо, оставаясь в пределах 32–34 км. Очень близкий рисунок вертикального изгиба [Liu, 1987], в котором сопряжены линейная зона прогибания на западе и вытянутое поднятие на востоке, наблюдается в рельефе астеносферы кратона (рис. 4, В). Зоне, в которой мощность коры сокращена до 30–28 км, в данном случае отвечает поднятие астеносферы, также состоящее, подчеркнем, из двух максимумов, в которых астеносфера поднята до глубины 50–60 км. Главные особенности глубинного строения, таким образом, проявляются одинаково как в рельефе границы кора–мантия, так и в поверхности астеносферы. Структуру центральной части кратона определяет гигантская антиклинальная складка литосферной мантии, замок которой вытянут в северо-восточном направлении (рис. 4, D).

Очевидное соответствие структурных рисунков доказывает (рис. 4), что землетрясения последнего сейсмического цикла в Северо-Китайской зоне закономерно мигрировали, подчиняясь глубинной структуре кратона. Миграция происходила (рис. 4, А) от апикальной поверхности литосферной складки к ее периферии, согласуясь с положением и ориентировкой замка этой структуры. Приход Циркум-Тихоокеанской деформационной волны, видимо, усиливал вертикальный изгиб

мантийной складки, подъем ее апикальной части, давление которой вызывало дополнительное сжатие коры и сейсмическую активизацию на севере Китая.

5. ПРИРОДА И МЕХАНИЗМЫ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ РЕОРГАНИЗАЦИИ ЛИТОСФЕРЫ В МЕГАЗОНЕ ТАН-ЛУ

Рифтогенная система Хэбэй располагается прямо над мантийной складкой (рис. 4, В). Палеогеновый рифтогенез, очевидно, сопровождал и завершал преобразование глубинной структуры, подъем астеносферы и сокращение мощности коры, которые отразили поздне-мезозойскую активизацию Сино-Корейского кратона [Fan et al., 2000; Xu., 2001; Zheng et al., 2001; Zheng et al., 2007]. Обычно предполагается, что главные роли в этой модификации литосферы играли магматические расплавы и метасоматические флюиды, связанные с субдукцией тихоокеанских плит под континентальную окраину [Feng et al., 2010; Menzies et al., 2007; Xu et al., 2008]. Однако, рассматривая причину реорганизации структуры кратона, важнее, по нашему мнению, учитывать те сдвиговые перемещения, которые господствовали на окраине Азии в конце мезозоя.

В пределах кратона поздне-мезозойская тектоническая эволюция протекала при активном перемещении региональных блоков в сдвиговой мегазоне Тан-Лу [Grimmer et al., 2002; Wang et al., 2011; Xu et al., 1987]. По протяженности, свыше 2000 км, она относится к числу крупнейших в мире (см. рис. 1). Начинаясь к югу от Сино-Корейского кратона, Тан-Лу пересекает его с юга на север и продолжается в пределы Центрально-Азиатского орогенного пояса. У северной границы кратона мегазона разветвляется на два расходящихся сдвига: западный – Илань-Итунский и восточный – Фушунь-Мишаньский (рис. 5, А). Эти разломы, как показало изучение вариаций состава мантийных ксенолитов из щелочных базальтов Сихотэ-Алиня, ограничивают аномальный по железистости блок мантии, который прослеживается по ксенолитам и базальтам вплоть до Татарского пролива [Stepashko, 1988, 1998, 2001]. Глубинный тектонический блок имеет клинообразную конфигурацию и вытянут на северо-восток (рис. 5, А) примерно на 1500 км при длине основания порядка 400 км.

В региональном геологическом строении на территории России границы глубинного блока явно не обнаруживаются, но подтверждаются данными магнито-теллурического зондирования. Последние предполагают, что сдвиги Тан-Лу, пронизывая всю литосферную мантию, продолжаются до глубины 250–300 км [Kaplun, 1994, 1998]. Анализ сейсмичности показывает, что скрытый в основании Сихотэ-Алиньской области тектонический блок аномальной мантии принимает самое активное участие в современных деформациях региона [Stepashko, 2010]. Все известные за последние 100 лет

