

УДК 551.24



Гатинский Ю.Г.



Владова Г.Л.



Прохорова Т.В.



Рундквист Д.В.

Гатинский Ю.Г.*,
Владова Г.Л.**,
Прохорова Т.В.***,
Рундквист Д.В.****

Геодинамика Центральной Азии и прогноз катастрофических землетрясений¹

*Гатинский Юрий Георгиевич, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН
E-mail: yug@sgm.ru.

**Владова Галина Львовна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

***Прохорова Татьяна Викторовна, научный сотрудник Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

****Рундквист Дмитрий Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, академик РАН, главный научный сотрудник Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН.

Анализ сейсмичности Центральной Азии обнаруживает ее максимальное распространение в пределах «треугольника» внутриконтинентальной сейсмической активности, расположенного между южным концом оз. Байкал и Гималаями. Этот «треугольник» совпадает с Центрально-Азиатской транзитной зоной, разделяющей Северо-Евразийскую и Индийскую литосферные плиты и включающей эпицентры большинства наиболее сильных землетрясений региона. Зона состоит из многочисленных коровых или корово-мантийных блоков различных размеров, границы которых часто образованы не только единичными разломами, но также относительно широкими межблоковыми зонами. В их пределах высвобождаются значительные объемы сейсмической энергии. Наиболее активные зоны ограничивают блоки Памир, Тянь-Шань, Баян-Хар, северный край Индийской плиты и отдельные участки на северной границе Амурского блока. В межблоковых зонах произошло большинство катастрофических землетрясений региона. Общее количество сейсмической энергии в целом уменьшается с удалением от границы Индийской плиты, но иногда максимальные значения ее приурочены к внутренним частям транзитной зоны в 500–1500 км от этой границы. Наиболее активные межблоковые зоны Центральной Азии отличаются от зон субдукции и коллизии глубиной проникновения в литосферу и достаточно близки к ним по объемам выделяющейся энергии. В результате исследований на территории

¹ Работа выполнена при поддержке грантов Президиума РАН (программа № 4 «Оценка и пути снижения последствий современных тектонических движений и землетрясений в районах существующих и проектируемых атомных станций на территории России и стран ближнего зарубежья») и РФФИ (проект № 06-05-00666).

России, Китая и других стран выявлены межблоковые зоны, в пределах которых частота сейсмических событий с магнитудой ≥ 6 достигает одного и более в 30–40 лет. Изучение геодинамики таких зон позволяет установить связь повышенной сейсмичности с процессами взаимодействия литосферных плит и блоков и с глубинными неоднородностями строения литосферы и наметить по совокупности признаков участки наиболее высокой сейсмической опасности. Большинство катастрофических землетрясений происходит в зонах, где выявлены резкие ступени в коре и всей литосфере, разнонаправленные движения коры и литосферной мантии, региональная смена направления горизонтальных перемещений блоков и глубинные мантийные неоднородности. К факторам, обуславливающим интенсивное высвобождение сейсмической энергии, относятся: продолжение на большом протяжении под континентом слэбов¹ погружающихся плит в зонах коллизии (Памир, Гималаи), интенсивные смещения вдоль сдвигов и надвигов под влиянием коллизии и глубинных неоднородностей в литосфере (Тянь-Шань, Баян-Хар), смена знаков горизонтальных перемещений под действием взаимодействия плит и внедрения предполагаемых мантийных плюмов (Северная Монголия, район Байкала).

Ключевые слова: литосферные плиты, блоки, межблоковые зоны, сейсмичность, сейсмическая энергия, катастрофические землетрясения, активные разломы.

Введение

На протяжении последних 10 лет группа сотрудников ГТМ и МИТП РАН занимается изучением геодинамики и современных тектонических движений Евразии². Главное внимание в исследованиях уделялось изучению размещения эпицентров катастрофических землетрясений в блоковой структуре Центральной Азии, их связи с горизонтальными перемещениями блоков по данным космической геодезии и расшифровке глубинного строения литосферы рассматриваемого региона с привлечением данных по геотермике, сейсмограммам и другим геофизическим методам. В частности, сведения по глубинной структуре и современной кинематике блоков позволили установить особенности геодинамики района Венчуаньского землетрясения в Китае и высказать ряд предположений прогнозного характера. Новые данные из международных сейсмических каталогов и опубликованные сведения по историческим землетрясениям Китая дали возможность пересмотреть и уточнить границы ряда блоков и выделить новые блоки Тайханшань, Восточный Кунлунь и Западный Цинлин.

В настоящей работе, наряду с литературными данными, использованы результаты полевых исследований, проведенных Ю.Г. Гатинским и Г.Л. Владовой совместно с сотрудниками Института земной коры СО РАН летом 2008 г. в Иркутской области и Республике Бурятия с целью изучения геодинамики юго-восточной и центральной частей Байкальской рифтовой системы. Это позволило детализировать строение и современную кинематику южной границы Северо-Евразийской плиты в районах Забайкалья и Саян. В 2009 г. во время симпозиума APSG (Международной программы Азиатско-Тихоокеанской космической геодинамики) в Синьцзяне Ю.Г. Гатинскому удалось пересечь Восточный Тянь-Шань между Урумчи и Турфаном (КНР) и ознакомиться с современной структурой этого района. Консультации по отдельным вопросам геодинамики Центральной Азии были любезно предоставлены профессором С.И. Шерманом, к.г.-м.н. В.А. Саньковым (ИЗК СО РАН) и проф. Х.Т. Хсю (Китайская Академия наук), по общим проблемам изучения сейсмичности – чл.-корр. РАН Г.А. Соболевым (ИФЗ РАН). Всем консультантам авторы выражают свою признательность.

1. Современная геодинамика Центральной Азии

Распределение эпицентров землетрясений в Центральной Азии показывает, что ареалы их максимального развития нередко проникают далеко во внутренние части плит (рис. 1). Подобные зоны распространения повышенной сейсмичности оконтуривают выделенную ранее³ Северо-Евразийскую плиту и ряд блоков в центральной и восточной частях Евразии.

Изучение современной сейсмичности и активных разломов с привлечением различных геофизических

¹ Слэб (от англ. *slab* – пластина, кусок) – погружающаяся под соседнюю континентальную литосферную плиту часть другой плиты, как правило, океанической.

² Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В. Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // Геотектоника. 2004. № 1. С. 3–20; Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С. Блоковая структура и кинематика Восточной и Центральной Азии по данным GPS // Геотектоника. 2005. № 5. С. 3–19; Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Прохорова Т.В. Блоковая структура и геодинамика континентальной литосферы на границах плит // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2008. Вып. 11. № 1. С. 32–47. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kscnet.ru/kraesc/2008/2008_11/art3.pdf; Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Прохорова Т.В. Геодинамика района Сычуаньского землетрясения 12.05.2008 // ДАН. 2008. Т. 423. № 6. С. 806–810; Gatinsky Yu., Prokhorova T., Rundquist D., Vladova G. Block's kinematics and lithosphere deep structure in central and east Asia // Proceed. APSG Symposium "Space geodynamics and modeling of the global processes". Novosibirsk: Trofimuk Inst. Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS. 2009. P. 5–12; Gatinsky Yu., Prokhorova T., Vladova G. Seismic energy releasing in interblock zones of central and east Asia // Ibid. 2009. P. 38–48; Gatinsky Yu.G., Prokhorova T.V., Rundquist D.V., and Vladova G.L. Zones of catastrophic earthquakes of Central Asia: Geodynamics and seismic energy // Russian J. Earth Sciences, 2009. V. 11. ES1001. P. 1–13; Gatinsky Yu., Rundquist D., Vladova G., Prokhorova T. Connection of catastrophic seismic events with crustal blocks' mobility after GPS data // Program and abstracts of the APSG Workshop 2009 "Space geodesy for Earth environment change and disaster monitoring" Aug. 17–21, 2009, Urumqi, China. P. 58–60; Gatinsky Yu., Rundquist, D.V., Vladova, G.L., and Prokhorova T. Up-To-Date Geodynamics and Seismicity of Central Asia. International Journal of Geosciences, 2011. No 2. P. 1–12, doi:10.4236/ijg.2011.21001.

³ Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В. Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков...; Rundquist, D.V., Gatinsky, Yu.G., Bush, W.A., Kossobokov, V.G. The area of Russia in the present-day structure of Eurasia: Geodynamics and seismicity // Computational Seismology and Geodynamics. Vol. 7 / D.K. Chowdhury (ed.). 2005. Am. Geophys. Union. Washington, D.C. P. 224–233.

и дистанционных методов показывает неоднородность строения краевых частей литосферных плит с развитием вдоль их границ транзитных (переходных) зон, разделяющих эти плиты и состоящих из мозаики блоков, ограниченных активными разломами¹. В пределах транзитных зон передаются и релаксируются возникающие при взаимодействии главных плит тектонические напряжения.

В Центральной и Восточной Азии выделяется две крупные транзитные зоны (см. рис. 1). Центрально-Азиатская зона расположена между Северо-Евразийской и Индийской литосферными плитами. Она почти полностью включает в себя «треугольник» максимальной сейсмической активности Азии², вершина которого находится в районе оз. Байкал, а основание совпадает с зоной коллизии Индостана и Евразии в Гималаях (рис. 2). Соседняя с ней Восточно-Азиатская зона охватывает активные окраины Евразии на границах с Тихоокеанской, Филиппинской, Индийской и Австралийской плитами и прилегающие к ним части Азиатского материка. В пределах этих зон расположены такие крупные блоки, как Тарим, Северный Тибет, Амурский, Японско-Корейский, блок Юго-Восточного Китая и другие. На указанной территории имеются многочисленные станции GPS, достаточно полно изучены активные разломы. Почти по диагонали ее пересекает линия российско-китайского геолого-геофизического трансекта (GGT) 21³, а на юге в Гималаях и Тибете проводились комплексные геофизические исследования по международному проекту INDEPTH (Глубинного изучения земной коры)⁴.

Большая западная часть территории Центральной Азии находится в режиме транспрессии⁵ под влиянием сжатия в северо-северо-восточном направлении со стороны гигантской глыбы Индостана. Это подтверждается модельными векторами горизонтальных перемещений по отношению к стабильной Евразии в пределах Центрально-Азиатской транзитной зоны (см. рис. 1). Такой геодинамический режим приводит к деформации большинства блоков западной части Центральной Азии, что можно видеть на примере Тянь-Шаня (рис. 3). При полевых маршрутах 2009 г. в Восточном Тянь-Шане (Синьцзян) удалось наблюдать мощные зоны кайнозойских надвигов с северной вергентностью. В то же время отмечается характерный «развал» векторов во фронте Индостано-Азиатской зоны коллизии с отклонением их до 10° северо-востока – 350° северо-запада над западным синтаксисом на северо-западе Тибета и на Тянь-Шане и до 70° северо-востока – 120° юго-запада над восточным синтаксисом возле Лхасы и на западе провинции Юннань. Эти данные согласуются с предполагаемым расползанием горного сооружения Тибета в субширотном направлении с образованием современных рифтов в его центральных частях⁶. Некоторые исследователи объясняют такое отклонение векторов моделью с разрывом литосферы Индийской плиты и разделением ее на две части: более круто погружающуюся к северу на западе и более пологую, движущуюся к северо-востоку, на востоке⁷. Скорости модельных горизонтальных перемещений уменьшаются от 30–35 мм/год вблизи зоны коллизии до 4–10 мм/год на севере в Саянах. Измеренные векторы (ITRF) направлены преимущественно на восток и северо-восток со скоростями от 48 мм/год на юге Тибета до 23–25 мм/год на удалении от зоны коллизии⁸. Заметно отличаются от приведенных выше результаты космогеодезических измерений в Восточно-Азиатской транзитной зоне. Измеренные в системе ITRF векторы к востоку от 102–103° в.д. имеют преимущественно юго-восточные азимуты от 106° до 121° юго-востока при скоростях 26–35 мм/год (см. рис. 1). Характерно, что в восточной части рассматриваемой территории преобладают горизонтальные перемещения в режиме трансенсии⁹ с раскрытием многочисленных рифтов в Байкальской системе, вокруг блока Ордос, внутри блоков Японско-Корейского и Юго-Восточного Китая. Такой разворот векторов и проявление процессов растяжения имеют различные объяснения: выжимание ряда блоков, включая Амурский, к востоку под влиянием процессов коллизии¹⁰; поднятие мантийных плюмов под Северной Монголией и Байкалом, приводящее к растяжению и формированию рифтов¹¹; гравитационное сползание коровых пластин с воздымающегося поднятия Тибета¹². Согласно динамическим моделям, приведенным в работах Flesh et al.¹³ и Sol et al.¹⁴, вся литосфера под Тибетом и прилегающими к нему блоками как единое целое смещается на восток-северо-восток.

¹ Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С. Блоковая структура и кинематика Восточной и Центральной Азии по данным GPS

² Рундквист Д.В., Гатинский Ю.Г. Блоки Евразии по сейсмическим данным и результатам спутниковых измерений // Проблемы глобальной геодинамики. Вып. 2. Материалы теоретического семинара ОГГН РАН / Под ред. Д.В. Рундквиста. М.: ОГГН РАН, 2003. С. 57–70.

³ Yuan X., Egorov A.S., GEMOC. A short introduction to Global Geoscience Transect 21: Arctic Ocean – Eurasia – Pacific Ocean // Science Press. 2000. 32 p.

⁴ Li S., Unsworth M.J., Booker J.R. et al. Partial melt or aqueous fluid in the mid-crust of Southern Tibet? Constraints from INDEPTH magnetotelluric data // Geophys. J. Intern. 2003. Vol. 153. № 2. P. 289–304.

⁵ Транспрессия – тектонический режим с сочетанием сдвиговых перемещений и сжатия, перпендикулярного к простиранию сдвигов.

⁶ Shen F., Royden L.H., Burchfiel B.C. Large-scale crustal deformation of the Tibetan Plateau // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № B4. P. 6793–6816.

⁷ Xiao, L., Wang C., Pirajno F. Is the Underthrust Indian Lithosphere Split beneath the Tibetan Plateau? // Intern. Geol. Review. 2007. V. 49. P. 90–98.

⁸ ITRF Website. January 2011. IGN. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005.php

⁹ Трансенсия – тектонический режим с сочетанием сдвиговых перемещений и связанного с ними наложенного растяжения вдоль сдвиговых зон или косоуго по отношению к ним.

¹⁰ Sankov V.A., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I. et al. Recent geodynamics of Mongolia-Baikal mobile area: movements, deformations and block rotations // Abstract book APSG 2008 “Space geodynamics and modeling of the global geodynamic processes”. Novosibirsk: RFBR, 2008. P. 15–16.

¹¹ Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии / Ред. А.Ф. Грачев. М.: ОИФЗ, ГЕОН, 2000. 487 с.

¹² Copley A. Kinematics and dynamics of the southeastern margin of the Tibetan Plateau // Geophys. J. Intern. 2008. V. 174. P. 1081–1100.

¹³ Flesch L.M., Hol, W.E., Silver P.G. et al. Constraining the extent of crust–mantle coupling in central Asia using GPS, geologic, and shear wave splitting data // Earth and Planet. Sci. Letters. 2005. V. 238. P. 248–268.

¹⁴ Sol S., Meltze A., Bürgmann R. et al. Geodynamics of the southeastern Tibetan Plateau from seismic anisotropy and geodesy // Geology 2007. V. 35. No 6. P. 563–566.

