



## SUBMERIDIONAL BOUNDARY ZONE IN ASIA: SEISMICITY, LITHOSPHERE STRUCTURE, AND THE DISTRIBUTION OF CONVECTIVE FLOWS IN THE UPPER MANTLE

N. A. Bushenkova<sup>1,2</sup>, O. A. Kuchay<sup>1</sup>, V. V. Chervov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

**Abstract:** The study is focused on the submeridional transregional boundary that stretches as a wide band along 105°E in Central Asia. In modern seismic models, it is traceable to a depth of ~600 km. In the continental area to the west of this boundary, seismic activity is increased. Following the study of the origin of the transregional boundary zone, it becomes possible to assess its contribution to the current geodynamic processes in Asia. This article presents a comprehensive analysis based on comparison of the available data with the results obtained in our study using independent methods. The distribution of earthquakes was analyzed by depth. We revealed a correlation between the characteristics of seismotectonic deformation (STD) reconstructed from earthquake focal mechanisms, the structure of P-velocity anomalies, and the distribution of convection flows in the upper mantle. The pattern of seismic velocity anomalies in the upper mantle was investigated on the basis of the data from the ISC catalogue for the period of 1964–2011. The modeling was carried out for two regional tomographic schemes, using the first arrivals of P-waves from [Koulakov *et al.*, 2002] and PP-phases from [Bushenkova *et al.*, 2002], with the subsequent summation with weight coefficients depending on the distribution of the input data in each scheme. A similar approach was applied in [Koulakov, Bushenkova, 2010] for the territory of Siberia; however, that model only partially covered the submeridional transregional boundary zone and was based on fewer ISC data (until 2001). The parameters of the combined model were used to estimate variations in the lithosphere thickness, which can significantly influence the structure of convection flows in the upper mantle [Chervov *et al.*, 2014; Bushenkova *et al.*, 2014, 2016]. The thickness variations were taken into account when setting boundary conditions in the numerical modeling of thermal convection, which followed the algorithm described in [Chervov, Chernykh, 2014]. The STD field was reconstructed from the earthquake focal mechanisms ( $M \geq 4.6$ ) which occurred in Central Asia in 1976–2017. The analysis shows that the zone, wherein the seismic regime changes, correlates with the band wherein the STD principal axes are turning, the submeridional high/low velocity elongated boundary in the seismotomographic model, as well as with the submeridionally elongated descending convective flow in the upper mantle. Shortening of the STD principal axes is observed in the submeridional direction in the western part and in the sublatitudinal direction in the eastern part of the study area. The directions of the principal axes turn in the 93–105°E zone. It is thus probable that the submeridionally elongated descending convective flow in the upper mantle of this region, which results from the superposition of the lithosphere thickness heterogeneities, is a barrier to propagation of seismically manifested active geodynamic processes caused by lithospheric plates collision.

**Key words:** continental seismicity; submeridional boundary zone; thermal convection in the upper mantle; lithosphere structure; Central Asia

### RESEARCH ARTICLE

**Handling Editor:** V.A. Sankov

**Received:** February 15, 2018

**Revised:** May 15, 2018

**Accepted:** June 4, 2018

**For citation:** Bushenkova N.A., Kuchay O.A., Chervov V.V., 2018. Submeridional boundary zone in Asia: seismicity, lithosphere structure, and the distribution of convective flows in the upper mantle. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 1007–1023. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0381.

**Для цитирования:** Бушенкова Н.А., Кучай О.А., Червов В.В. Субмеридиональная пограничная зона в Азии: сейсмичность, структура литосферы и распределение конвективных потоков в верхней мантии // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 3. С. 1007–1023. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0381.

# СУБМЕРИДИОНАЛЬНАЯ ПОГРАНИЧНАЯ ЗОНА В АЗИИ: СЕЙСМИЧНОСТЬ, СТРУКТУРА ЛИТОСФЕРЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ В ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

Н. А. Бушенкова<sup>1,2</sup>, О. А. Кучай<sup>1</sup>, В. В. Червов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Исследование посвящено субмеридиональной трансрегиональной границе, которая широкой полосой простирается вдоль 105° в.д. в Центральной Азии и может быть прослежена в современных сейсмических моделях вплоть до глубины ~600 км. К западу от нее отмечается повышенная континентальная сейсмическая активность. Изучение природы трансрегиональной пограничной зоны позволит оценить ее вклад в текущие геодинамические процессы в Азии. В работе проведен комплексный анализ на основе сопоставления доступных данных с результатами, полученными в ходе исследования с помощью независимых методов. Проанализировано распределение землетрясений по глубине. Прослежена корреляция между характером сеймотектонических деформаций (СТД) по данным механизмов очагов землетрясений, структурой аномалий Р-скорости и распределением конвективных потоков в верхней мантии. Структура распределения аномалий сейсмических скоростей в верхней мантии основана на данных каталога ISC за период 1964–2011 гг. Моделирование выполнено по двум региональным томографическим схемам (на первых вступлениях [Koulakov et al., 2002] и с использованием PP-фаз [Bushenkova et al., 2002]) с последующим суммированием с весовыми коэффициентами, зависящими от распределения исходных данных для каждой схемы. Аналогичный подход применен в работе [Koulakov, Bushenkova, 2010] для территории Сибири, в которой модель была построена на меньшем количестве данных каталога ISC (до 2001 г.) и захватывала лишь часть исследуемой в настоящей работе субмеридиональной пограничной зоны. Характеристики полученной суммарной модели использованы для оценки вариаций мощности литосферы, которые, как показали результаты предыдущих исследований [Chervov et al., 2014; Bushenkova et al., 2014, 2016], могут значительно влиять на структуру конвективных течений в верхней мантии. Полученные вариации мощности учтены при задании граничных условий в задаче численного моделирования тепловой конвекции, выполненного в соответствии с алгоритмом [Chervov, Chernykh, 2014]. Реконструкция поля СТД проводилась по данным механизмов очагов землетрясений ( $M \geq 4.6$ ), которые произошли в Центральной Азии в 1976–2017 гг. Результаты показали, что зона изменения сейсмического режима и полоса разворота главных осей СТД коррелируют с субмеридионально вытянутой границей повышенных/пониженных скоростей в сеймотомографической модели и с субмеридионально протяженным нисходящим потоком в верхней мантии. Западная часть территории характеризуется субмеридиональным укорочением главных осей деформации, а восточная – субширотным укорочением. Поворот направлений основных осей СТД происходит в зоне 93–105° в.д. Таким образом, субмеридионально протяженный нисходящий поток в конвективной структуре верхней мантии региона, возникший в результате суперпозиции неоднородностей мощности литосферы, вероятно, и представляет собой преграду на пути распространения проявляющихся в сейсмическом режиме активных геодинамических процессов, вызванных коллизией.

**Ключевые слова:** континентальная сейсмичность; субмеридиональная пограничная зона; тепловая конвекция в верхней мантии; структура литосферы; Центральная Азия

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Понимание механизмов взаимодействия глубинных и поверхностных тектонических процессов является чрезвычайно важным для разработки достоверных геодинамических моделей. Региональная субмеридиональная структура, протянувшаяся в области 105-го меридиана в Центральной Азии, делит ее континентальную часть на интенсивно сейсмически активный и относительно пассивный регионы [Gatinsky et al., 2008, 2011; Gatinsky, Pro-

chorova, 2014]. В многочисленных публикациях приводятся материалы о геодинамических различиях в западной и восточной зонах Центральной Азии [Grachev et al., 1993; Levi, Sherman, 2005; Petrov et al., 2008; Hatzfeld, Molnar, 2010; Kuchai, Kozina, 2015; Zheng et al., 2017]. Одна из обобщающих геолого-геофизических характеристик этой пограничной зоны приведена в статьях [Sherman, 2014; Sherman et al., 2015]. Для отдельных частей рассматриваемой территории опубликованы работы как по восстановлению поля напряжений, так и по

определению сеймотектонических деформаций по данным материалов местных сетей станций с привлечением международных каталогов [Gushchenko et al., 1977; Lukk, Yunga, 1988; Petit, Fournier, 2005; Trifonov et al., 2002; Rebetsky, 2007; Petrov et al., 2008; Kuchai, Bushenkova, 2009; Rebetsky et al., 2012; Rebetsky, Alekseev, 2014; Sankov, 2014; Radziminovich et al., 2016; и др.].

С целью повышения обоснованности выделения трансрегиональной пограничной зоны вдоль 105-го меридиана в настоящей работе мы постарались объединить и проанализировать все доступные сейсмические характеристики изучаемой территории.

Наши предыдущие работы по сопоставлению распределения направленностей главных осей сеймотектонических деформаций (СТД) по данным механизмов землетрясений с результатами сейсмотомографии и численного моделирования тепловой конвекции в верхней мантии для других территорий показали, что наблюдается явная корреляция этих независимых результатов [Bushenkova et al., 2014, 2016] и прослеживается взаимосвязь распределения неоднородностей толщины литосферы со структурой потоков тепловой конвекции в верхней мантии, которая, в свою очередь, проявляется в некоторых характеристиках сейсмичности, поэтому мы предположили и комплексно проанализировали подобную взаимосвязь в области субмеридиональной пограничной зоны Центральной Азии.