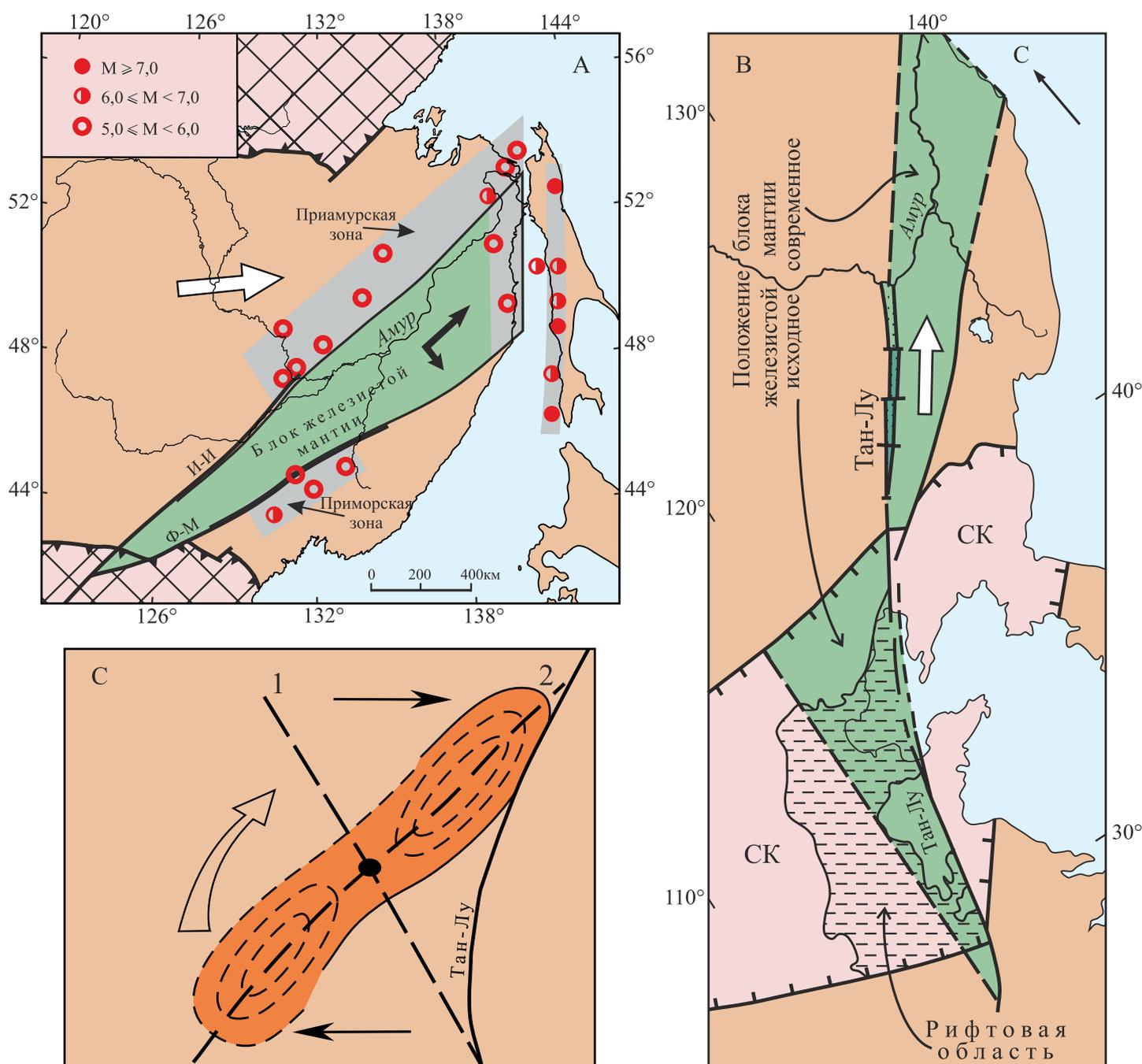


Рис. 5. Модель тектонической реорганизации литосферной структуры в разломной мегазоне Тан-Лу. *A* – сейсодинамика аномального блока железистой мантии (показан зеленым цветом), расположенного в основании Сихотэ-Алиньского орогена. Красным цветом показаны Северо-Азиатский и Сино-Корейский кратоны. Главные разломы мегазоны Тан-Лу обозначены: И-И – Илань-Итунский, Ф-М – Фушунь-Мишаньский. Ориентировка регионального сжатия показана большой стрелкой. Черными стрелками обозначены направления перемещения мантийного блока под действием западного сжатия. Кружки – эпицентры землетрясений с магнитудой ≥ 5.0 . Серым цветом подчеркнуты сейсмические зоны, обрамляющие границы мантийного блока. *B* – реконструкция перемещений глубинного тектонического блока, фрагмента Сино-Корейского кратона в мегазоне Тан-Лу. Приведены современное и исходное положения мантийного блока, большой стрелкой показано направление его движения в юрско-меловое время; СК – Сино-Корейский кратон. *C* – принципиальный механизм генезиса литосферной складки в основании кратона. Оранжевым цветом показана область сжатия, которая образуется при горизонтальном повороте вертикального литосферного раздела (пунктирная прямая) из положения 1 в положение 2. Тонкими пунктирными линиями подчеркнуты два максимума сжатия, которым отвечают два поднятия (рис. 4, *B*, *C*) в апикальной части литосферной складки. Большой стрелкой показано направление горизонтального вращения тектонического блока.

Fig. 5. The model of tectonic restructuring of the lithospheric structure in the Tan-Lu fault mega-zone. *A* – seismodynamics of the anomalous block of the ferruginous mantle (shown in green), which is located at the base of the Sikhote Alin orogen. The North Asian and Sino-Korean cratons are shown in red. Main faults of the Tan Lu mega-zone: И-И – Ilan-Itun; Ф-М – Fushun-Mishan. The big arrow shows the orientation of regional compression. Black arrows show directions of displacement of the mantle block due to the western compression. Circles show epicentres of earthquakes ($M \geq 5.0$). Seismic zones bordering the margins of the mantle block are shown in grey. *B* – reconstructed displacements of the deep-seated tectonic block that is a fragment of the Sino-Korean craton in the Tan Lu mega-zone. The current and initial positions of the mantle block are shown; the big