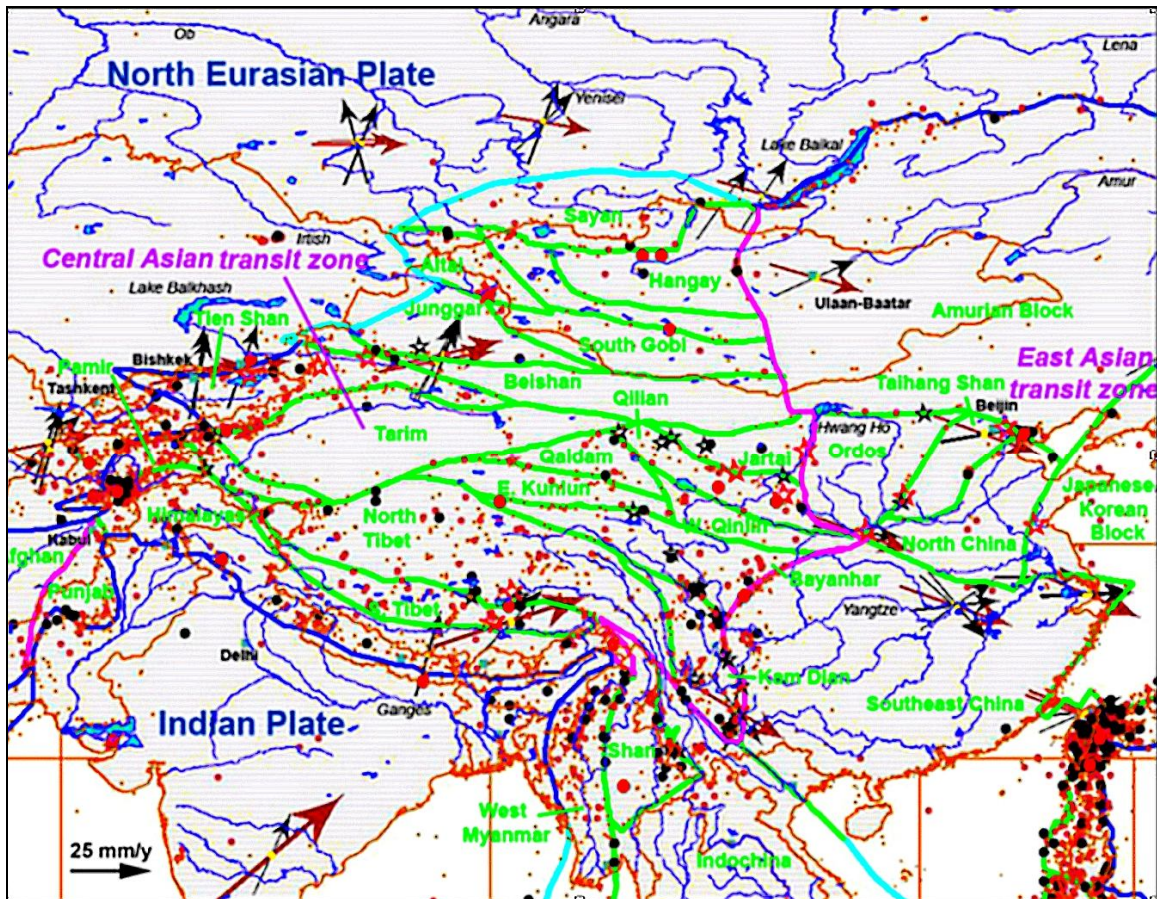


Рис. 1. Транзитные зоны и блоки Центральной Азии, их сейсмичность и векторы горизонтальных перемещений. Границы: синие – литосферных плит, фиолетовые – транзитных зон, зеленые – блоков, голубые – предполагаемые границы. Эпицентры землетрясений с магнитудой: >7,9 – красные, 7,0–7,9 – черные, 6,0–6,9 – коричневые крупные, 5,0–5,9 – коричневые мелкие. Кружками обозначены эпицентры инструментально замеренных землетрясений, звездочками – исторических землетрясений¹. Стрелки – векторы горизонтальных перемещений: коричневые – GPS2005 в системе ITRF (Международная наземная система координат), черные – модельные по отношению к стабильной Евразии. Желтые точки – станции космогеодезических измерений.

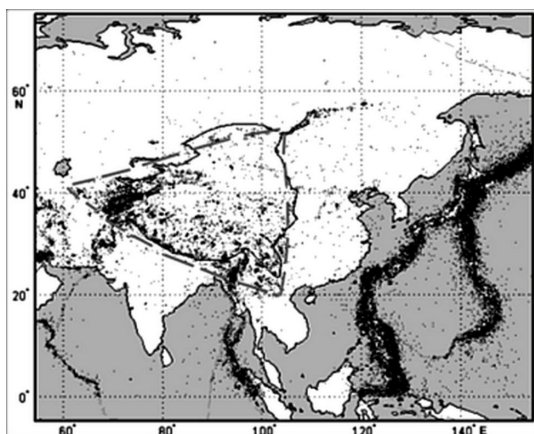


Рис. 2. «Треугольник» максимальной внутриконтинентальной сейсмичности Центральной Азии (пунктирные линии). Точки – эпицентры землетрясений с $M \geq 4$. Черная сплошная линия – граница Центрально-Азиатской транзитной зоны.

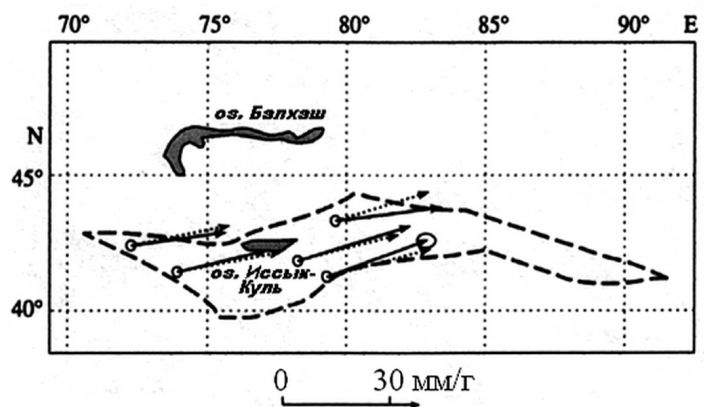


Рис. 3. Векторы горизонтальных перемещений (ITRF) на станциях в пределах блока Тянь-Шань (сплошные черные стрелки) и модельные векторы, отвечающие смещению станций при рассмотрении блока как абсолютно жесткого тела (пунктирные стрелки). Их несовпадение с отклонением за пределы эллипсов ошибок указывает на деформацию блока под влиянием процесса коллизии Индостана и Евразии. Расчеты векторов проведены Ю.С. Тюпкиным².

¹ Xu X., Deng Q. Nonlinear characteristics of paleoseismicity in China // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. No B3. P. 6209–6231.

² Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С. Блоковая структура и кинематика Восточной и Центральной Азии по данным GPS...



Рис. 4. Межблоковые зоны и катастрофические землетрясения Центральной Азии. Желтый пунктир – границы межблоковых зон. Обозначения границ блоков и эпицентров см. на рис. 1. Эпицентры катастрофических землетрясений 2007–2008 гг. увеличены.