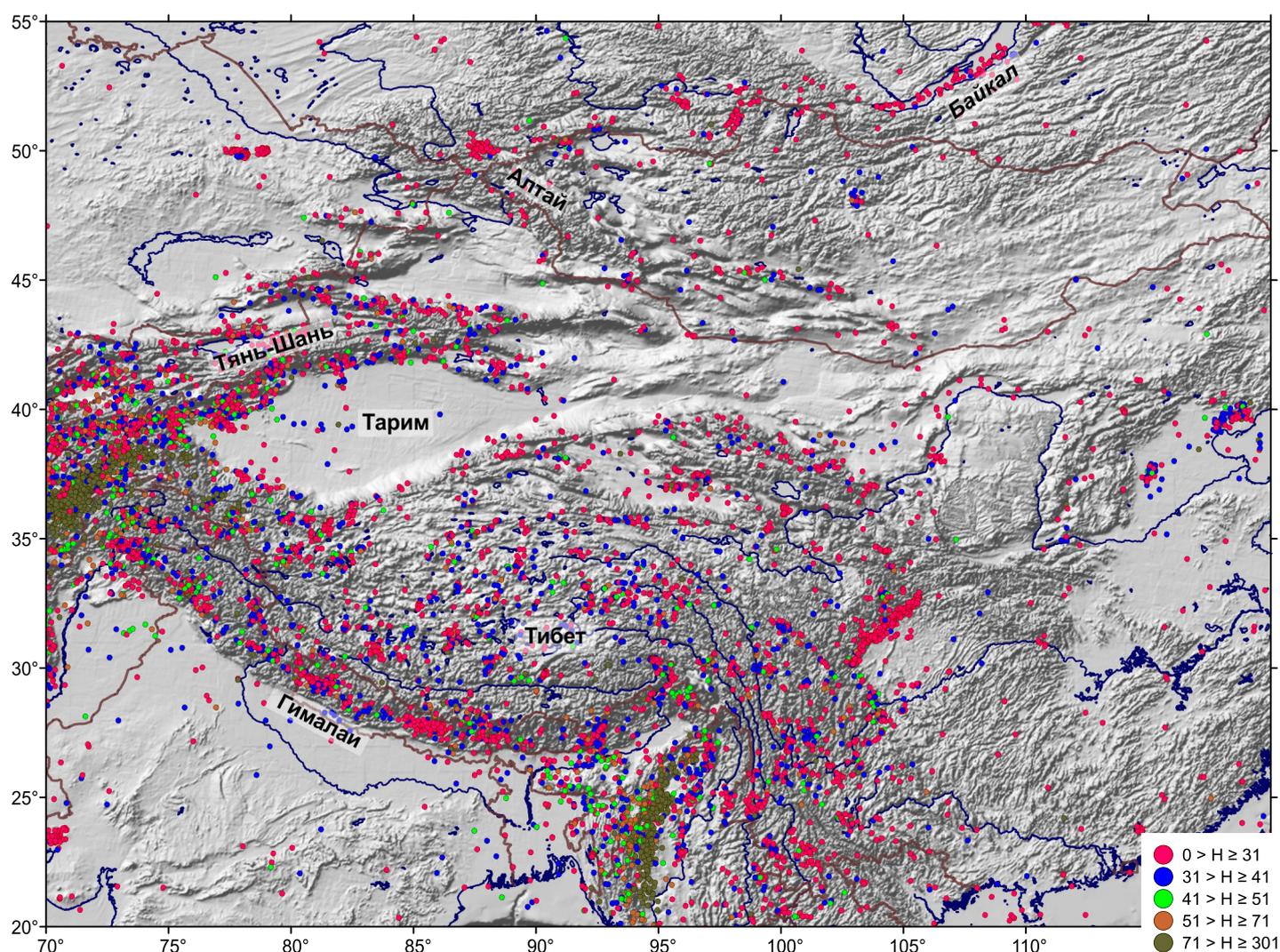
## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для построения карты распределения землетрясений по глубинам (рис. 1) нами использованы как данные Международного сейсмологического центра (ISC, <http://www.isc.ac.uk/Cite/cite.html>) за период с 1970 по 2010 г. для землетрясений с достаточно большой энергией ( $M \geq 4.6$ ), так и данные локальных сетей.

Для построения комплексной сейсмотомографической модели аномалий Р-скорости в верхней мантии региона мы использовали данные международного каталога ISC за период с 1964 по 2011 г. Были применены региональные томографические алгоритмы и подходы, детально описанные в работе [Koulakov, Bushenkova, 2010], для которой были использованы данные о землетрясениях только до 2001 г., а сама модель лишь частично захватывала район трансрегиональной пограничной зоны. Таким образом, в новых расчетах расширена территория и добавлены данные по землетрясениям еще за 10 лет. Применены две независимые сейсмотомографические схемы, позволяющие выполнять

исследования сейсмической структуры литосферы и подлитосферной части верхней мантии с разрешающей способностью, приемлемой, в том числе, и для оценки мощности литосферы. Одна схема работает на временах первых вступлений Р-волны [Koulakov et al., 2002; Kulakov, 2008; Koulakov, 2011; и др.]. Вторая, разработанная одним из авторов настоящей работы, использует разницу времен пробега первых вступлений и однократно отраженных от поверхности Земли в изучаемом регионе фаз (PP-P) [Bushenkova et al., 2002, 2003, 2008; Koulakov, Bushenkova, 2010; и др.]. В качестве референтной использована скоростная модель АК135 [Kennet et al., 1995]. Суммирование полученных сейсмотомографических моделей выполнено с весовыми коэффициентами, аналогично методике, примененной в работе по Сибири [Koulakov, Bushenkova, 2010]. Весовые коэффициенты при суммировании моделей по разным схемам зависят от распределения и количества исходных данных. Пример таких коэффициентов на разных глубинах для модели, полученной с использованием времен пробега PP-волн, показан на рисунке 2. Разрешение сейсмотомографических результатов в синтетических тестах качественно не отличается от приведенных в работах [Koulakov, Bushenkova, 2010; Koulakov, 2011], но увеличение количества исходных данных и небольшой сдвиг территории исследования к югу визуально повысили контраст в северной и центральной части модели.

Для расчета численной модели тепловой конвекции в верхней мантии важно при задании граничных условий учесть мощность литосферы максимально близко к реальным значениям, так как в случае соседствования блоков с мощностями, отличающимися в среднем на 80 км и более, возникает перестроение ячеек конвекции в результате перегрева под большими по площади блоками с мощной литосферой (см. наши предыдущие исследования [Chervov et al., 2014; Bushenkova et al., 2014, 2016]). Для учета в граничных условиях неоднородностей глубины подошвы литосферы мы провели комплексный анализ литературных данных и собственных оценок мощности сейсмической литосферы по результатам сейсмотомографического моделирования. Моделирование конвекции выполнено на основе известных уравнений Навье-Стокса в сферической системе координат с использованием программного кода, разработанного, протестированного и неоднократно примененного для различных граничных условий в предыдущих работах авторов (например [Chervov et al., 2014]). Граничные условия были скорректированы с учетом обновленных оценок средней мощности и геометрии границ блоков литосферы, согласно методике, примененной в работе [Bushenkova et al.,



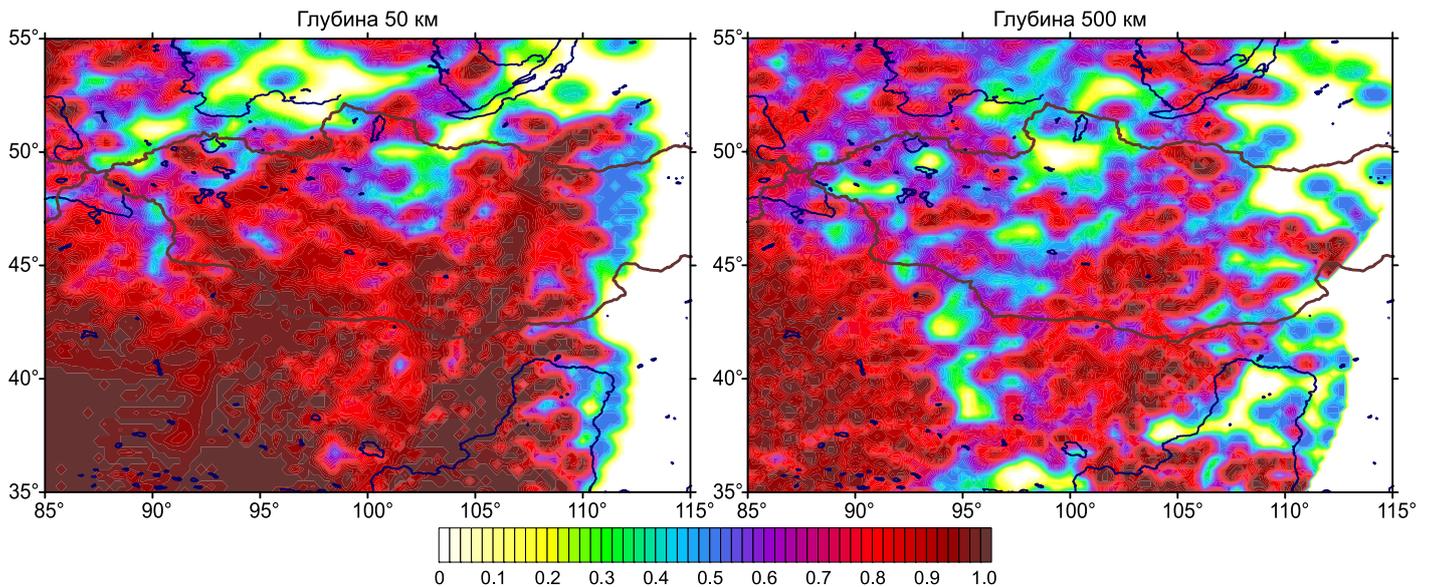
**Рис. 1.** Распределение землетрясений с  $M \geq 4.6$  по глубинам согласно каталогам Международного сейсмологического центра (<http://www.isc.ac.uk/Cite/cite.html>) и данным локальных сетей. Разным цветом показаны глубины очагов землетрясений.

**Fig. 1.** Distribution of  $M \geq 4.6$  earthquakes by depth, according to the International Seismological Center catalogues (<http://www.isc.ac.uk/Cite/cite.html>) and the local network databases. Different depths of earthquake foci are shown in different colours.