arrow shows the direction of its displacement in the Jurassic-Cretaceous; CK – the Sino-Korean craton. *C* – conceptual mechanism of genesis of the lithospheric fold at the base of the craton. The compression area is shown in orange; it is formed by the horizontal turn of the vertical lithospheric section (shown by the dotted line) from Position 1 to Position 2. Thin dotted lines show two compression maximums corresponding to two uplifts (see Figures 4, *B* and 4, *C*) in the apical part of the lithospheric fold. The big arrow shows the direction of the horizontal rotation of the tectonic block.

землетрясения на юго-востоке России с магнитудой $M \geq 5.0$ концентрируются в Приамурской, Приморской и Сахалинской сейсмических зонах (рис. 5, *A*), обрамляющих скрытые на глубине границы мантийного блока. Особенности миграции землетрясений показывают, что в настоящее время под действием западного сжатия мантийный клин выдавливается на северо-восток по простиранию и поворачивается при этом по часовой стрелке [Stepashko, 2011].

Наиболее интенсивными перемещения в мегазоне Тан-Лу были в юрско-меловое время [Grimmer et al., 2002; Wang et al., 2011], когда крупные литосферные блоки транслировались по ее сдвигам на северо-восток вдоль границы континента и океана. Мантийный блок, обнаруженный в основании Сихотэ-Алиньской области, принимал самое активное участие в этом процессе, выдавливаясь на северо-восток под действием поперечного сжатия по расходящимся сдвигам мегазоны Тан-Лу. Положение разломов мегазоны в региональной структуре (рис. 5, *B*) позволяет считать, что треугольный мантийный блок первоначально являлся частью Сино-Корейского кратона и был «вырезан» из него в результате тектонических перемещений. В этом случае, возвращая его к началу мегазоны Тан-Лу на юге (рис. 5, *B*), можно наметить первоначальное положение перемещенного блока в пределах Сино-Корейского кратона.

Участие мантийного блока в региональных перемещениях в меловое время имело важнейшие последствия для структурной реорганизации литосферы кратона. Пространство, в котором изначально находился вырезанный блок, не могло оставаться зияющим и неизбежно должно было закрыться. Главную роль в этом играли, несомненно, процессы регионального растяжения литосферы и перемещения тектонических блоков. Детальная реконструкция сценария тектонической реорганизации при закрытии едва ли возможна, но, судя по структуре кратона, основную роль в ней играли два тектонофизических механизма.