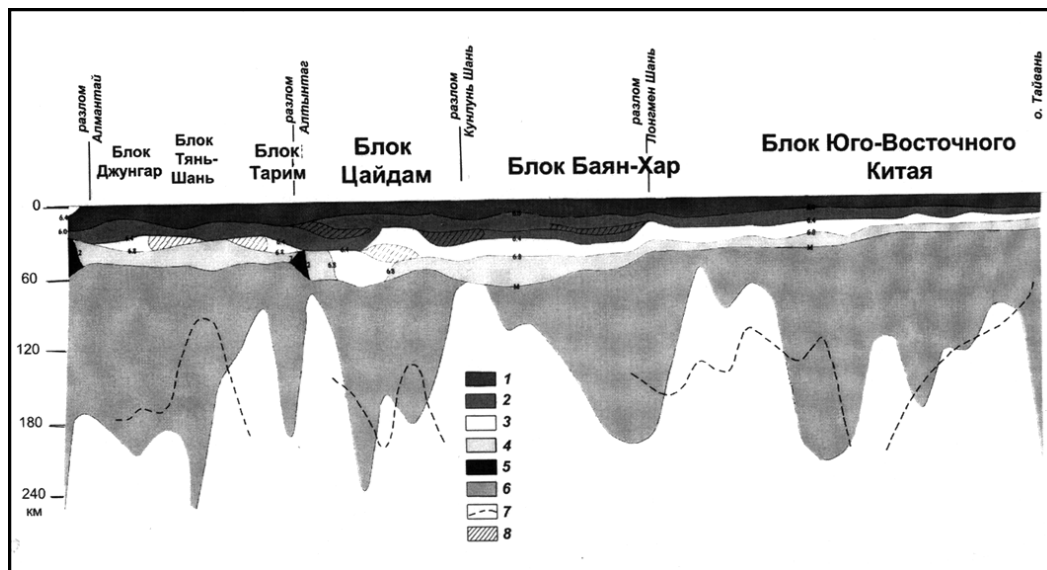


Рис. 5. Геофизические характеристики литосферы вдоль юго-восточной половины трансекта GGT 21 Арктика – Евразия – Тихий океан¹. 1 – верхняя часть верхней земной коры, 2 – нижняя часть верхней коры, 3 – средняя кора, 4 – верхняя часть нижней коры, 5 – нижняя часть нижней коры, 6 – термальная литосфера, устанавливаемая по данным сейсмотомографии (глубинного сейсмического зондирования); под ее нижней границей начинается астеносфера, 7 – электромагнитная литосфера, устанавливаемая по результатам электромагнитного зондирования, 8 – низкоскоростные слои в коре (зоны замедления сейсмических волн, отвечающие возможному разогреву и частичному расплавлению пород). Цифры отвечают скоростям сейсмических S-волн в км/сек. Вертикальный масштаб увеличен по отношению к горизонтальному примерно в 7 раз. М – раздел Мохоровичича (подошва земной коры).

¹ Yuan X., Egorov A.S., GEMOC. Op. cit.

Восточнее под провинциями Сычуань и Юннань Китая и Индокитайским п-овом, при продолжающемся смещении верхней мантии к востоку-северо-востоку, кора движется на восток-юго-восток со скоростью до 30 мм/год. Это подтверждается и векторами космогеодезических измерений в системе ITRF (см. рис. 1).

2. Межблоковые зоны и их сейсмичность

При наших предыдущих исследованиях было установлено, что границы между блоками, как правило, выражены не одиночными тектоническими нарушениями, а относительно широкими межблоковыми зонами (рис. 4) с многочисленными разломами, интенсивным дроблением и расланцеванием вмещающих пород. Именно в межблоковых зонах реализуется большая часть движений плит и блоков с накоплением напряжений, которые в дальнейшем релаксируются в виде землетрясений. В пределах некоторых из этих зон высвобождается значительное количество сейсмической энергии (табл.1). Подсчет производился по формуле из работы Kanamori & Anderson²:

$$\log_{10}E_s = a \cdot M_s + b, \text{ где } a = 1,5; b = 11,8.$$

Таблица 1.

Объемы сейсмической энергии, высвобождающейся в наиболее активных межблоковых зонах Центральной Азии (в Джоулях)

№ Пп.	Границы блоков	Общая энергия (Дж)	Длина границ (км)	Удельная энергия (Дж)
1	Пенджаб – Индийская плита	$6,99689 \times 10^{15}$	1305,0	$5,361 \times 10^{12}$
2	Гималаи – Индийская плита	$2,94412 \times 10^{16}$	3094,0	$9,515 \times 10^{12}$
3	Памир – Гималаи	$5,43111 \times 10^{15}$	531,9	$1,021 \times 10^{13}$
4	Памир – Северо-Евразийская плита	$7,26692 \times 10^{15}$	503,6	$1,443 \times 10^{13}$
5	Тянь-Шань – Северо-Евразийская плита	$5,63879 \times 10^{16}$	1421,2	$3,968 \times 10^{13}$
6	Тянь-Шань – Тарим	$4,84380 \times 10^{16}$	1683,5	$2,877 \times 10^{13}$
7	Баян-Хар – Восточный Кунлунь и Западный Цинлинь	$6,37592 \times 10^{16}$	1598,9	$3,987 \times 10^{13}$
8	Баян-Хар – Северный Тибет	$6,35765 \times 10^{16}$	957,1	$0,664 \times 10^{18}$
9	Баян-Хар – Кам-Юннань	$9,24193 \times 10^{15}$	540,0	$1,711 \times 10^{17}$
10	Баян-Хар – Юго-Восточный Китай	$9,25122 \times 10^{16}$	504,0	$1,835 \times 10^{18}$
11	Цзянь – Ордос	$2,06124 \times 10^{12}$	414,1	$4,977 \times 10^{12}$
12	Амурский – Японско-Корейский	$6,63646 \times 10^{16}$	3205,4	$2,070 \times 10^{13}$
13	Западная Мьянма – Индийская плита	$2,44456 \times 10^{16}$	2639,4	$9,262 \times 10^{12}$
14	Западная Мьянма – Шан	$4,07267 \times 10^{15}$	886,3	$4,595 \times 10^{12}$
15	Шан – Индокитай	$8,54442 \times 10^{15}$	1442,7	$5,923 \times 10^{12}$
15	Японско-Корейский – Северо-Японский	$4,17527 \times 10^{16}$	804,0	$5,193 \times 10^{13}$
17	Японско-Корейский – Рюкю – Центральный Хонсю	$1,97364 \times 10^{16}$	2774,3	$7,114 \times 10^{12}$

Примечание. Положение блоков и разделяющих их межблоковых зон см. на рис. 1 и 4.

Магнитуда (M_s) поверхностных сейсмических волн взята из каталога NEIC³ за период 1966–2008 гг., без исключения афтершоков. При этом учитывались площади, ограниченные линиями примерно по 50 км в обе стороны от границы блоков. Подсчитывалась как общая энергия в пределах каждой межблоковой зоны, так и удельная энергия на 1 км ее длины или, при принятых параметрах ширины зоны и положения гипоцентров, как правило, не глубже 40 км, на объем около 4000 км³.

Неглубокое проникновение межблоковых зон в литосферу подтверждается расположением гипоцентров в подавляющем большинстве случаев в пределах 20–40 км, значительно реже до 80–240 км (Памир). В таких зонах нетрудно видеть определенный аналог транзитных зон, расположенных между крупными плитами, что является примером фрактального строения литосферы. К выделяемым нами межблоковым зонам близки «деструктивные зоны литосферы»⁴ и «подвижные зоны»⁵, также разделяющие, по упомянутым авторам, блоки.

Проведенные нами подсчеты сейсмической энергии показали, что в рассматриваемых транзитных зонах наиболее активными и, соответственно, наиболее сейсмоопасными являются межблоковые зоны, ограничивающие блоки Памир, Тянь-Шань, Гималаи и Баян-Хар Центрально-Азиатской транзитной зоны, Шан и Японско-Корейский Восточно-Азиатской транзитной зоны, а также северные границы Индийской плиты⁶. Для установления особенностей распределения землетрясений в отдельных межблоковых зонах было построено 14 пересечений через них.

Они проводились в трех основных районах: к северу от зоны Индостано-Азиатской коллизии (блоки Памир, Гималаи, Южный и Северный Тибет), в центральной внутриконтинентальной части региона (блоки Кам-

¹ Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Прохорова Т.В. Блоковая структура и геодинамика континентальной литосферы на границах плит...; Gatinsky Yu., Prokhorova T., Vladova G. Seismic energy releasing in interblock zones of central and east Asia...

² Kanamori H., Anderson D.L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology // Bull. Seism. Soc. Amer. 1975. V. 65. P. 1073–1095.

³ Earthquake Data Available from the National Earthquake Information Center (NEIC) // U.S. Geological Survey. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://earthquake.usgs.gov/regional/ncic>

⁴ Шерман С.И. Деструктивные зоны литосферы, их напряженное состояние и сейсмичность // Неотектоника и современная геодинамика континентов и океанов: Тез. докл. М.: ГЕОС, 1996. С. 157–158.