2008]. В алгоритме использован неявный метод искусственной сжимаемости [Vladimirova et al., 1966], в котором уравнение несжимаемости заменяется уравнением неразрывности слабосжимаемой жидкости. При этом система уравнений становится системой типа Коши-Ковалевской, для которой применен метод дробных шагов [Yanenko, 1967; Anderson et al., 1990]. Модель рассчитана с применением последовательности сеток, аналогично [Chervov, 2002a, 2002b; Chervov, Chernykh, 2014], что значительно ускоряет вычислительный процесс. Определение температуры выполнено через уравнение теплопроводности в дивергентной форме.

Для расчета СТД использован каталог международного сейсмологического центра ISC для собы-

тий с  $M=4.6-8.0$  (<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/fmechanisms/>). Как известно, землетрясения с магнитудой более 4.9, произошедшие в пределах одной геодинамической зоны, имеют достаточно устойчивые и близкие значения параметров механизмов очагов. Примером могут служить сильные землетрясения в пределах Тянь-Шаня, где оси сжатия механизмов очагов (с  $M > 4.5$ ) практически близгоризонтальны и субмеридиональны, оси растяжения – близвертикальны. Сильные сейсмические события Байкальской рифтовой зоны отличаются близгоризонтальными СВ-ЮЗ осями растяжения и преимущественно близвертикальными осями сжатия. Восстановление поля СТД для района с координатами  $25-55^\circ$  с.ш. и  $85-115^\circ$  в.д.



**Рис. 2.** Весовые коэффициенты при построении комплексной сейсмотомографической модели для данных модели с использованием PP-волн (в зависимости от плотности данных для разных глубин).

**Fig. 2.** Weight coefficients for constructing a combined seismotomographic model using PP-wave data (depending on the data density for different depths).

осуществлено по данным параметров механизмов очагов более 750 землетрясений, произошедших за период с 1976 г. по июнь 2017 г. Ориентация главных осей СТД рассчитана с использованием методики, описанной в публикациях [Riznichenko, 1985; Kostrov, 1975; Yunga, 1990; Gol'din, Kuchai, 2007; Kuchai, Kozina, 2015]. Неравномерное распределение очагов землетрясений в пределах этого района определило выбор размера площадок осреднения в  $2^\circ$  по широте и долготе. Расчеты компонент деформаций для ячеек осреднения проводились методом скользящего окна с шагом  $1^\circ$ . В пределах каждого элементарного объема рассчитывались ориентации главных осей СТД. На данном этапе мы придерживались глубины очагов, полученной при определении механизмов землетрясений из каталога ISC.

В настоящей работе применены три подхода для расчета сейсмотектонических деформаций по данным механизмов очагов землетрясений. В первом восстанавливаются сейсмотектонические деформации с учетом величины сейсмического момента каждого землетрясения, во втором – без учета величины сейсмического момента. В третьем подходе тензоры сейсмических моментов очагов приводятся в географическую систему координат, а далее выполняется сопоставление знаков компонент сейсмического момента каждого землетрясения, попадающего в ячейку осреднения, и формируется группа с одинаковыми знаками компонент. Если образуются две группы, то предпочтение отдается

группе с большим количеством землетрясений. При равном количестве землетрясений, попадающих в каждую из групп, расчет происходит по совокупности землетрясений с большими значениями магнитуд. Таким образом, определяется однородно деформированный объем в каждой элементарной ячейке.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Построенное распределение очагов землетрясений (см. рис. 1) хорошо соотносится с результатами ряда исследователей, которые установили связь распределения эпицентров землетрясений с областями динамического влияния разломов в Центральной Азии [Zoback, 1992; Grachev et al., 1993; Liu et al., 2007; Deng et al., 2003; Zhang et al., 2003; Bayasgalan et al., 2005; Gorbunova, Sherman, 2016]. Основное количество сейсмических событий сосредоточено к западу от субмеридиональной пограничной зоны. При этом сейсмическая активность характеризуется постепенным снижением от Гималаев на север до Таримского блока. К северу (Тянь-Шань) она вновь возрастает. Минимальный уровень сейсмической активности фиксируется в южной части восточнее меридиональной пограничной полосы, возрастая к северу примерно до  $42^\circ$  с.ш., а еще севернее практически затухает.

Рассмотрим распределение очагов землетрясений в районе субмеридиональной структуры по

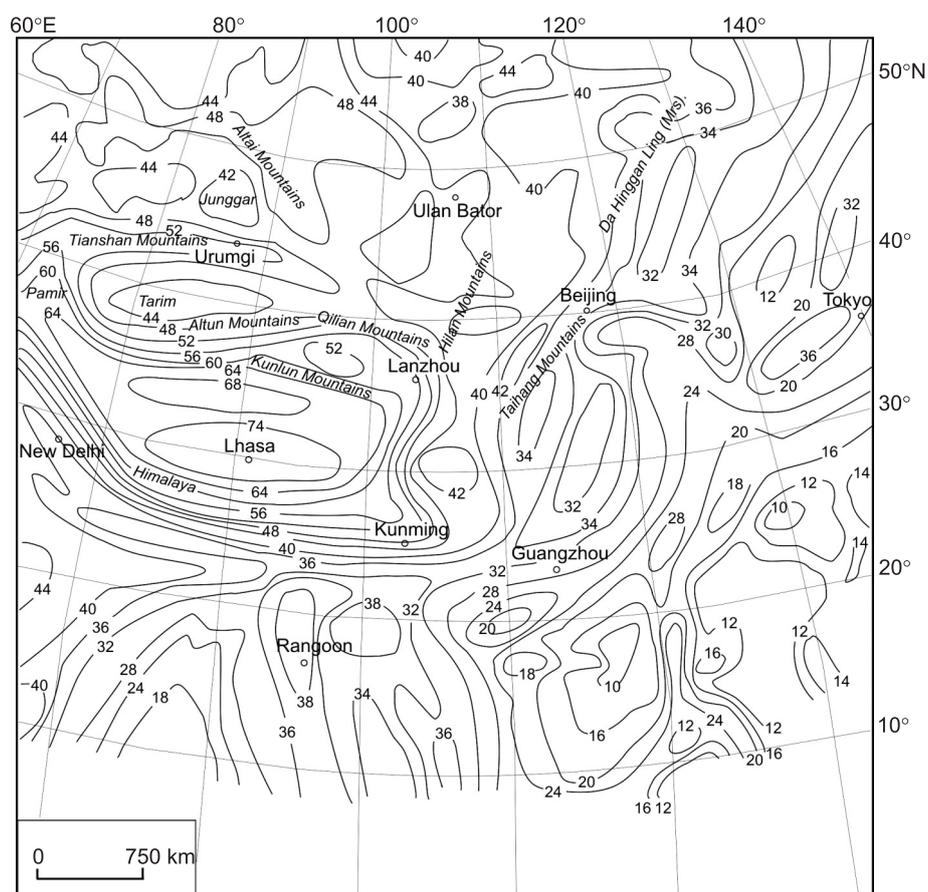


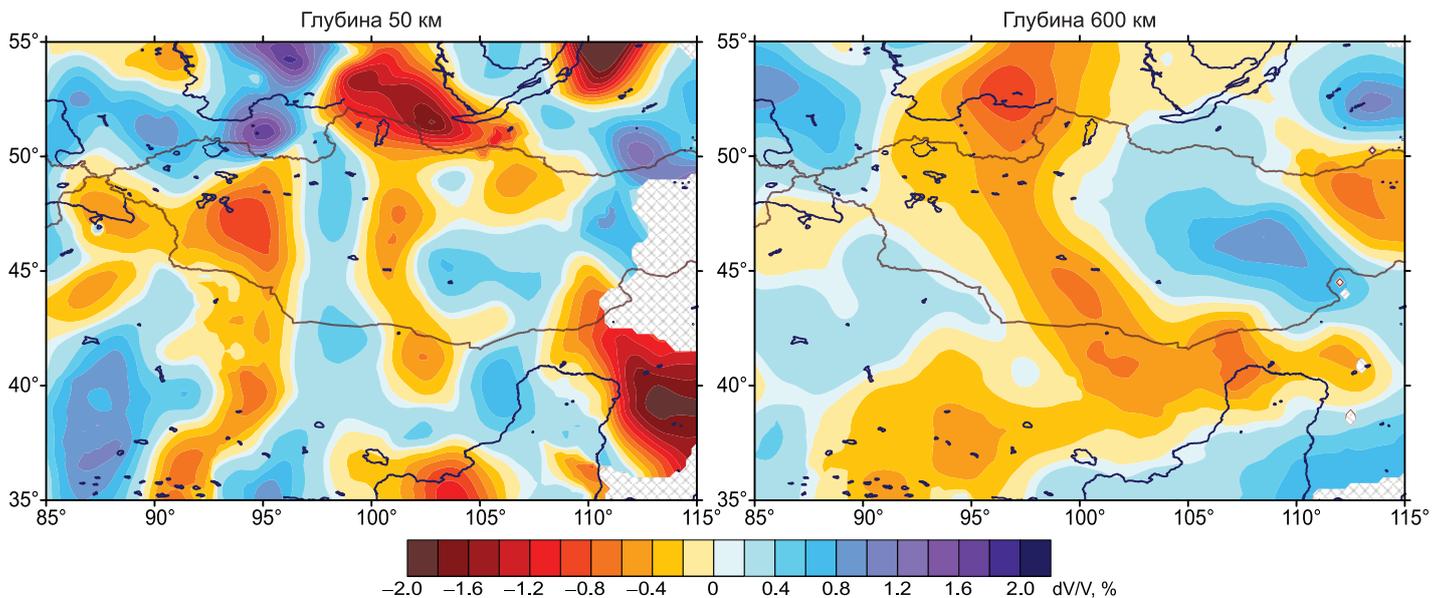
Рис. 3. Схема мощности земной коры [Teng et al., 2003]. Значения изопахит приведены в километрах.

Fig. 3. Crustal thickness scheme [Teng et al., 2003]. Isopachite: km.