Во-первых, закрытие исходного треугольного контура к западу от Тан-Лу должно было сопровождаться горизонтальным вращением литосферного раздела по часовой стрелке из положения 1 в положение 2 (рис. 5, *C*). На движущемся фронте в этом случае возникает зона сжатия с двумя максимумами – к северо-востоку и юго-западу от точки вращения. Именно такой структурный рисунок (см. рис. 4, *B*, *C*) наблюдается в изолиниях как кровли астеносферы, так и рельефа

Мохо к западу от мегазоны Тан-Лу. Этот тектонический механизм и привел, по всей видимости, к образованию гигантской литосферной складки в основании кратона. С растяжением литосферы, неизбежным при закрытии свободного пространства, связан палеогеновый рифтогенез восточной системы Хэбэй (рис. 5, *A*), расположенной над литосферной складкой.

Во-вторых, вращение тектонического блока Хэбэй по часовой стрелке вовлекало в аналогичное вращение, но уже против часовой стрелки, расположенный к западу блок Ордос (рис. 6, *A*). Такой стиль ротации блоков по схеме «сцепленных шестеренок», по всей вероятности, является обычным для внутриплитных тектонических перемещений на востоке Азии [Konk, 1997]. Генезис S-образной полосы рифтов Шаньси, которая разделяет западный и восточный блоки Сино-Корейского кратона, очевидно, связан именно с взаимным вращением двух блоков. Вполне возможно, что этот же процесс также определил необычную округлую конфигурацию западного тектонического блока Ордос.

Анализ геологического строения позволяет провести независимую проверку ротационной модели. В древней истории Сино-Корейского кратона одним из ключевых событий было внедрение гигантского роя основных даек 1.78 млрд лет назад [Peng et al., 2008]. Особенности простирания даек (рис. 6, *B*) отразили относительно недавний разнонаправленный поворот восточного (Хэбэй) и западного (Ордос) блоков. Исходная северо-западная ориентировка мантийного раздела в модели ротации (см. рис. 5, *B*) практически совпадает с простиранием даек в центральной части кратона. Блок Хэбэй вращался по часовой стрелке, и простирание даек, расположенных к востоку от Пекина, соответственно, стало северо-восточным (рис. 6, *B*). Противоположная картина наблюдается для западного блока Ордос, который был повернут против часовой стрелки. Точно такой же разворот на запад наблюдается (рис. 6, *B*) в ориентировке древних даек этого блока.

Закономерности пространственной миграции землетрясений в Северо-Китайской зоне показывают (см. рис. 4, *A*), что два описанных механизма ротации продолжают действовать, играя главную роль в современной геодинамике кратона. Приходящая с юга Циркум-Тихоокеанская деформационная волна активизирует попеременно один из механизмов. В первом случае возобновляется поворот вертикального литосферного раздела, усиливается сжатие в центре зоны, область