⁵ Seminskii K.Zh. Hierarchy in the zone block lithospheric structure of Central and Eastern Asia // Rus. Geol. And Geophys. 2008. V. 49. P. 771–779.

⁶ Gatinsky Yu., Prokhorova T., Vladova G. Seismic energy releasing in interblock zones of central and east Asia...

Юннань, Баян-Хар и Цайдам) и в северной части (Байкальская рифтовая система на границах Саянского и Амурского блоков и на южной границе Северо-Евразийской плиты). Для всех трансектов построены графики изменения сейсмической энергии с глубиной и пространственной диссипации ее вдоль пересечений. Анализ графиков показывает, что для межблоковых зон Гималаев и Тибета на всем их протяжении характерна мелкофокусная сейсмичность (10–35 км). Это согласуется с положим погружением Индийского слэба под Тибет и наличием в верхней части коры зон частичного плавления по данным INDEPTH¹. В то же время в пересечении через Памир сейсмофокальная плоскость погружается к северу под более крутым углом около 35° и достигает глубин 230–240 км². Максимальное выделение сейсмической энергии – 78,14 x 10¹³ Дж – приурочено там к уровню около 200 км. Расчет диссипации показывает максимум высвобождения энергии в южной части Памирских пересечений со значениями *log E* до 23,5–24,2.

В межблоковых зонах блоков Кам-Диан и Баян-Хар, являющихся наиболее активными в пределах рассматриваемой части Центральной Азии, преобладают левые сдвиги с локальным проявлением растяжений и сбросов. Гипоцентры землетрясений находятся на глубине от 10 до 34 км. Контрастные повышения сейсмической энергии со значениями *log E* до 23,5–24,0 приурочены к граничным разломам блоков. Следует подчеркнуть, что количество сейсмической энергии в межблоковых зонах, ограничивающих блок Баян-Хар, выше суммарной энергии зоны коллизии на северной границе Индийской плиты (6,089 x 10¹⁶ Дж) и лишь в 2,5 раза меньше величины энергии одной из самых активных зон субдукции Тихоокеанского кольца – Северо-Японской (15,332 x 10¹⁶ Дж). В то же время оно на порядок превосходит количество энергии менее активных зон субдукции, например, Южного Рюкю (7,913 x 10¹⁵ Дж). Следовательно, наиболее сейсмоактивные межблоковые зоны Центральной Азии, уступая зонам субдукции и коллизии в глубине своего проникновения в литосферу и подстилающую верхнюю мантию, весьма близки к ним по величине выделяющейся сейсмической энергии. Эти зоны характеризуются также максимальным отклонением абсолютных и относительных векторов GPS и других космогеодезических методов от средних по Евразии³.

Наряду с рассмотренными выше высоко сейсмоактивными межблоковыми зонами в пределах Центральной Азии существует ряд других, удельная сейсмическая энергия в которых достигает 1,0–4,5 x 10¹² Дж. Они расположены на границах Южно-Тибетского и Саянского блоков и вдоль протяженной северной границы Амурского блока. Эти зоны, на наш взгляд, также можно считать потенциально сейсмоопасными. Сейсмичность последней границы изучалась в 5 пересечениях. Эта граница на большей части своего протяжения проходит по Байкальской рифтовой системе. Тектонические напряжения вдоль ее простирания меняются от преобладающих левых сдвигов на крайнем востоке в среднем течении р. Олёмки до сдвигов с растяжением в условиях трансензионного режима западнее в системе Байкальских впадин⁴. Далее к западу в Тункинской впадине и ее бортах начинают преобладать левые сдвиги с амплитудой 8–10 м с субмеридиональным сжатием в условиях транспрессивного режима. В Саянах преобладают надвиги, в которых горизонтальные сокращения коры в северо-северо-восточном направлении достигают 2–4 мм/год⁵.

Летом 2008 г. авторами совместно с сотрудниками ИЗК СО РАН были проведены полевые маршруты в южной части Байкальской рифтовой системы. При этом удалось установить в Баргузинской впадине отчетливую смену сдвигов, вызывавших сейсмодислокации со смещением тальвегов боковых притоков р. Баргузин, на более поздние сбросы, развитые как в палеозойских гранитах, так и в рыхлых аллювиальных отложениях. Растяжения преобладают во впадине оз. Байкал при глубине гипоцентров от 10 до 34 км. Максимальное возрастание диссипации сейсмической энергии в районе юго-западного окончания оз. Байкал (до 1,4 x 10¹⁵ Дж) происходит над сбросами, ограничивающими впадину. Именно здесь в районе пос. Култук в августе 2008 г. произошло землетрясение с *M* 6,3, почти полностью разрушившее поселок и повредившее ряд путей сообщения. Западнее в бортах Тункинской впадины мы наблюдали смещение по сдвигам тальвегов современных распадков с амплитудой до 10 м.

Данные глубинного зондирования литосферы указывают на различное положение подошв блоков в транзитных зонах и существование локальных волноводов в верхней и средней коре. Самые глубокие литосферные корни⁶ имеют наиболее жесткие и слабо деформированные блоки: Юго-Восточный Китай, Баян-Хар, Цайдам, Амурский (рис. 5). Вместе с тем, в межблоковых зонах мощность литосферы уменьшается до 60–80 км, а в некоторых случаях земная кора, вероятно, залегает непосредственно на астеносфере с отсутствием литосферной мантии⁷ (между блоками Баян-Хар и Кунлунь – Цайдам и в ряде других межблоковых зон).

¹ Li S., Unsworth M.J., Booker J.R. et al. Op. cit.

² Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Прохорова Т.В. Блоковая структура и геодинамика континентальной литосферы на границах плит...

³ Саньков В.А., Леви К.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И. Современные движения литосферных блоков Центральной Азии по данным GPS-геодезии // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Под ред. К.Г. Леви, С.И. Шермана. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005. С. 165–179; Gatinsky Yu., Prokhorova T., Rundquist D., Vladova G. Block's kinematics and lithosphere deep structure in central and east Asia // Proceed. APSG Symposium "Space geodynamics and modeling of the global processes". Novosibirsk: Trofimuk Inst. Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS. 2009. P. 5–12.

⁴ Саньков В.А., Леви К.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И. Указ. соч.; Парфеев А.В., Саньков В.А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Акад. Изд-во «ГЕО», 2006. 151 с.

⁵ Саньков В.А., Леви К.Г., Лухнев А.В. и др. Современная геодинамика Центральной Азии: деформации литосферы в связи с межплитными взаимодействиями и активностью подлитосферных мантийных аномалий // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. Тр. Всерос. совещ., Иркутск, 26–29 авг. 2003. Новосибирск: изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. С. 161–165.

⁶ Литосферные корни – мантийная часть литосферы, иногда достигающая мощности до 150–200 км и более.

⁷ Литосферная часть мантии переработана астеносферным плюмом.

Анализ сейсмичности¹, данных геотермики² и результатов глубинного зондирования литосферы Центральной и Восточной Азии³ приводит к выводу о связи современной тектонической активности с аномалиями глубинного строения. Подавляющее большинство эпицентров землетрясений во внутренних частях континента на удалении от зон субдукции и коллизии расположено над областями замедления скоростей распространения S ($\leq 4,20\text{--}4,25$ км/сек) и P ($\leq 7,7$ км/сек) сейсмических волн. Такие области интерпретируются как очаги частичного расплавления пород литосферной и подлитосферной мантии. Часть из них по изометричным контурам и прослеживанию на нескольких глубинных уровнях отвечает плюмоподобному подъему астеносферного материала⁴. С ними же связаны поля развития повышенного теплового потока со значениями $\geq 80\text{--}100$ мВт/м². Подобные области замедления волн с повышенной сейсмичностью и высокими значениями теплового потока выявлены в пределах блоков Хангай, Саянского, на северо-западе Амурского блока в районе Байкальской рифтовой системы, блоков Ордос, Северо-Китайского, Тарим и ряда других.