глубине. На территории Западного и Центрального Тянь-Шаня очаги землетрясений глубже 40 км не фиксировались, согласно данным локальной сети сейсмических станций Киргизии [Bakirov, 2006]. По данным Байкальского и Алтае-Саянского филиалов Геофизической службы РАН, в Алтае-Саянской горной области и Байкальской рифтовой системе сейсмически активный слой ограничен коровыми глубинами (до 30 км), что показано также в работах ряда авторов [Tsubulchik, 1966; Golenetsky, 1977, 1990; Gileva et al., 2000; Suvorov, Tubanov, 2008]. Коровыми глубинами ограничивается и основная часть землетрясений на территории Китая, что соответствует выводам китайских исследователей, сделанным на основе разных объемов исходных данных [Teng et al., 2003, 2013, 2014]. Кроме того, китайскими коллегами представлены некоторые оценки мощности земной коры и литосферы в регионе [Teng et al., 2003, 2014; Li et al., 2006]. Согласно [Teng et al., 2003], граница между западной и восточной частью территории Центральной Азии хорошо прослеживается в неоднородностях мощности коры (рис. 3). Она представлена меняющейся по ширине меридиональной зоной с постоянной, около 42–44 км,

толщиной коры. По сближенности проведенных через 2 км изопахит западная граница меридиональной пограничной области крутая с вероятным падением на запад, восточная – пологая, с вероятным падением на восток. Восточная область характеризуется субмеридиональными простирациями локальных структур в коре с мощностью от 30 до 42 км. И только на самом юге, в области выступа Гималайского надвига, в районе Бирманских гор, фиксируются изменения простираения структур на широтные с общим уменьшением мощности до 32 км. Западная область характеризуется субширотными вариациями мощностей от минимальных 40 км до 70 км и более. В ее пределах прослеживается постепенное уменьшение мощности коры с юга на север.

Обобщающий анализ данных показал, что на рассматриваемой территории глубины очагов землетрясений располагаются преимущественно в земной коре в интервале от 0 до 40 км. Более глубокие события ( $H=40-70$  км) зарегистрированы в Памиро-Гиндукушской и Бирманской глубоководных зонах, а также, фрагментарно, в Гималаях, на Тибете и на Тянь-Шане. К северу от 35° с.ш. ко-



**Рис. 4.** Комплексная сейсмотомографическая модель: представлены срезы на разных глубинах в центральной части изучаемого региона. Аномалии скоростей Р-волн показаны в процентах (от АК135 [Kennet et al., 1995]), теплые оттенки – пониженные скорости, холодные – повышенные.

**Fig. 4.** Combined seismotomographic model. Cross sections are given for different depths in the central part of the study area. The anomalies of P-wave velocities are shown in percentage values (from АК135 [Kennet et al., 1995]); warm shades – decreased velocities, cold shades – increased velocities.

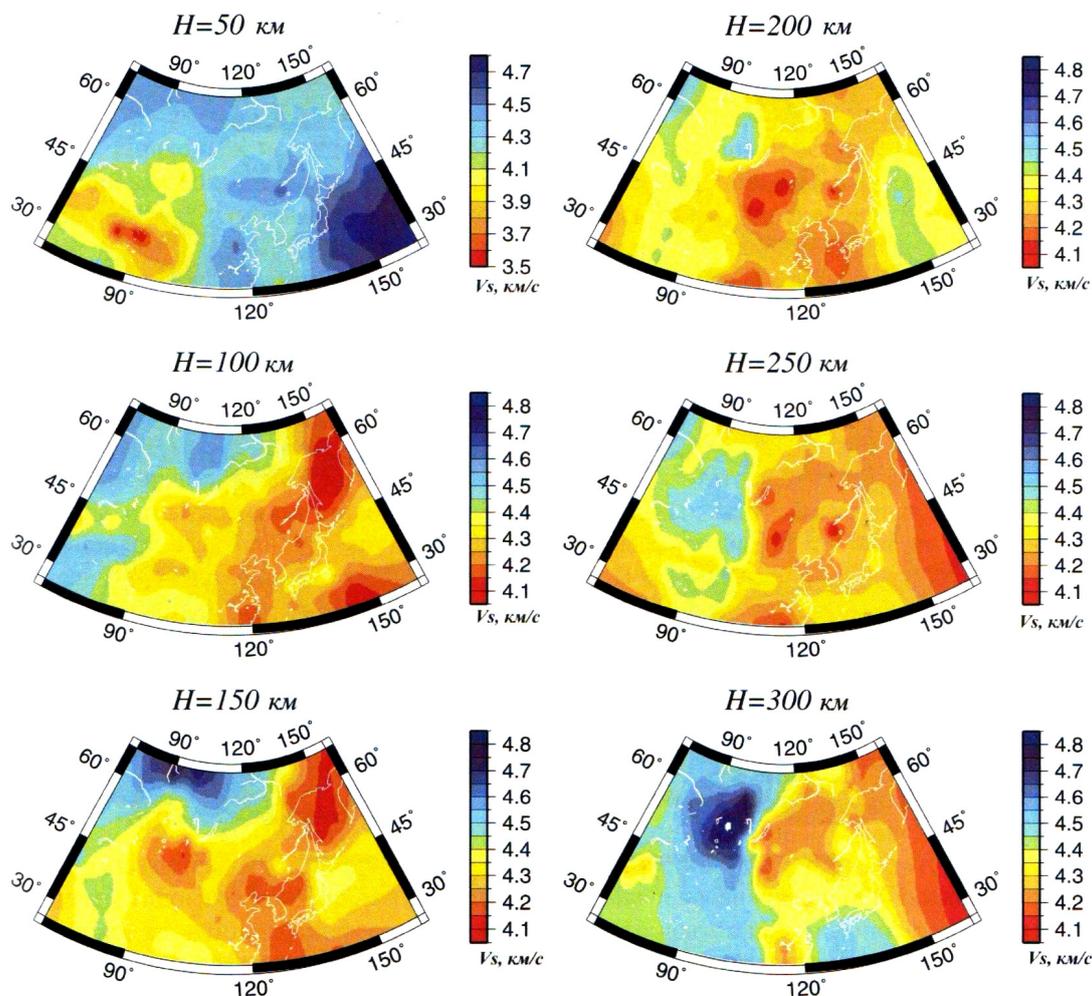
личество очагов с  $H=40-50$  км незначительное. Таким образом, мощность сейсмоактивного слоя в ряде областей Центральной Азии несколько различается. Однако общая картина распределения землетрясений позволяет констатировать тенденцию к увеличению глубины сейсмоактивного слоя к югу (Тибет, Памир, Гималаи) в западной части рассматриваемой области.

В центральной части полученной комплексной сейсмотомографической модели аномалий скорости Р-волн верхней мантии Центральной Азии практически на всю глубину отчетливо прослеживается вытянутая скоростная структура в области субмеридиональной пограничной зоны, особенно протяженная на больших глубинах (до 600 км). На рисунке 4 представлены примеры максимально различающихся срезов модели на разных глубинах. Таким образом, наша модель подтверждает мантийную природу субмеридиональной структуры, что согласуется с предыдущими подобными построениями для северной части исследуемого района [Koulakov, Bushenkova, 2010]. Кроме того, полученная структура сопоставима с предыдущими моделями других авторов по поверхностным волнам, где в менее детальной общей структуре проявляется отчетливая субмеридиональная скоростная граница на мантийных глубинах [Yanovskaya, Kozhevnikov, 2003; Kozhevnikov et al., 2014]. Так, согласно трехмерной модели скоростей прохождения

S-волн для Центральной Азии [Yanovskaya, Kozhevnikov, 2003], на глубине 50 км по меридиану  $\sim 105^\circ$  прослеживается четкая граница между существенно отличающимися скоростями S-волн: на западе пониженные скорости, на востоке – повышенные (рис. 5). Низкие скорости соответствуют утолщенной земной коре под Тибетом. Несколько иная картина фиксируется на глубине 300 км, где примерно по  $105^\circ$  в.д. отчетливо прослеживается непрерывная граница между низкоскоростной мантией на востоке и высокоскоростной на западе. Частично подобная граница отмечена на глубинах 250 км. В сейсмотомографической модели [Koulakov, 2011] корни этой пограничной структуры местами можно проследить и глубже, вплоть до 600 км.

Полученная численная модель тепловой конвекции в верхней мантии исследуемого региона демонстрирует образование устойчивых восходящих потоков мантийной конвекции вследствие перегрева под ближайшими Северо- и Южно-Китайскими кратонами. При приближении к основаниям кратонов восходящие потоки растекаются вдоль их подошвы, стремясь к бортам, и вызывают перестроение компенсирующих нисходящих потоков в единую структуру, вытянувшуюся примерно вдоль  $105^\circ$ -го меридиана (рис. 6).