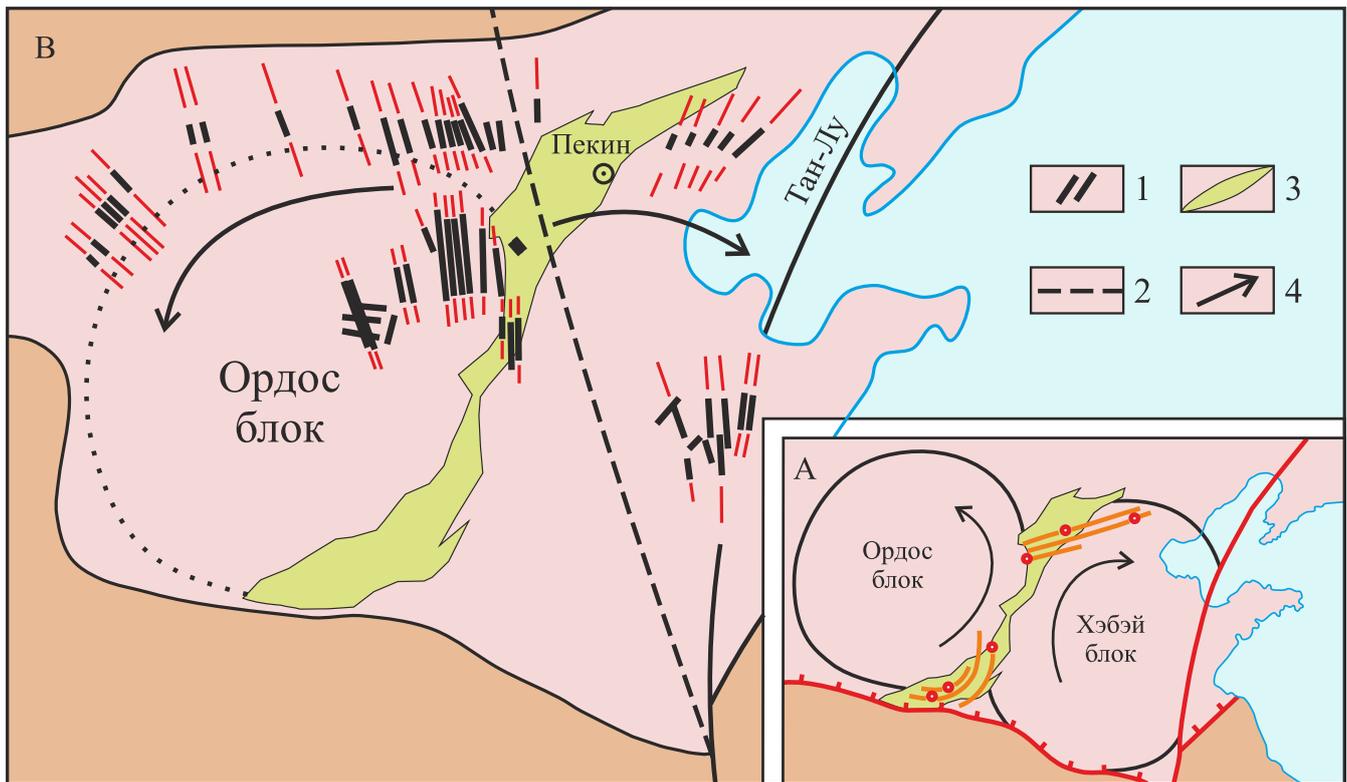


Рис. 6. Реконструкция вращения блоков Хэбэй и Ордос Сино-Корейского кратона по схеме сцепленных шестеренок. А – принципиальная модель генезиса рифтовой системы Шаньси (выделена зеленым цветом) на границе вращающихся блоков. Стрелки – направления поворота тектонических блоков; кружки – эпицентры землетрясений раннего сейсмического цикла; пунктиром показан характер миграции сейсмичности (см. рис. 4, А). В – вариации простирания древних (1.78 млрд лет) даек как доказательство противоположного вращения западного и восточного блоков кратона: 1 – ориентировка даек по [Peng et al., 2008], тонкие линии здесь добавлены для усиления контраста в простирании даек; 2 – исходное положение литосферного раздела (западная граница перемещенного мантийного блока); 3 – рифтовая система Шаньси; 4 – направления вращения западного (Ордос) и восточного (Хэбэй) блоков кратона.

Fig. 6. Reconstructed rotation of the Hebei and Ordos blocks of the Sino-Korean craton (like linked gear). А – conceptual model showing genesis of the Shanxi rift system (shown in green) at the border between the rotating blocks. Arrows show directions of rotation of the tectonic blocks; circles show earthquake epicenters of the earlier seismic cycle; the dotted line shows seismicity migration (see Figure 4, А). В – variations of strikes of ancient dykes (1.78 billion years) as the evidence of rotation of the western and eastern blocks of the craton in the opposite directions: 1 – orientations of the dykes according to data from [Peng et al., 2008]; thin lines are added to highlight the contrasting strikes of the dykes; 2 – initial position of the lithospheric boundary (the western margin of the displaced mantle block); 3 – the Shanxi rift system; 4 – directions of rotation of the western (Ordos) and eastern (Hebei) blocks of the craton.

сжатия расширяется, вызывая миграцию землетрясений от замка литосферной складки к ее периферии (см. рис. 4, А). С этим механизмом связана сейсмичность последнего цикла (1800–2000 гг.). В другом случае волна деформаций возобновляет вращение блоков Хэбэй и Ордос и тогда землетрясения концентрируются в разделяющей их рифтовой зоне Шаньси. Такой механизм, очевидно, действовал в раннем цикле (1500–1700 гг.) сейсмической активности в Северо-Китайской зоне.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа сейсмомодинамики Северо-Китайской зоны подтверждают как реалистичность, так и