3. Геодинамика района Венчуаньского землетрясения

Катастрофическое землетрясение с магнитудой 7,8–7,9 произошло 12 мая 2008 г. в китайской провинции Сычуань в 93 км к северо-западу от ее административного центра города Чэнду. Глубина гипоцентра составляла около 30 км. Афтершоки с магнитудами, достигавшими 6,1–6,4, длились до первой половины июня. Их эпицентры были приурочены к зоне ССВ простираения, протягивающейся на 315 км в обе стороны от места главного события⁵. Число жертв землетрясения превышает 70000 человек, разрушены десятки населенных пунктов, общий ущерб оценивается в миллиарды долларов.

Событие 12 мая произошло в зоне крупного разлома Лонгмен Шань⁶, в пределах межблоковой зоны, разделяющей блоки Юго-Восточного Китая и Баян-Хар (рис. 6). Количество сейсмической энергии, высвободившейся в этой зоне до 2008 г., составило лишь $1,131 \times 10^{15}$ Дж при удельной энергии $2,334 \times 10^{12}$ Дж. Следовательно, в данной зоне наблюдался продолжительный период относительного «сейсмического затишья» (seismic gap), поскольку последнее сильное землетрясение с магнитудой 7,4 произошло здесь только в 1973 г. Восточная граница блока Баян-Хар совпадает с глобальной структурой – линеаментом $102\text{--}103^\circ$ в.д.⁷, которому отвечает резкая ступень в коре и во всей литосфере с уменьшением их мощности к востоку. Линеамент продолжается на север, по крайней мере, до южного окончания оз. Байкал, выделяясь на поверхности по заметному перепаду высот в современном рельефе с преобладанием поднятий на западе и относительных опусканий на востоке⁸. На рассматриваемом южном отрезке линеамента, в пределах которого находится разлом Лонгмен Шань, устанавливаются различия в соотношениях между корой и литосферной мантией по обе стороны от этой структуры (см. выше раздел 1). Различия в перемещениях блоков по обе стороны от упомянутого линеамента подчеркиваются также модельными векторами по отношению к Евразийской плите, принимаемой за стабильную (см. рис. 1). Все это указывает на значительные градиенты в глубинном строении восточной границы блока Баян-Хар.

Как видно на рис. 6, векторы PTRF отвечают достаточно резкой смене направления горизонтального перемещения структур коры в районе землетрясения. Это же следует из анализа механизмов событий вдоль межблоковых зон, ограничивающих блок Баян-Хар. На северо-восточной и юго-западной границах его преобладают левые сдвиги, что приводит в целом к вращению блока по часовой стрелке с одновременным сжатием на восточной границе. Такое сжатие подтверждается механизмами землетрясений в эпицентрах вблизи этой границы. Непосредственные наблюдения устанавливают здесь надвигание к юго-востоку⁹. Вращение по часовой стрелке выявляется также на конечной модели разлома (finite fault model), построенной китайскими геофизиками для района Венчуаньского землетрясения¹⁰. Различные объяснения причин такого вращения были приведены выше в разделе 1.

Наиболее крупные блоки Центральной Азии – Тарим, Цайдам, Баян-Хар и особенно блок Юго-Восточного Китая, – судя по данным GGT 21, обладают отчетливыми мощными литосферными корнями (см. рис. 5) до

¹ Earthquake Data Available from the National Earthquake Information Center (NEIC)...

² Лысак С.В., Дорофеева Р.П., Дучков А.Д., Соколова Л.С. Термальное состояние литосферы Центральной Азии // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Под ред. К.Г. Леви, С.И. Шермана. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005. С. 89–120; Wei W., Ye G., Li Y. et al. Three-Dimensional P-Wave Velocity Structure of the Crust of North China // J. China University of Geosciences. 2007. V. 18. Issue 3. P. 257–268; Tao W., Shen Z. Heat flow distribution in Chinese continent and its adjacent areas // Progress in Natural Science. 2008, doi:10.1016/j.pnsc.2008.01.018.

³ Yuan X., Egorov A.S., GEMOC. Op. cit.; Кожевников В.М., Яновская Т.Б. Распределение скоростей волн S в литосфере Азиатского континента по данным поверхностных волн Рэлея // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Под ред. К.Г. Леви, С.И. Шермана. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005. С. 46–64; Мордвинова В.В., Винник Л.П., Косарев Г.Л., Треусов А.В., Орешин С.И., Артемьев А.А. Телесеismicкая томография и тонкая скоростная структура в Восточной Сибири и Центральной Монголии по телесеismicким записям объемных волн // Там же. С. 64–89.

⁴ Астеносферный материал – частично расплавленные породы астеносферы, слоя пониженной прочности, подстилающего литосферу и входящего в состав верхней подлитосферной мантии. Этот слой характеризуется замедлением скоростей сейсмических волн.

⁵ PAGER – Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response // U.S. Geological Survey. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/page>

⁶ Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Прохорова Т.В. Геодинамика района Сычуаньского землетрясения 12.05.2008. ...; Liu-Zeng J., Z. Zhang, L. Wen et al. Co-seismic ruptures of the 12 May 2008, M_s 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan: East–west crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the eastern edge of Tibet // Earth and Planetary Science Letters. 2009, doi:10.1016/j.epsl.2009.07.017.

⁷ Rundquist D.V., Gatinsky Yu.G., Cherkasov S.V. Trans-Eurasian divider: structural and metallogenic evidences // 32-IGC, Florence, Italy. Aug. 20–28, 2004: Abstracts. Part 1, 136–13. P. 620.

⁸ Леви К.Г. Карта неотектоники северо-восточного сектора Азии. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2008.

⁹ Xu X., Deng Q. Op. cit.

¹⁰ PAGER – Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response...