Восстановленная по данным механизмов очагов землетрясений ориентация главных осей СТД



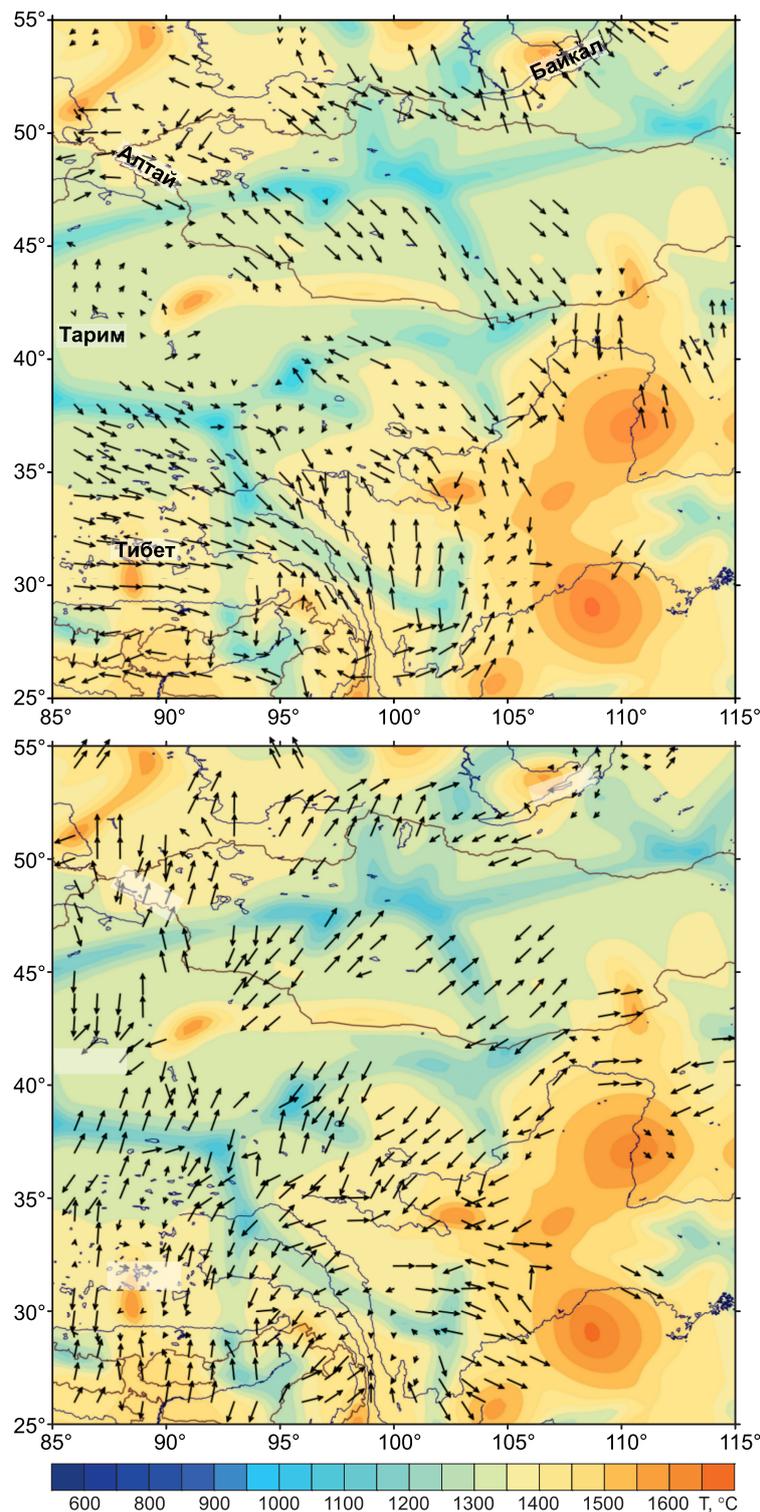
**Рис. 5.** Карты вариаций скоростей S-волн [Yanovskaya, Kozhevnikov, 2003]. Над каждой картой-схемой приведены соответствующая глубина, справа указана скорость ( $V_s$ ).

**Fig. 5.** Maps of S-wave velocities variations [Yanovskaya, Kozhevnikov, 2003]. Corresponding depths are shown on top of every map; velocities ( $V_s$ ) is indicated at the right side.

(рис. 6, 7) для каждого элементарного объема осреднения по глубине 0–45 км показывает, что преимущественное направление осей СТД меняется с запада на восток. Субмеридиональное укорочение главных осей, характерное для западной части территории (см. рис. 6; рис. 7, а), превращается в субширотное в восточной (см. рис. 6, рис. 7, в). Разворот направлений осей укорочения происходит в диапазоне 93–105° в.д., т.е. на расширенной субмеридиональной трансрегиональной границе Центральной Азии (см. рис. 6; рис. 7, б).

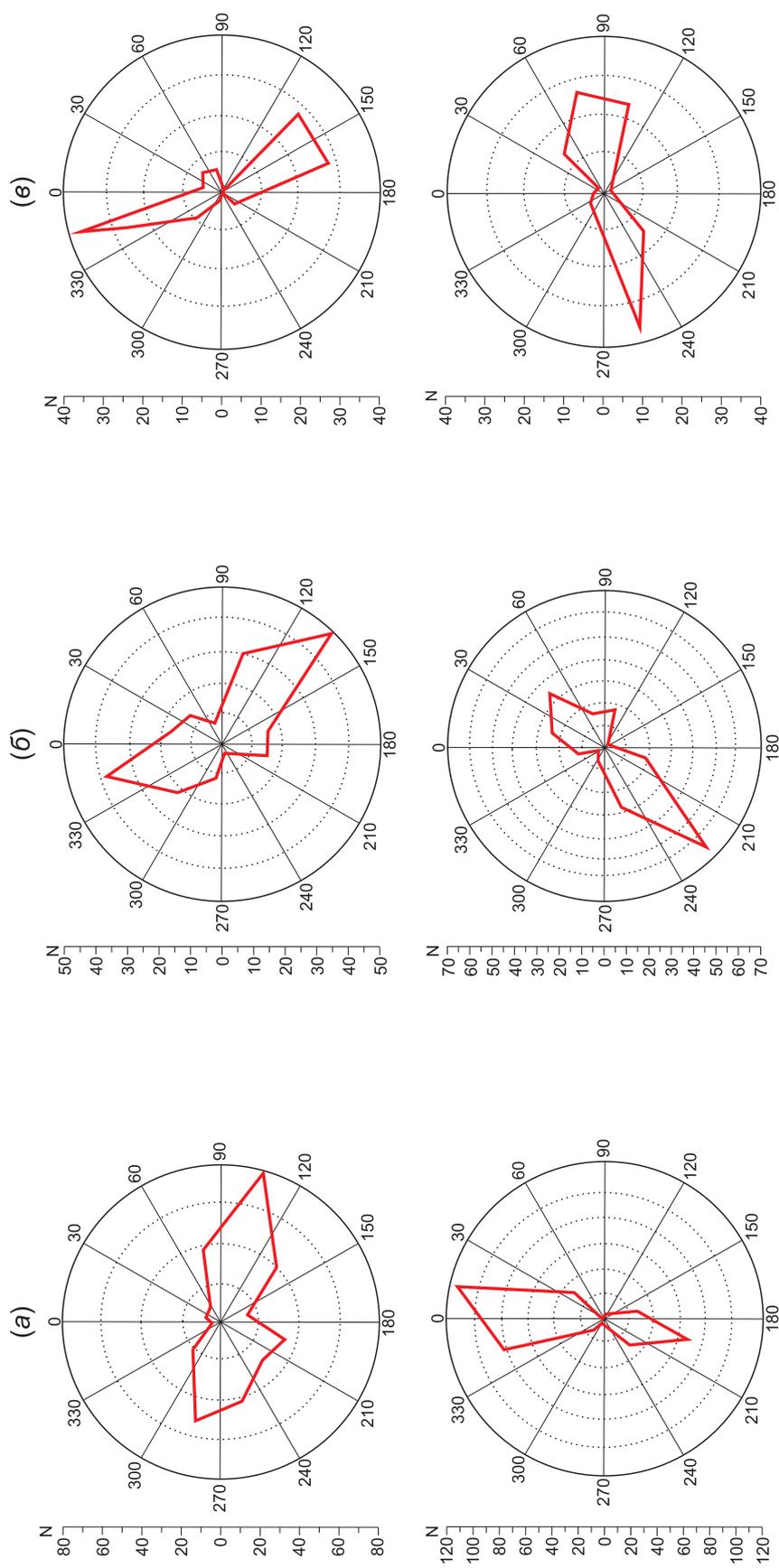
Ориентация главных осей сейсмотектонических деформаций, рассчитанных без учета сейсмических моментов землетрясений по данным выделенных групп, также не противоречит положению главных осей СТД, восстановленных по сейсмическим очагам с привлечением величин сейсмических моментов (рис. 8, 9). Таким образом, при любом способе восстановления главных осей деформаций по ме-

ханизмам очагов с  $M > 4.6$  (с учетом величины сейсмического момента, без его учета и способом выделения однородных групп) в западной части исследуемой территории оси укорочения (субмеридиональные) отличаются по ориентации от азимутов осей укорочения, полученных в восточной части. Превалирующая субмеридиональная ориентация главных осей укорочения, при преимущественном субширотном либо субвертикальном удлинении, характерна для западной части территории. Изменение в азимутальной ориентации осей укорочения происходит в восточной части Тибета, примерно с 93-го меридиана по 105-й. Эта достаточно широкая зона характеризуется ориентацией осей сейсмотектонических деформаций. Непосредственно в восточной части района наблюдается субмеридиональная ориентация главных осей удлинения при преимущественно субширотном положении осей укорочения.