большие познавательные возможности концепции деформационных волн [Буков, 2005; Викулин и др., 2000; Уломов, 1993; Sherman, 2009]. Характер цикличности сильных землетрясений в зоне, несомненно, согласуется с гипотезой Циркум-Тихоокеанской волны деформаций, видимо, наиболее сильной на планете в настоящее время. Она раз в 300 лет обегает континентальное обрамление Пацифики по часовой стрелке, прямо вызывая самые катастрофические события Тихоокеанского кольца с $M \geq 8.8$ [Викулин и др., 2010]. Для более слабых землетрясений Северо-Китайской зоны, с магнитудами в диапазоне 6.0–7.5, Циркум-Тихоокеанская волна является своего рода триггером. Она дестабилизирует литосферную структуру Сино-Корейского кратона и запускает раз в 300 лет сейсмический цикл, землетрясения которого продолжаются еще многие

десятилетия после ухода деформационной волны на север. Возможно, в таких случаях следует предполагать каскадный характер развития процесса, при котором сильные волны деформаций порождают более слабые деформационные волны или являются их триггером.

Полученные результаты также подтверждают важнейшее значение для внутриплитной сейсмичности глубинной структуры литосферы, которая активизируется под воздействием деформационных волн. Именно особенности литосферного строения определяют как положение сейсмических зон, так и закономерности миграции в них землетрясений. Пример Северо-Китайской зоны показывает, что особое внимание следует уделять нелинейным тенденциям миграции сейсмичности. Важен их целенаправленный поиск, так как именно в этих закономерностях зашифрована, по нашему мнению, генетическая связь сейсмичности с тектоническим строением и геодинамикой литосферы.

Поразительны размеры той литосферной структуры, которую Циркум-Тихоокеанская волна деформаций активизирует. Понимание генезиса этой глубинной структуры было бы невозможно без результатов регионального изучения мантийных ксенолитов, позволивших независимо воссоздать блоковую организацию мантии. Совместное использование геофизического и петрологического образов мантии является, как подтверждает пример Северо-Китайской зоны, наиболее надежным и продуктивным направлением изучения глубинной структуры литосферы.

Особенности строения Сино-Корейского кратона, конечно, уникальны. Они сформировались в результате активных тектонических перемещений на окраине Азии вдоль сдвигов мегазоны Тан-Лу в юрско-меловое время. В пределах кратона уход литосферного блока на северо-восток запустил к западу от мегазоны Тан-Лу компенсационные механизмы рифтогенеза и ротации блоков. Удивительно, но эти тектонофизические процессы продолжают действовать и в настоящее время, спустя десятки миллионов лет. Современная сейсмодинамика кратона является, таким образом, прямым и закономерным продолжением его тектонической эволюции в мезо-кайнозойское время.

В настоящее время Северо-Китайская зона находится в состоянии затишья, разделяющего циклы сильных землетрясений. Слабая современная сейсмичность в ней едва ли имеет значение для целей прогноза будущих сильных событий, и при мониторинге региональных деформаций это следует учитывать. Новая Циркум-Тихоокеанская волна (№ 8 на рис. 3) достигнет Северного Китая лишь к концу XXI столетия. Именно сейчас формирование этой волны происходит, вероятно, в районе островов Тонга – Новой Зеландии. Крайне интересно и с теоретической, и с практической точки зрения проследить, как процесс зарождения новой волны деформаций, так и начало ее движения на север.