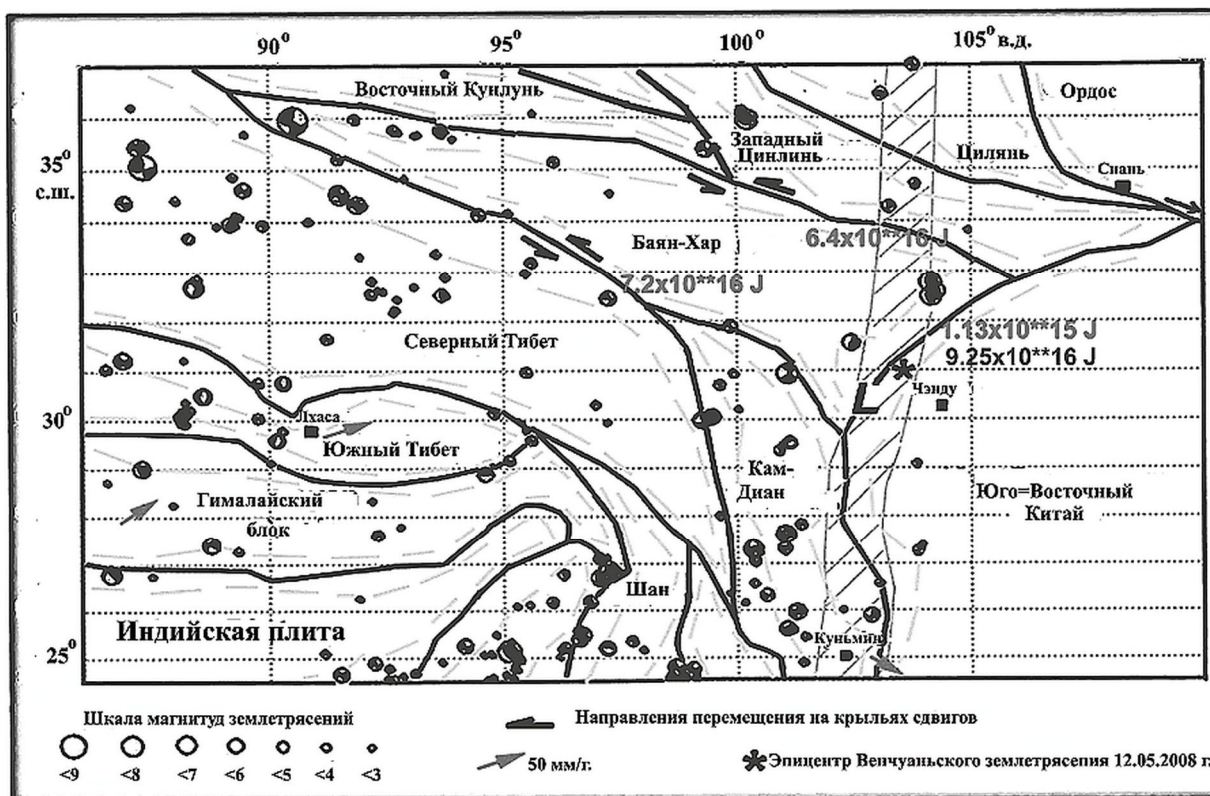


Рис. 6. Блоковая структура литосферы и механизмы землетрясений 1976–2005 гг. в районе Венчуаньского землетрясения 12 мая 2008 г. и на прилегающих территориях. Серыми стрелками показаны векторы горизонтальных перемещений по результатам космогеодезических измерений в системе ITRF. Серые пунктирные линии – границы межблоковых зон. Серой штриховкой выделена зона линеамента 102–103° в.д. «L» – разлом Лонгмен Шань. Приведены значения сейсмической энергии (в джоулях), высвобождавшейся до 2008 г. в межблоковых зонах на границах блока Баян-Хар (серые цифры) и высвободившейся в юго-восточной межблоковой зоне этого блока во время и после Венчуаньского землетрясения (черные цифры).

глубин 180–240 км¹. Они характеризуются повышенной жесткостью и наиболее слабой деформированностью во внутренних частях. Вместе с тем, можно думать, что вещество литосферы под рядом блоков находится на разных глубинах в квазипластичном состоянии. Об этом говорят результаты исследований по программе INDEPTH в Гималаях и Тибете, где при магнитотеллурическом зондировании выявлены слои высокой электропроводности, предположительно отвечающие частично расплавленному горизонту на глубинах 20–25 км². С возможными вариациями реологических свойств пород в глубинных зонах надвигов ряд исследователей связывает расхождение в оценке скоростей перемещения блоков по этим разломам³.

По данным сейсмогеографии низкоскоростные волноводы установлены также на отдельных участках под блоками Тарим и Баян-Хар на глубинах 20–30 км. Таким образом, мы можем предполагать, что под влиянием деформаций в зоне коллизии Индостана и Евразии происходит смещение не столько целых блоков, сколько их верхних слоев, отвечающих расслоенности литосферы. Отсюда следует, что наиболее вероятными участками потенциального проявления высокой сейсмичности могут быть межблоковые зоны на границах наиболее интенсивно расслоенных в реологическом отношении блоков. Среди таких зон особенно опасными могут оказаться те, в которых длительное время не проявлялись высоко магнитудные события. В течение таких периодов относительного «сейсмического затишья» накапливаются напряжения, способные разрядиться сильными землетрясениями. Этот вывод подтверждается анализом эпицентров исторических и новейших событий (см. рис. 4). Отметим, что к восточной части блока Баян-Хар и соседним районам Северного Тибета приурочены крупные аномалии теплового потока с величиной до 80–100 мВт/м² и более⁴. Как полагают некоторые исследователи, чем ближе к подошве земной коры расположен астеносферный материал, тем выше уровень сейсмической активности⁵.

Наряду с перечисленными выше высоко сейсмоактивными межблоковыми зонами в пределах Центральной и Восточной Азии существует ряд других, удельная сейсмическая энергия в которых достигает 1,0–4,5 × 10¹² Дж. Они расположены на границах блоков Саянского, Южного Тибета и вдоль протяженной северной границы

¹ Yuan X., Egorov A.S., GEMOC. Op. cit.

² Li S., Unsworth M.J., Booker J.R. et al. Op. cit.

³ Ismail-Zadeh A., Le Mouél J.-L., Soloviev A., Tapponnier P., Vorobieva I. Numerical modeling of crustal block-and-fault dynamics and slip rates in the Tibet – Himalayan region // Earth and Planet. Sci. Letters. 2007. Vol. 258. № 3–4. P. 465–485.

⁴ Лысак С.В., Дорофеева Р.П., Дучков А.Д., Соколова Л.С. Указ. соч.; Tao W., Shen Z. Op. cit.

⁵ Кожевников В.М., Яновская Т.Б. Указ. соч.

Амурского блока¹. Эти зоны, на наш взгляд, также можно считать потенциально сейсмоопасными. Отметим, что со многими межблоковыми зонами на территории России, Казахстана, Киргизии, Таджикистана, Монголии, Китая, Индии, Вьетнама и других стран совпадают густонаселенные районы, многочисленные промышленно важные объекты, пути сообщения и месторождения полезных ископаемых. Это подчеркивает прикладное значение исследований по детализации современной геодинамики межблоковых зон региона с целью выделения наиболее сейсмоопасных участков. Необходимость таких исследований подтверждают катастрофические последствия землетрясений в провинции Сычуань в 2008 г. и у побережья о. Хонсю в Японии в 2011 г.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют высказать следующие основные положения. В пределах Центральной Азии наблюдается повышенное высвобождение сейсмической энергии в относительно узких межблоковых зонах, находящихся часто на значительном удалении от современных границ главных литосферных плит. Это связано с упруго-пластичным характером деформаций и накоплением в межблоковых зонах напряжений, которые периодически релаксируются в виде землетрясений. Активность подобных зон определяется различными геодинамическими обстановками. Среди них могут быть упомянуты: продолжение на глубине слэба погружающейся плиты в зоне коллизии или субдукции (Западный Памир, Гималаи, Японско-Корейский блок), интенсивные перемещения по сдвигам и надвигам под влиянием процессов коллизии (Северный Памир, Тянь-Шань, Баян-Хар), воздымание и растяжение коры над глубинными восходящими плюмами (блоки Северной Монголии, район Байкала). В ряде случаев наблюдается сочетание нескольких обстановок, как это имеет место в Тибете и на северной границе Амурского блока.

Анализ пространственной диссипации сейсмической энергии показывает заметное возрастание ее в нижних горизонтах литосферы при крутом погружении слэбов (Западный Памир, частично Японско-Корейский блок) и относительно равномерное распределение при неглубоком пологом погружении (Гималаи, Южный и Северный Тибет). Наблюдается также контрастное возрастание энергии в пределах граничных разломов межблоковых зон (Баян-Хар, северная граница Амурского блока).

Сопоставление данных космогеодезических измерений различными методами за последнее десятилетие подтверждает повышенную подвижность блоков в зонах коллизии и над зонами субдукции. Масштабы их перемещения и вращения, конечно, крайне невелики и на порядок меньше по сравнению с наиболее подвижными литосферными плитами, однако за длительные отрезки геологического времени они могут привести к существенным структурным перестройкам во внутренних частях транзитных зон.

В пределах межблоковых зон на территории Центральной Азии произошло подавляющее большинство катастрофических землетрясений на протяжении нескольких последних столетий (см. рис. 4). Это подчеркивает прикладное значение исследования геодинамики таких зон, поскольку многие из них совпадают с густонаселенными районами, многочисленными промышленными объектами, путями сообщения и крупными месторождениями экономически важных полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В. Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // Геотектоника. 2004. № 1. С. 3–20.
2. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Тюпкин Ю.С. Блоковая структура и кинематика Восточной и Центральной Азии по данным GPS // Геотектоника. 2005. № 5. С. 3–19.
3. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Прохорова Т.В. Блоковая структура и геодинамика континентальной литосферы на границах плит // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2008. Вып. 11. № 1. С. 32–47. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kscnet.ru/kraesc/2008/2008_11/art3.pdf.
4. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Прохорова Т.В. Геодинамика района Сычуаньского землетрясения 12.05.2008 // ДАН. 2008. Т. 423. № 6. С. 806–810.
5. Кожевников В.М., Яновская Т.Б. Распределение скоростей волн S в литосфере Азиатского континента по данным поверхностных волн Рэлея // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Под ред. К.Г. Леви, С.И. Шермана. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005. С. 46–64.
6. Леви К.Г. Карта неотектоники северо-восточного сектора Азии. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2008.
7. Лысак С.В., Дорофеева Р.П., Дучков А.Д., Соколова Л.С. Термальное состояние литосферы Центральной Азии // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Под ред. К.Г. Леви, С.И. Шермана. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005. С. 89–120.
8. Мордвинова В.В., Винник Л.П., Косарев Г.Л., Треусов А.В., Орешин С.И., Артемьев А.А. Телесеismicкая томография и тонкая скоростная структура в Восточной Сибири и Центральной Монголии по телесеismicким записям объемных волн // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Под ред. К.Г. Леви, С.И. Шермана. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005. С. 64–89.
9. Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии / Ред. А.Ф. Грачев. М.: ОИФЗ. ГЕОН, 2000. 487 с.
10. Парфеев А.В., Саньков В.А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Акад. Изд-во «ГЕО», 2006. 151 с.

¹ Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Прохорова Т.В. Блоковая структура и геодинамика континентальной литосферы на границах плит...

11. Рундквист Д.В., Гатинский Ю.Г. Блоки Евразии по сейсмическим данным и результатам спутниковых измерений // Проблемы глобальной геодинамики. Вып. 2. Материалы теоретического семинара ОГТГН РАН / Под ред. Д.В. Рундквиста. М.: ОГТГН РАН, 2003. С. 57–70.
12. Саньков В.А., Леви К.Г., Лухнев А.В. и др. Современная геодинамика Центральной Азии: деформации литосферы в связи с межплитными взаимодействиями и активностью подлитосферных мантийных аномалий // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. Тр. Всерос. совещ., Иркутск, 26–29 авг. 2003. Новосибирск: изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. С. 161–165.
13. Саньков В.А., Леви К.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И. Современные движения литосферных блоков Центральной Азии по данным GPS-геодезии // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Под ред. К.Г. Леви, С.И. Шермана. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2005. С. 165–179.
14. Шерман С.И. Деструктивные зоны литосферы, их напряженное состояние и сейсмичность // Неотектоника и современная геодинамика континентов и океанов: Тез. докл. М.: ГЕОС, 1996. С. 157–158.
15. Copley A. Kinematics and dynamics of the southeastern margin of the Tibetan Plateau // *Geophys. J. Intern.* 2008. V. 174. P. 1081–1100.
16. Flesch L.M., Hol, W.E., Silver P.G. et al. Constraining the extent of crust–mantle coupling in central Asia using GPS, geologic, and shear wave splitting data // *Earth and Planet. Sci. Letters.* 2005. V. 238. P. 248–268.
17. Gatinsky Yu., Prokhorova T., Rundquist D., Vladova G. Block's kinematics and lithosphere deep structure in central and east Asia // *Proceed. APSG Symposium "Space geodynamics and modeling of the global processes"*. Novosibirsk: Trofimuk Inst. Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS. 2009. P. 5–12.
18. Gatinsky Yu., Prokhorova T., Vladova G. Seismic energy releasing in interblock zones of central and east Asia // *Ibid.* 2009. P. 38–48.
19. Gatinsky Yu. G., Prokhorova T. V., Rundquist D. V., and Vladova G. L. Zones of catastrophic earthquakes of Central Asia: Geodynamics and seismic energy // *Russian J. Earth Sciences*, 2009. V. 11, ES1001. P. 1–13.
20. Gatinsky Yu., Rundquist D., Vladova G., Prokhorova T. Connection of catastrophic seismic events with crustal blocks' mobility after GPS data // *Program and abstracts of the APSG Workshop 2009 "Space geodesy for Earth environment change and disaster monitoring"*. Aug. 17–21, 2009, Urumqi, China. P. 58–60.
21. Gatinsky Yu., Rundquist, D.V., Vladova, G.L., and Prokhorova T. Up-To-Date Geodynamics and Seismicity of Central Asia. *International Journal of Geosciences*, 2011. No 2. P. 1–12, doi:10.4236/ijg.2011.21001.
22. Ismail-Zadeh A., Le Mouél J.-L., Soloviev A., Tapponnier P., Vorobieva I. Numerical modeling of crustal block-and-fault dynamics and slip rates in the Tibet – Himalayan region // *Earth and Planet. Sci. Letters.* 2007. Vol. 258. № 3–4. P. 465–485.
23. ITRF Website. January 2011. IGN. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005.php
24. Kanamori H., Anderson D.L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1975. V. 65. P. 1073–1095.
25. Li S., Unsworth M.J., Booker J.R. et al. Partial melt or aqueous fluid in the mid-crust of Southern Tibet? Constraints from INDEPTH magnetotelluric data // *Geophys. J. Intern.* 2003. Vol. 153. № 2. P. 289–304.
26. Liu-Zeng J., Z. Zhang, L. Wen et al. Co-seismic ruptures of the 12 May 2008, M_s 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan: East–west crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the eastern edge of Tibet // *Earth and Planetary Science Letters.* 2009, doi:10.1016/j.epsl.2009.07.017.
27. PAGER – Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response // U.S. Geological Survey. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/page>
28. Rundquist D.V., Gatinsky Yu.G., Cherkasov S.V. Trans-Eurasian divider: structural and metallogenic evidences // 32-IGC, Florence, Italy. Aug. 20–28. 2004: Abstracts. Part 1, 136–13. P. 620.
29. Rundquist, D.V., Gatinsky, Yu.G., Bush, W.A., Kossobokov, V.G. The area of Russia in the present-day structure of Eurasia: Geodynamics and seismicity // *Computational Seismology and Geodynamics*. Vol. 7 / D.K. Chowdhury (ed.). 2005. Am. Geophys. Union. Washington, D.C. P. 224–233.
30. Sankov V.A., Lukhnev A.V., Miroshnitchenko A.I. et al. Recent geodynamics of Mongolia-Baikal mobile area: movements, deformations and block rotations // *Abstract book APSG 2008 "Space geodynamics and modeling of the global geodynamic processes"*. Novosibirsk: RFBR, 2008. P. 15–16.
31. Seminskii K.Zh. Hierarchy in the zone block lithospheric structure of Central and Eastern Asia // *Rus. Geol. And Geophys.* 2008. V. 49. P. 771–779.
32. Shen F., Royden L.H., Burchfiel B.C. Large-scale crustal deformation of the Tibetan Plateau // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № B4. P. 6793–6816.
33. Sol S., Meltze A., Bürgmann R. et al. Geodynamics of the southeastern Tibetan Plateau from seismic anisotropy and geodesy // *Geology* 2007. V. 35. No 6. P. 563–566.
34. Tao W., Shen Z. Heat flow distribution in Chinese continent and its adjacent areas // *Progress in Natural Science.* 2008, doi:10.1016/j.pnsc.2008.01.018.
35. Wei W., Ye G., Li Y. et al. Three-Dimensional P-Wave Velocity Structure of the Crust of North China // *J. China University of Geosciences.* 2007. V. 18. Issue 3. P. 257–268.
36. Xiao, L., Wang C., Pirajno F. Is the Underthrust Indian Lithosphere Split beneath the Tibetan Plateau? // *Intern. Geol. Review.* 2007. V. 49. P. 90–98.
37. Xu X., Deng Q. Nonlinear characteristics of paleoseismicity in China // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. No B3. P. 6209–6231.
38. Yuan X., Egorov A.S., GEMOC. A short introduction to Global Geoscience Transect 21: Arctic Ocean – Eurasia – Pacific Ocean // *Science Press.* 2000. 32 p.