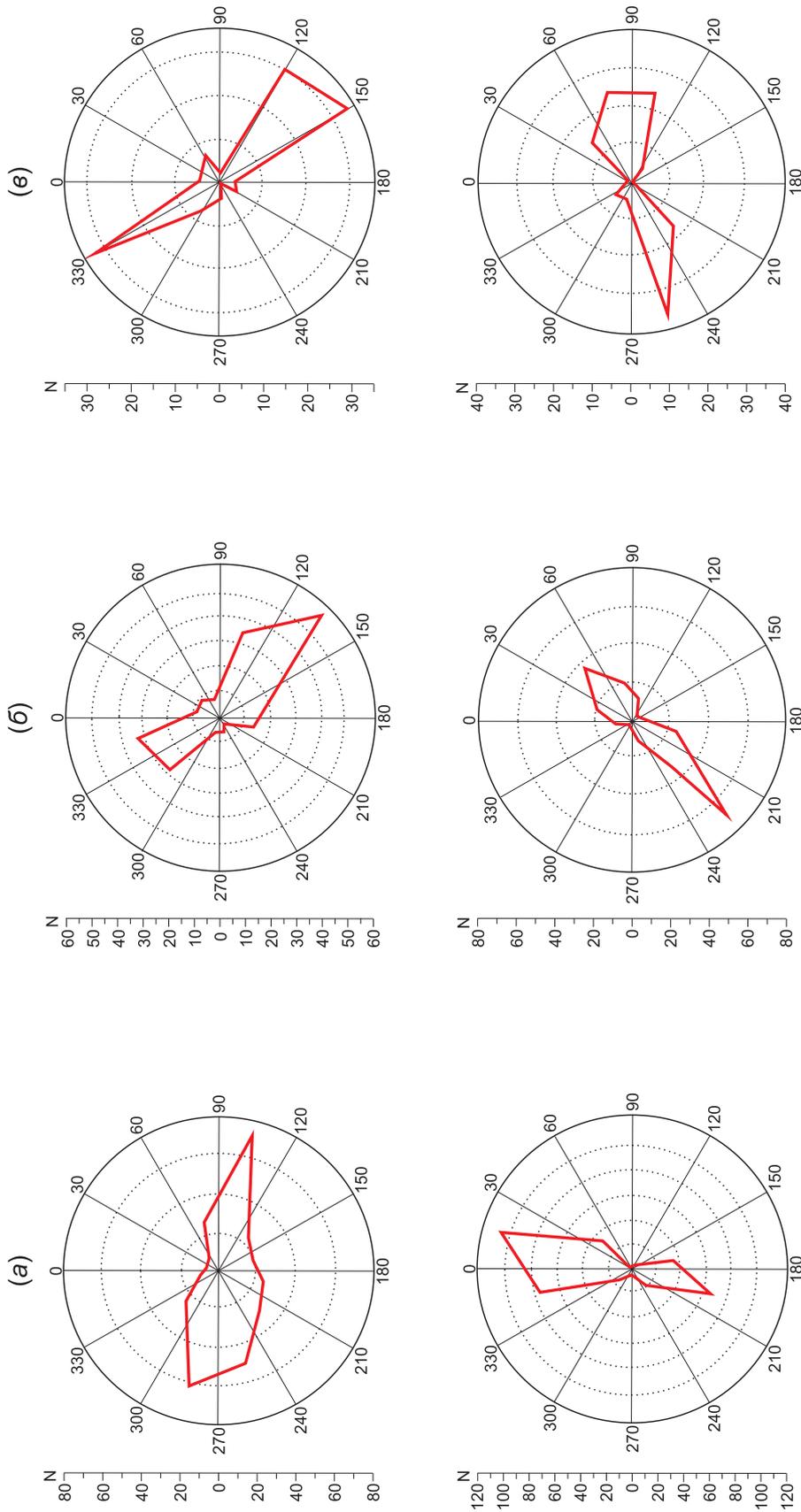
**Рис. 6.** Ориентация главных осей сейсмотектонических деформаций на фоне среза рассчитанной структуры тепловой конвекции в верхней мантии (на глубине 280 км). Восстановление выполнено по данным механизмов очагов землетрясений ( $M \geq 4.6$ ) в слое 0–45 км с учетом величины сейсмического момента каждого землетрясения. Вверху – проекции осей максимальных девиаторных деформаций удлинения, внизу – укорочения. Направление погружения осей показано стрелками. Длинные стрелки соответствуют близгоризонтальным удлинениям (укорочениям), короткие – близвертикальным.

**Fig. 6.** The orientations of the main seismotectonic strain axes shown against the cross sections of the calculated structure of thermal convection in the upper mantle (at the depth of 280 km). The reconstruction is based on the  $M \geq 4.6$  earthquake focal mechanisms in the 0–45 km layer, and takes into account the magnitudes of seismic moment of each earthquake. Projections of maximum deviatoric deformation axes: top – elongation; bottom – shortening. The dip directions of the axes are shown by arrows: long – sub-horizontal elongation / shortening; short – vertical elongation / shortening.



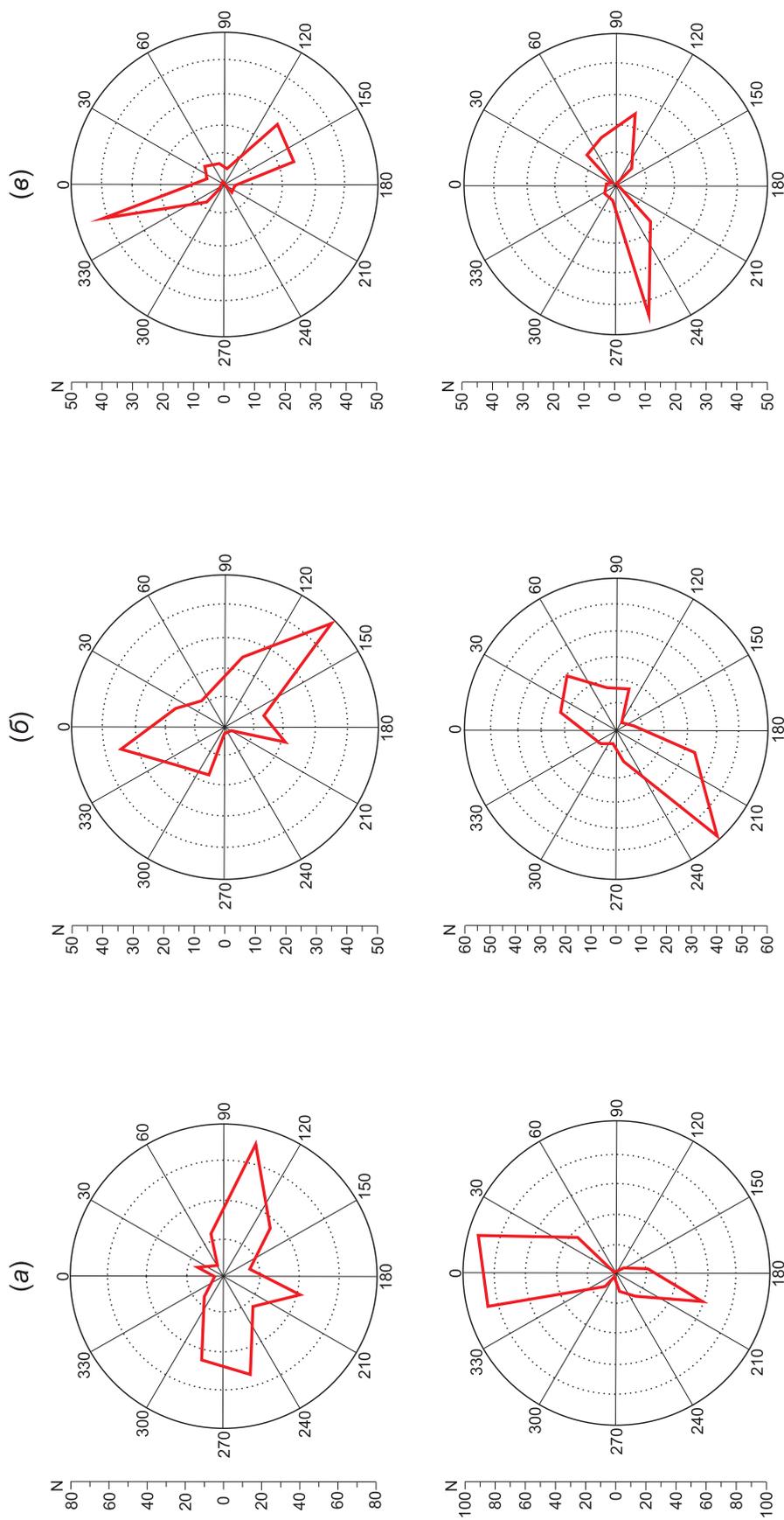
**Рис. 7.** Диаграммы распределения числа ячеек с различными значениями азимутов главных осей удлинения (верхняя строка) и главных осей укорочения (нижняя строка), полученных с учетом величины сейсмического момента каждого землетрясения. (a) – западная зона Центральной Азии ( $\varphi=25-55^\circ, \lambda=85-93^\circ$ ); (б) – территория расширенной субмеридиональной региональной границы Центральной Азии ( $\varphi=25-55^\circ, \lambda=93-105^\circ$ ); (с) – восточная часть Азии ( $\varphi=25-55^\circ, \lambda=105-115^\circ$ ).

**Fig. 7.** Diagrams of the distribution of the number of cells with different azimuths of elongation (top line) and the principal axes of shortening (bottom line), obtained with account of the magnitudes of seismic moment of each earthquake. (a) – western Central Asia ( $\varphi=25-55^\circ, \lambda=85-93^\circ$ ); (b) – extended submeridional regional boundary of Central Asia ( $\varphi=25-55^\circ, \lambda=93-105^\circ$ ); (c) – eastern Asia ( $\varphi=25-55^\circ, \lambda=105-115^\circ$ ).



**Рис. 8.** Диаграммы распределения числа ячеек с различными значениями азимутов главных осей удлинения (верхняя строка) и главных осей укорочения (нижняя строка), полученных без учета величины сейсмического момента каждого землетрясения. (а), (б) и (в) зоны определены аналогично рис. 7.

**Fig. 8.** Diagrams of the distribution of the number of cells with different azimuths of the principal axes of elongation (top line) and the principal axes of shortening (bottom line), obtained without taking into account the magnitude of seismic moment of each earthquake. (a), (б), and (в) – see Fig. 7 for the definition of the zones.



**Рис. 9.** Диаграммы распределения числа ячеек с различными значениями азимутов главных осей удлинения (верхняя строка) и главных осей укорочения (нижняя строка), полученных при выделении групп. (а), (б) и (с) – зоны определены аналогично рис. 7.

**Fig. 9.** Diagrams of the distribution of the number of cells with different azimuths of the principal axes of elongation (top line) and the principal axes of shortening (bottom line), obtained for the groups. (a), (б), and (в) – see Fig. 7 for the definition of the zones.

Результаты исследования показали, что зона изменения сейсмического режима и полоса разворота главных осей СТД явно коррелируют с субмеридионально вытянутой границей повышенных/пониженных скоростей в сейсмотомографической модели и с субмеридионально протяженным нисходящим потоком в верхней мантии (см. рис. 4, 6). Оси укорочения выстраиваются главным образом поперек нисходящих потоков верхнемантийной конвекции, а оси удлинения – вдоль них. При этом данное явление отчетливо наблюдается и в области вдоль 105-го градуса, где нисходящий поток имеет большую меридиональную протяженность (см. рис. 6).