7. ЛИТЕРАТУРА

- Ван М., Го Я., Цинь Ф. Сейсмичность Северного Китая и ее связь с движениями по крупным разломам // Глубинное строение Тихоокеанского обрамления: Материалы международного симпозиума. Ч. II. Под ред. В.Г. Моисеенко, И.А. Загрузиной. Благовещенск: АмурКНИИ, 1990. С. 60–73.
- Викулин А.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. Вулканизм как индикатор геодинамических процессов // Литосфера. 2010. № 3. С. 5–11.
- Викулин А.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. Ротационно-упругие волны: сейсмический, вулканический и тектонический процессы // Тектоника и глубинное строение востока Азии: VI Косыгинские чтения / Под ред. А.Н. Диденко, А.А. Степашко. Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2009. С. 260–263.
- Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н. Нелинейные волны деформаций в ротационной модели сейсмического процесса // Вычислительные технологии. 2000. Т. 5. № 1. С. 31–39.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, 1990. Кн. 2. 334 с.
- Каплун В.Б. Результаты магнитотеллурических зондирований в пределах западной части Сихотэ-Алиньской складчатой системы // Тихоокеанская геология. 1994. Т. 13. № 5. С. 141–153.
- Каплун В.Б. Предварительные результаты глубинных магнитотеллурических зондирований по профилю п. Облучье – оз. Гасси (Хабаровский край) // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 2. С. 122–135.
- Konn M.L. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизиином поясе. М.: Научный мир, 1997. 314 с. (Тр. ГИН; вып. 506).
- Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Цикличность сеймотектонических событий на краях Индийской литосферной плиты // Доклады АН СССР. 1985. Т. 282. № 6. С. 1333–1337.
- Степашко А.А. Особенности петрохимического состава ксенолитовых ассоциаций лерцолитов щелочных базальтов // Геология и геофизика. 1988. № 12. С. 95–100.
- Степашко А.А. Химическая структура ультраосновной мантии. Владивосток: Дальнаука, 1998. 128 с.
- Степашко А.А. Латеральная гетерогенность мантии Дальнего Востока // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20. № 5. С. 93–117.
- Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений // Физика Земли. 1993. № 4. С. 43–53.
- Wykov V.G. Strain waves in the earth: Theory, field data, and models // Geologiya i Geofizika (Russian geology and geophysics). 2005. V. 46. № 11. P. 1176–1190.
- Fan W.M., Zhang H.F., Baker J., Jarvis K.E., Mason P.R.D., Menzies M.A. On and off the North China craton: where is the Archaean keel? // Journal of Petrology. 2000. V. 41. № 7. P. 933–950. doi:10.1093/ptetrology/41.7.933.
- Feng M., Van der Lee S., An M., Zhao Y. Lithospheric thickness, thinning, subduction, and interaction with the asthenosphere beneath China from the joint inversion of seismic S-wave train fits and Rayleigh-wave dispersion curves // Lithos. 2010. V. 120. № 1–2. P. 116–130. doi:10.1016/j.lithos.2009.11.017.
- Fridman A.M., Klimenko A.V. The Relationship between the Earth's Seismic Activity and Latitude as a Function of Earthquake Hypocenter Depth // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2002. V. 38. № 12. P. 1039–1043.
- Gatinsky Yu.G., Rundquist D.V. Geodynamics of Eurasia: Plate Tectonics and Block Tectonics // Geotectonics. 2004. V. 38. № 1. P. 1–16.
- Grimmer J.C., Jockheere R., Enkelmann E., Ratschbacher L., Hacker B.R. et al. Cretaceous – Cenozoic history of the southern Tan-Lu fault zone: apatite fission-track and structural constraints from the

- Dabie Shan (Eastern China) // *Tectonophysics*. 2002. V. 359. № 3–4. P. 225–253. doi:10.1016/S0040-1951(02)00513-9.
- Kuznetsov I. V., Keilis-Borok V.I. The Interrelation of earthquakes of the Pacific seismic belt // *Doklady Earth Sciences*. 1997. V. 355. № 3–6. P. 869–873.
- Liu G. The Cenozoic rift system of the North China plain and the deep internal process // *Tectonophysics*. 1987. V. 133. № 3–4. P. 277–285. doi:10.1016/0040-1951(87)90270-8.
- Liu M., Yang Y., Shen Z. et al. Active tectonics and intracontinental earthquakes in China: the kinematics and geodynamics // *Continental intraplate earthquakes: science, hazard and policy*. Geological Society of America Special Paper 425. 2007. P. 299–318. doi:10.1130/2007.2425(19).
- Ma X., Wu D. Cenozoic extensional tectonics in China // *Tectonophysics*. 1987. V. 133. P. 243–255. doi:10.1016/0040-1951(87)90268-X.
- Menzies M., Xu Y., Zhang H., Fan W. Integration of geology, geophysics and geochemistry: a key to understanding the North China craton // *Lithos*. 2007. V. 96. № 1–2. P. 1–21. doi:10.1016/j.lithos.2006.09.008.
- Molnar P., Tapponier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision // *Science*. 1975. V. 159. P. 419–426. doi:10.1126/science.189.4201.419.
- Nabelek J., Chen W.-P., Ye H. The Tangshan earthquake sequence and its implications for the evolution of the North China basin // *Journal of Geophysical Research*. 1987. V. 92. № B12. P. 12615–12628. doi:10.1029/JB092iB12p12615.
- Peng P., Zhai M., Ernst R. et al. A 1.78 Ga Large igneous province in the North China craton: The Xiong'er volcanic province and the North China dyke swarm // *Lithos*. 2008. V. 101. P. 260–280. doi:10.1016/j.lithos.2007.07.006.
- Scholz C.H. A physical interpretation of the Haicheng earthquake prediction // *Nature*. 1977. V. 267. P. 121–124. doi:10.1038/267121a0.
- Sherman S. I. A tectonophysical model of a seismic zone: Experience of development based on the example of the Baikal rift system // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2009. V. 45. № 11. P. 938–951. doi:10.1134/S1069351309110020.
- Sherman S.I., Zlogodukhova O.G. Seismic belts and zones of the Earth: Formalization of notions, positions in the lithosphere, and structural control // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011. V. 2. № 1. P. 1–34. doi:10.5800/GT-2011-2-1-0031.
- Stepashko A.A. Deep roots of seismotectonics in the Far East: The Sakhalin zone // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2010. V. 4. № 3. P. 228–241. doi:10.1134/S181971401003005X.
- Stepashko A.A. Deep roots of seismotectonics of the Far East: The Amur River and Primorye zones // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2011. V. 5. № 1. P. 1–12. doi:10.1134/S1819714011010076.
- Stone R. An Unpredictably Violent fault // *Science*. 2008. V. 320. № 5883. P. 1578–1580. doi:10.1126/science.320.5883.1578.
- Stone R. China Grapples with seismic risk in its Northern heartland // *Science*. 2006. V. 313. № 5787. P. 599. doi:10.1126/science.313.5787.599.
- Vikulin A.V. Energy and moment of the Earth's rotation elastic field // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. V. 49. № 6. P. 422–429. doi:10.1016/j.rgg.2007.11.012.
- Wang J.-M. The Fenwei rift and its recent periodic activity // *Tectonophysics*. 1987. V. 133. № 3–4. P. 257–275. doi:10.1016/0040-1951(87)90269-1.
- Wang S., Zhang Z. Plastic-flow waves ('slow waves') and seismic activity in Central-Eastern Asia // *Earthquake research in China*. 2005. V. 19. № 1. P. 74–85.
- Wang X., Chen J., Griffin W.L., O'Reilly P.Y., Huang X.L. Two stages of zircon crystallization in the Jingshan monzogranite, Bengbu Uplift: implications for the syn-collisional granites of the Dabie-Sulu UHP orogenic belt and the climax of movement on the Tan-Lu fault // *Lithos*. 2011. V. 122. № 3–4. P. 201–213. doi:10.1016/j.lithos.2010.12.014.
- Xu J., 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. doi:10.1016/0040-1951(87)90342-8.
- Xu X., Deng Q. Nonlinear characteristics of paleoseismicity in China // *Journal of Geophysical Research*. 1996. V. 101. № B3. P. 6209–6231. doi:10.1029/95JB01238.
- Xu X., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Pearson N.J., Geng H., Zheng J. Re-Os isotopes of sulfides in mantle xenoliths from Eastern China: progressive modification of lithospheric mantle // *Lithos*. 2008. V. 102. № 1–2. P. 43–64. doi:10.1016/j.lithos.2007.06.010.
- Xu Y.-G. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: evidence, timing and mechanism // *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*. 2001. V. 26. № 9–10. P. 747–757. doi:10.1016/S1464-1895(01)00124-7.
- Ye H., Zhang B., Mao F. The Cenozoic tectonic evolution of the Great North China: two types of rifting and crustal necking in the Great North China and their tectonic implications // *Tectonophysics*. 1987. V. 133. P. 217–227. doi:10.1016/0040-1951(87)90265-4.
- Zheng J.P., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Yu C.M., Zhang H.F., Pearson N., Zhang M. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China craton: peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2007. V. 71. № 21. P. 5203–5225. doi:10.1016/j.gca.2007.07.028.
- Zheng J.P., O'Reilly S.Y., Griffin W.L., Lu F., Zhang M., Pearson N.J. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: significance for lithosphere evolution // *Lithos*. 2001. V. 57. № 1. P. 43–66. doi:10.1016/S0024-4937(00)00073-6.
- Zoback M.D. Climate and intraplate shocks // *Nature*. 2010. V. 466. P. 568–569. doi:10.1038/466568a.



Степашко Андрей Анатольевич, канд. геол.-мин. наук., в.н.с.
Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН
680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, Россия
✉ e-mail: stepashko@itig.as.khb.ru

Stepashko Andrey A., Candidate of Geology and Mineralogy, Lead Researcher
Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences
680000, Khabarovsk, Kim Yu Chen street, 65, Russia
✉ e-mail: stepashko@itig.as.khb.ru