По всей видимости, этот субмеридионально протяженный нисходящий поток в конвективной структуре верхней мантии региона, возникший в результате суперпозиции неоднородностей мощности литосферы, представляет собой преграду на пути распространения проявляющихся в сейсмическом режиме активных геодинамических процессов, вызванных коллизией.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Понимание механизмов взаимодействия глубинных и поверхностных тектонических процессов является чрезвычайно важным для разработки достоверных геодинамических моделей и оценки динамики сейсмической обстановки в будущем. Обобщающий анализ результатов, полученных в рамках разных методов в настоящей работе, в комплексе с другими доступными геолого-геофизическими данными для территории Центральной Азии подтверждает сделанные в наших предыдущих рабо-

тах выводы о значительном влиянии неоднородностей мощности литосферы на структуру конвективных течений в верхней мантии, которая, в свою очередь, специфически проявляется в характеристиках сейсмичности активных регионов. Заметим, что на основе распределения направленностей главных осей СТД, вероятно, можно делать выводы и о структуре конвективных потоков в верхней мантии сейсмически активных регионов.

Результаты исследования позволяют предположить, что природа субмеридиональной границы Центральной Азии, вероятно, заключается в суперпозиции неоднородностей мощности континентальной литосферы, которая влияет на структуру конвективных потоков в верхней мантии таким образом, что сформирован протяженный субмеридиональный нисходящий поток вдоль 105-го меридиана. Этот поток хорошо прослеживается в распределении направленностей главных осей СТД над ним, и его можно считать той самой преградой на пути распространения проявляющихся в сейсмическом режиме активных геодинамических процессов, вызванных коллизией. Кроме того, Северо- и Южно-Китайский кратоны в силу повышенной мощности и консолидированности своей литосферы являются слабосейсмичными, что вместе с геометрией нисходящего течения конвекции и может объяснять отсутствие сильнейших континентальных землетрясений к востоку от исследуемой трансрегиональной границы.

#### 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ (проект № 14-17-00430).

#### 6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Anderson D.A., Tannehill J.C., Pletcher R.H., 1990. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Mir, Moscow, 384 p. (in Russian) [Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: Мир, 1990. 384 с.].
- Bakirov A.B. (Ed.), 2006. The Earth's Crust and the Upper Mantle of the Tien Shan in Connection with Geodynamics and Seismicity. Ilim, Bishkek, 116 p. (in Russian) [Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью / Ред. А.Б. Бакиров. Бишкек: Илим, 2006. 116 с.].
- Bayasgalan A., Jackson J., McKenzie D., 2005. Lithosphere rheology and active tectonics in Mongolia: relations between earthquake source parameters, gravity and GPS measurements. *Geophysical Journal International* 163 (3), 1151–1179. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02764.x>.
- Bushenkova N.A., Deev E.V., Dyagilev G.S., Gibsher A.A., 2008. The upper mantle structure and Cenozoic volcanism of Central Mongolia. *Doklady Earth Sciences* 418 (1), 128–131. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08010285>.
- Bushenkova N., Kuchay O., Chervov V., 2014. Comparison of seismotomographic and thermogravitational models with distribution of the seismotectonic deformation orientations for southern Siberia area. *Geophysical Research Abstracts* 16, EGU2014-3452. Available from: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-3452.pdf>.
- Bushenkova N., Kuchay O., Chervov V., Koulakov I., 2016. Comparison of seismotomographic and thermogravitational models with distribution of the seismotectonic deformation orientations for Kamchatka region. *Geophysical*

- Research Abstracts 18, EGU2016-14860. Available from: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-14860.pdf>.
- Bushenkova N., Tychkov S.I., Koulakov I., 2002. Tomography on PP-P waves and its application for investigation of the upper mantle in central Siberia. *Tectonophysics* 358 (1–4), 57–76. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00417-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00417-1).
- Bushenkova N.A., Tychkov S.A., Kulakov I.Yu., 2003. Upper mantle structure beneath Central Siberia and neighboring regions, from PP-P tomography. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 44 (5), 453–468.
- Chervov V.V., 2002a. Numerical simulation of three-dimensional problems of convection in the Earth's mantle with application of vorticity and vector potential. *Computing Technology* 7 (1), 114–125 (in Russian) [Червов В.В. Численное моделирование трехмерных задач конвекции в мантии Земли с применением завихренности и векторного потенциала // *Вычислительные технологии*. 2002. Т. 7. № 1. С. 114–125].
- Chervov V.V., 2002b. Numerical simulation of three-dimensional problems of convection in the Earth's mantle with application of a sequence of meshes. *Computing Technology* 7 (3), 85–92 (in Russian) [Червов В.В. Численное моделирование трехмерных задач конвекции в мантии Земли с применением последовательности сеток // *Вычислительные технологии*. 2002. Т. 7. № 3. С. 85–92].
- Chervov V.V., Chernykh G.G., 2014. Numerical modeling of three-dimensional convection in the upper mantle of the Earth beneath Eurasia lithosphere. *Journal of Engineering Thermophysics* 23 (2), 105–111. <https://doi.org/10.1134/S1810232814020039>.
- Chervov V.V., Chernykh G.G., Bushenkova N.A., Koulakov I.Yu., 2014. Numerical simulation of three-dimensional convection in the upper mantle of the Earth under the lithosphere of Eurasia. *Computing technology* 19 (5), 101–114 (in Russian) [Червов В.В., Черных Г.Г., Бушенкова Н.А., Кулаков И.Ю. Численное моделирование трехмерной конвекции в верхней мантии Земли под литосферой Евразии // *Вычислительные технологии*. 2014. Т. 19. № 5. С. 101–114].
- Deng Q., Zhang P., Ran Y., Yang X., Min W., Chu Q., 2003. Basic characteristics of active tectonics of China. *Science in China Series D: Earth Sciences* 46 (4), 356–372. <https://doi.org/10.1360/03yd9032>.
- Gatinsky Yu.G., Prokhorova T.V., 2014. Superficial and deep structure of Central Asia as example of continental lithosphere heterogeneity. *Universal Journal of Geoscience* 2 (2), 43–52. <https://doi.org/10.13189/ujg.2014.020202>.
- Gatinsky Yu.G., Rundquist D.V., Vladova G.L., Prokhorova T.V., 2008. Block structure and geodynamics of the continental lithosphere at the plate boundaries. *Bulletin of Kamchatka Regional Association Education-Science Centre. Earth Sciences* (1) (in Russian) [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. № 1. С. 32–47].
- Gatinsky Yu.G., Vladova G.L., Prokhorova T.V., Rundquist D.V., 2011. Geodynamics of Central Asia and forecast of catastrophic earthquakes. *Space and Time* (3), 124–134 (in Russian) [Гатинский Ю.Г., Владова Г.Л., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В. Геодинамика Центральной Азии и прогноз катастрофических землетрясений // *Пространство и время*. 2011. № 3. С. 124–134].
- Gileva N.A., Mel'nikova V.I., Radziminovich N.A., Déverchère J., 2000. Location of earthquakes and average parameters of the crust in some areas of the Baikal region. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 41 (5), 629–636.
- Gol'din S.V., Kuchai O.A., 2007. Seismic strain in the Altai-Sayan active seismic area and elements of collisional geodynamics. *Russian Geology and Geophysics* 48 (7), 536–557. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.005>.
- Golenetsky S.I., 1977. Analysis of the epicentral field. Seismic activity. The focal depths of earthquakes of the Baikal region. In: V.P. Solonenko (Ed.), *Seismic zoning of Eastern Siberia and its geological and geophysical base*. Nauka, Novosibirsk, p. 163–184 (in Russian) [Голенецкий С.И. Анализ эпицентрального поля. Сейсмическая активность. Глубины очагов землетрясений Прибайкалья // Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1977. С. 163–184].
- Golenetsky S.I., 1990. The problem of studying the seismicity of the Baikal rift zone. In: N.A. Logachev (Ed.), *Geodynamics of intracontinental mountain regions*. Nauka, Novosibirsk, p. 228–235 (in Russian) [Голенецкий С.И. Проблема изучения сейсмичности Байкальского рифта // Геодинамика внутриконтинентальных горных областей / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука, 1990. С. 228–235].
- Gorbunova E.A., Sherman S.I., 2016. The probability of strong ( $M \geq 7.5$ ) earthquakes in fault zones of Central Asia (tectonophysical analysis). *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (2), 303–314 (in Russian) [Горбунова Е.А., Шерман С.И. Вероятность сильных ( $M \geq 7.5$ ) землетрясений в зонах разломов Центральной Азии (тектонофизический анализ) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Т. 7. № 2. С. 303–314]. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-2-0208>.
- Grachev A.F., Kalashnikova I.V., Magnitsky V.A., 1993. Up-to-date geodynamics and seismicity of China. *Fizika Zemli* (10), 3–13 (in Russian) [Грачев А.Ф., Калашникова И.В., Магницкий В.А. Современная и новейшая геодинамика и сейсмичность Китая // *Физика Земли*. 1993. № 10. С. 3–13].
- Gushchenko O.I., Stepanov V.V., Sim L.A., 1977. Direction of action of modern megaregional tectonic stresses of seismically regions of southern Eurasia. *Doklady AN SSSR* 234 (3), 556–559 (in Russian) [Гущенко О.И., Степанов В.В., Сим Л.А. Направление действия современных мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей юга Евразии // *Доклады АН СССР*. 1977. Т. 234. № 3. С. 556–559].
- Hatzfeld D., Molnar P., 2010. Comparisons of the kinematics and deep structures of the Zagros and Himalaya and of the Iranian and Tibetan plateaus and geodynamic implications. *Reviews of Geophysics* 48 (2), RG2005. <https://doi.org/10.1029/2009RG000304>.

- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R., 1995. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times. *Geophysical Journal International* 122 (1), 108–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x>.
- Kostrov B.V., 1975. Mechanics of Tectonic Earthquake. Nauka, Moscow, 174 p. (in Russian) [Костров Б.В. Механика тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 174 с.].
- Koulakov I., 2011. High-frequency P and S velocity anomalies in the upper mantle beneath Asia from inversion of worldwide traveltime data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 116 (B4), B04301. <https://doi.org/10.1029/2010JB007938>.
- Koulakov I., Bushenkova N., 2010. Upper mantle structure beneath the Siberian craton and surrounding areas based on regional tomographic inversion of P and PP travel times. *Tectonophysics* 486 (1–4), 81–100. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.02.011>.
- Koulakov I., Tychkov S., Bushenkova N., Vasilevskiy A., 2002. Structure and dynamics of the upper mantle beneath the Alpine-Himalayan orogenic belt from teleseismic tomography. *Tectonophysics* 358 (1–4), 77–96. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00417-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00417-1).
- Kozhevnikov V.M., Serezhkina A.I., Solovoi O.A., 2014. 3D mantle structure of Central Asia from Rayleigh wave group velocity dispersion. *Russian Geology and Geophysics* 55 (10), 1239–1247. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.09.010>.
- Kuchai O.A., Bushenkova N.A., 2009. Earthquake focal mechanisms in Central Asia. *Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical Mesomechanics)* 12 (1), 17–24 (in Russian) [Кучай О.А., Бушенкова Н.А. Механизмы очагов землетрясений Центральной Азии // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 1. С. 17–24].
- Kuchai O.A., Kozina M.E., 2015. Regional features of seismotectonic deformations in East Asia based on earthquake focal mechanisms and their use for geodynamic zoning. *Russian Geology and Geophysics* 56 (10), 1491–1499. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.011>.
- Kulakov I.Yu., 2008. Upper mantle structure beneath southern Siberia and Mongolia, from regional seismic tomography. *Russian Geology and Geophysics* 49 (3), 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.016>.
- Levi K.G., Sherman S.I. (Eds.), 2005. Topical Issues of Recent Geodynamics of Central Asia. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 297 p. (in Russian) [Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Ред. К.Г. Леви, С.И. Шерман. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005, 297 с.].
- Li S., Mooney W.D., Fan J., 2006. Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data. *Tectonophysics* 420 (1–2), 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.01.026>.
- Liu M., Yang Y., Shen Z., Wang S., Wang M., Wan Y., 2007. Active tectonics and intracontinental earthquakes in China: the kinematics and geodynamics. In: S. Stein, S. Mazzotti (Eds.), Continental intraplate earthquakes: science, hazard, and policy issues. Geological Society of America Special Paper, vol. 425, p. 299–318. [https://doi.org/10.1130/2007.2425\(19\)](https://doi.org/10.1130/2007.2425(19)).
- Lukk A.A., Yunga S.L., 1988. Geodynamics and Stress-Strain State of the Lithosphere in Central Asia. Donish, Dushanbe, 230 p. (in Russian) [Лукк А.А., Юнга С.Л. Геодинамика и напряженно-деформированное состояние литосферы Средней Азии. Душанбе: Дониш, 1988. 230 с.].
- Petit C., Fournier M., 2005. Present-day velocity and stress fields of the Amurian Plate from thin-shell finite-element modelling. *Geophysical Journal International* 160 (1), 357–369. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02486.x>.
- Petrov V.A., Anfu N., Smirnov V.B., Mostryukov A.O., Zhixiong L., Ponomarev A.V., Zaisen J., Xuhui S., 2008. Field of tectonic stresses from focal mechanisms of earthquakes and recent crustal movements from GPS measurements in China. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 44 (10), 846–855. <https://doi.org/10.1134/S1069351308100121>.
- Radziminovich N.A., Bayar G., Miroshnichenko A.I., Demberel S., Ulziibat M., Ganzorig D., Likhnev A.V., 2016. Focal mechanisms of earthquakes and stress field of the crust in Mongolia and its surroundings. *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (1), 23–38. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-1-0195>.
- Rebetsky Y.L., 2007. Tectonic Stresses and Strength of Mountain Ranges. Akademkniga, Moscow, 406 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ Академкнига. 2007. 406 с.].
- Rebetsky Y.L., Alekseev R.S., 2014. The field of recent tectonic stresses in Central and South-Eastern Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 257–290 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Алексеев Р.С. Поле современных тектонических напряжений Средней и Юго-Восточной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 1. С. 257–290]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0127>.
- Rebetsky Y.L., Kuchai O.A., Sycheva N.A., Tatevossian R.E., 2012. Development of inversion methods on fault slip data: stress state in orogenes of the Central Asia. *Tectonophysics* 581, 114–131 <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.027>.
- Riznichenko Yu.V., 1985. Problems of Seismology. Nauka, Moscow, 408 p. (in Russian) [Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М.: Наука, 1985. 408 с.].
- Sankov V.A., 2014. Recent geodynamics of intracontinental areas: instrumental and geomorphological assessment of crustal movements and deformation in Central Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 159–182 (in Russian) [Саньков В.А. Современная геодинамика внутриконтинентальных областей: инструментальные и геолого-геоморфологические оценки движений и деформаций земной коры Центральной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 1. С. 159–182]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0122>.
- Sherman S.I., 2014. Seismic Process and the Forecast of Earthquakes: Tectonophysical Conception. Academic Publishing House “Geo”, Novosibirsk, 359 p. (in Russian) [Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз

- землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2014. 359 с.].
- Sherman S.I., Ma Jin, Gorbunova E.A., 2015. Recent strong earthquakes in Central Asia: regular tectonophysical features of locations in the structure and geodynamics of the lithosphere. Part 1. Main geodynamic factors predetermining locations of strong earthquakes in the structure of the lithosphere in Central Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (4), 409–436. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0188>.
- Suvorov V.D., Tubanov Ts.A., 2008. Distribution of local earthquakes in the crust beneath central Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics* 49 (8), 611–620. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.09.019>.
- Teng J., Deng Y., Badal J., Zhang Y., 2014. Moho depth, seismicity and seismogenic structure in China mainland. *Tectonophysics* 627, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.008>.
- Teng J., Zeng R., Yan Y., Zhang H., 2003. Depth distribution of Moho and tectonic framework in eastern Asian continent and its adjacent ocean areas. *Science in China Series D: Earth Sciences* 46 (5), 428–446. <https://doi.org/10.1360/03yd9038>.
- Teng J., Zhang Z., Zhang X., Wang C., Gao R., Yang B., Qiao Y., Deng Y., 2013. Investigation of the Moho discontinuity beneath the Chinese mainland using deep seismic sounding profiles. *Tectonophysics* 609, 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.11.024>.
- Trifonov V.G., Soboleva O.V., Trifonov R.V., Vostrikov G.A., 2002. Recent Geodynamics of the Alpine-Himalayan collision belt. GEOS, Moscow, 225 p. (in Russian) [Трифонов В.Г., Соболева О.В., Трифонов Р.В., Востриков Г.А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. М.: ГЕОС, 2002. 225 с.].
- Tsibulchik I.D., 1966. About the depths of foci of earthquakes of the Altai-Sayan region. *Geologiya i Geofizika (Soviet Geology and Geophysics)* (5), 170–173 (in Russian) [Цибульчик И.Д. О глубинах очагов землетрясений Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1966. № 5. С. 170–173].
- Vladimirova N.N., Kuznetsov B.G., Yanenko N.N., 1966. Numerical calculation of the symmetric flow of a plate by a flat flow of a viscous incompressible fluid. In: G.I. Marchuk (Ed.), Some questions of computational and applied mathematics. Nauka, Novosibirsk, p. 186–192. (in Russian) [Владимирова Н.Н., Кузнецов Б.Г., Яненко Н.Н. Численный расчет симметричного обтекания пластинки плоским потоком вязкой несжимаемой жидкости // Некоторые вопросы вычислительной и прикладной математики / Ред. Г.И. Марчук. Новосибирск: Наука, 1966. С. 186–192].
- Yanenko N.N., 1967. Method of fractional steps for solving multidimensional problems of mathematical physics. Nauka, Novosibirsk, 194 p. (in Russian) [Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 1967. 194 с.].
- Yanovskaya T.B., Kozhevnikov V.M., 2003. 3D S-wave velocity pattern in the upper mantle beneath the continent of Asia from Rayleigh wave data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 138 (3–4), 263–278. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(03\)00154-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(03)00154-7).
- Yunga S.L., 1990. Methods and Results of Seismotectonic Deformation Studies. Nauka, Moscow, 191 p. (in Russian) [Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.].
- Zhang P.Z., Deng Q., Zhang G.M., Ma J., Gan W., Min W., Mao F., Wang Q., 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China. *Science in China Series D: Earth Sciences* 46 (Supplement 2), 13–24. <https://doi.org/10.1360/03dz0002>.
- Zheng G., Wang H., Wright T.J., Lou Y., Zhang R., Zhang W., Shi C., Huang J., Wei N., 2017. Crustal deformation in the India-Eurasia collision zone from 25 years of GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 122 (11), 9290–9312. <https://doi.org/10.1002/2017JB014465>.
- Zoback M.L., 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 97 (B8), 11703–11728. <https://doi.org/10.1029/92JB00132>.



**Наталья Анатольевна Бушенкова**, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

✉ e-mail: [BushenkovaNA@ipgg.sbras.ru](mailto:BushenkovaNA@ipgg.sbras.ru)

**Natalia A. Bushenkova**, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher

A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS

3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia



**Ольга Анатольевна Кучай**, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

e-mail: [KuchayOA@ipgg.nsc.ru](mailto:KuchayOA@ipgg.nsc.ru)

**Olga A. Kuchay**, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher  
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia



**Виктор Васильевич Червов**, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

e-mail: [ChervovVV@ipgg.sbras.ru](mailto:ChervovVV@ipgg.sbras.ru), [elixirexp@yandex.ru](mailto:elixirexp@yandex.ru)

**Victor V. Chervov**, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher  
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS  
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia