

## СТРУКТУРА И ДИНАМИКА МАНТИИ ПОД ВОСТОЧНОЙ РОССИЕЙ И ПРИЛЕГАЮЩИМИ РЕГИОНАМИ

Дапэнг Жао, Франко Пирайно\*, Люси Лиу

*Department of Geophysics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan*

*\* Geological Survey of Western Australia, East Perth WA 6004, Australia*

Представлены сейсмические изображения мантии под Восточной Россией и прилегающими территориями, а также обсуждаются геодинамические следствия. Результаты мантийной томографии показывают, что поддвигаемый Тихоокеанский слэб становится практически неподвижным в переходной зоне мантии под Западной Аляской, Беринговым, Охотским, Японским морями и Северо-Восточной Азией. В этих областях существует множество внутриплитных вулканов, локализующихся над зонами низких скоростей в верхней мантии поверх стагнирующего слэба, что позволяет предположить наличие связи между внутриплитными вулканами и динамическими процессами в пределах крупного мантийного клина над застойным слэбом и его глубинную дегидратацию. Телесеismicкая томография выявила зону низких скоростей, протягивающуюся до глубины 660 км под Байкальской рифтовой зоной, которая может представлять собой мантийный плюм. Глубины основания сейсмической зоны Вадати—Беньоффа и самого Тихоокеанского слэба уменьшаются в северном направлении под п-овом Камчатка, а слэб исчезает под северной оконечностью Камчатки. Считается, что причиной исчезновения слэба является существование трения между слэбом и окружающей астеносферой, поскольку Тихоокеанская плита поворачивалась по часовой стрелке примерно 30 млн л.н., а затем этот процесс усилился вследствие захвата края слэба горячим астеносферным потоком и наличия подводных гор Мейджи.

*Томография мантии; внутриплитные вулканы, испытывающие субдукцию плиты; мантия, переходная зона; крупный мантийный клин; мантийные плюмы.*

### MANTLE STRUCTURE AND DYNAMICS UNDER EAST RUSSIA AND ADJACENT REGIONS

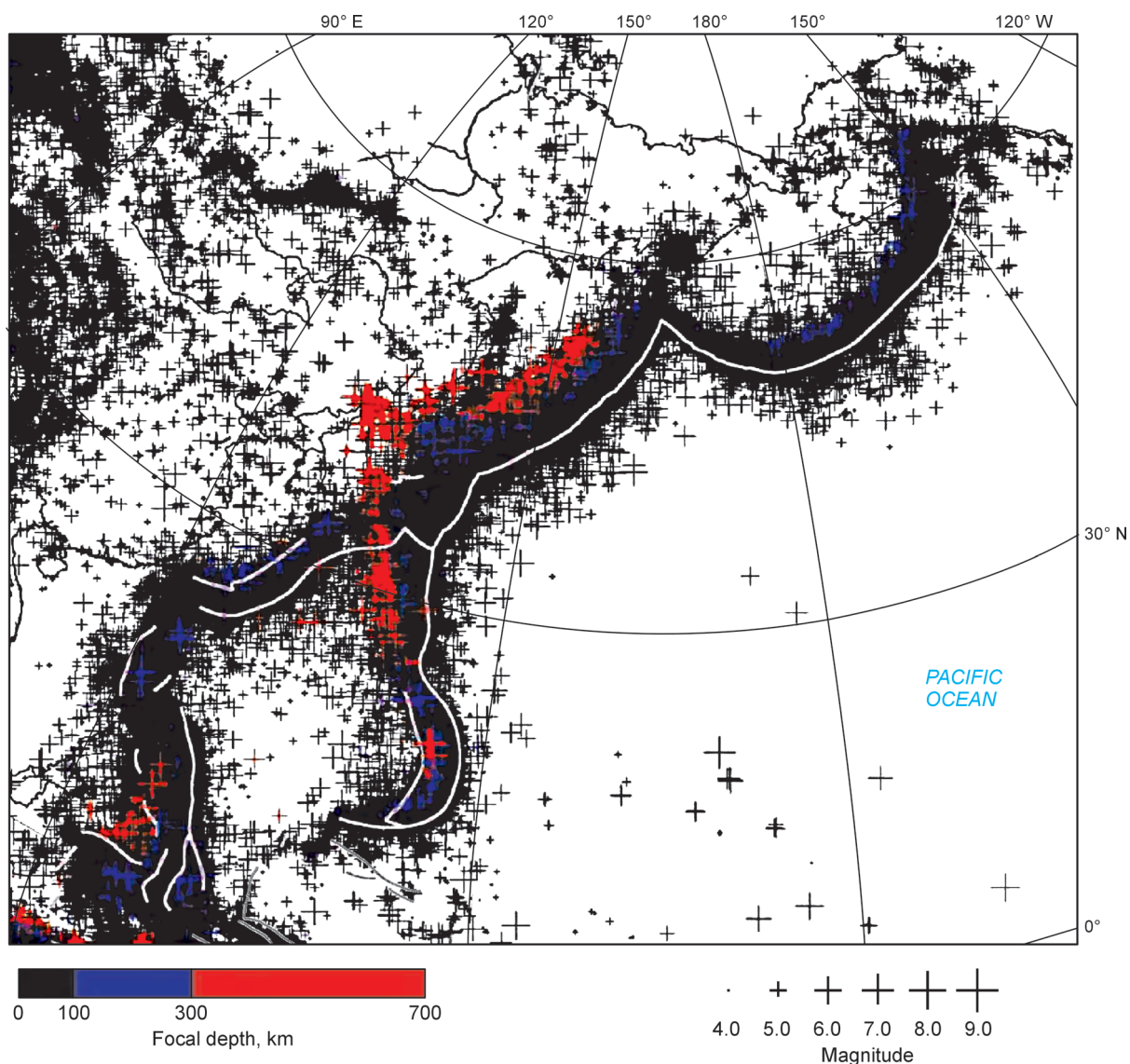
Dapeng Zhao, Franco Pirajno and Lucy Liu

We present seismic images of the mantle beneath East Russia and adjacent regions and discuss geodynamic implications. Our mantle tomography shows that the subducting Pacific slab becomes stagnant in the mantle transition zone under Western Alaska, the Bering Sea, Sea of Okhotsk, Japan Sea, and Northeast Asia. Many intraplate volcanoes exist in these areas, which are located above the low-velocity zones in the upper mantle above the stagnant slab, suggesting that the intraplate volcanoes are related to the dynamic processes in the big mantle wedge above the stagnant slab and the deep slab dehydration. Teleseismic tomography revealed a low-velocity zone extending down to 660 km depth beneath the Baikal rift zone, which may represent a mantle plume. The bottom depths of the Wadati—Benioff deep seismic zone and the Pacific slab itself become shallower toward the north under the Kamchatka Peninsula, and the slab disappears under the northernmost Kamchatka. The slab loss is considered to be caused by the friction between the slab and the surrounding asthenosphere as the Pacific plate rotated clockwise at about 30 Ma ago, and then the slab loss was enlarged by the slab-edge pinch-off by the hot asthenospheric flow and the presence of Meiji seamounts.

*Mantle tomography, intraplate volcanoes, subducting slabs, mantle transition zone, big mantle wedge, mantle plumes*

### ВВЕДЕНИЕ

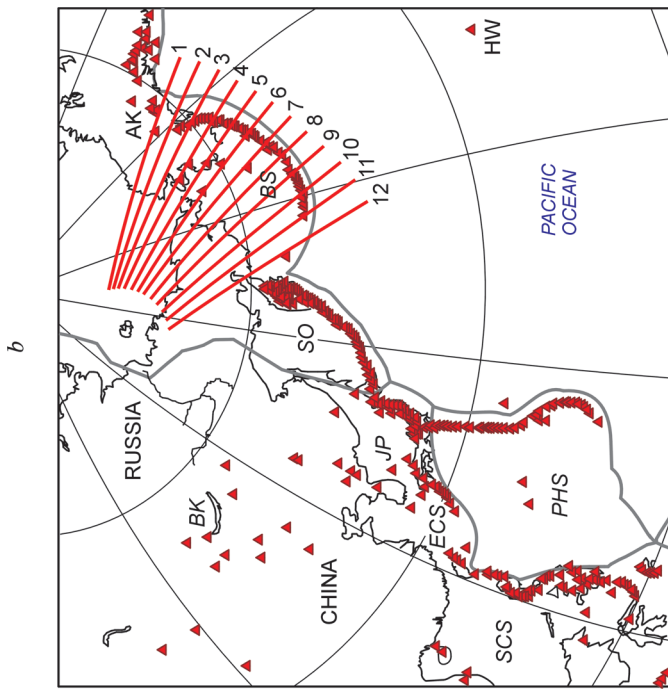
Главные тектонические особенности территории Восточной России и прилегающих регионов определяются активной субдукцией Тихоокеанской плиты в северо-западном направлении из зон Алеутского, Курильского и Японского желобов, вызванной открытием окраинных морей, таких как Берингово, Охотское и Японское, а также сильной сейсмической и вулканической активностью. Большинство землетрясений в этом регионе относится к надвиговому типу. Они происходят в зоне меганадвиги между поддвигаемой Тихоокеанской плитой и перекрывающимися ее континентальными плитами, а многие землетрясения — в областях внешних поднятий в пределах Тихоокеанской плиты перед ее субдукцией, а также в дуговых и задуговых областях в пределах перекрывающих плит (рис. 1). Средне- и глубоководные землетрясения активно проявляются в погружающемся Тихоокеанском слэбе. Большинство активных вулканов в этом регионе сосредоточено на Алеутской, Курильской и Японской дугах, при этом известны также несколько кайнозойских вулканов в задуговых областях и в континентальных районах, значительно удаленных от желобов [Simkin, Siebert, 1994] (рис. 2).



**Рис. 1.** Данные по распределению землетрясений ( $M > 4.0$ ) в восточной части России и прилегающих регионах, скомпилированные Международным сейсмологическим центром за 1964—2006 гг. и Национальным информационным центром по землетрясениям (Геологическая служба США) за 2007—2009 гг.

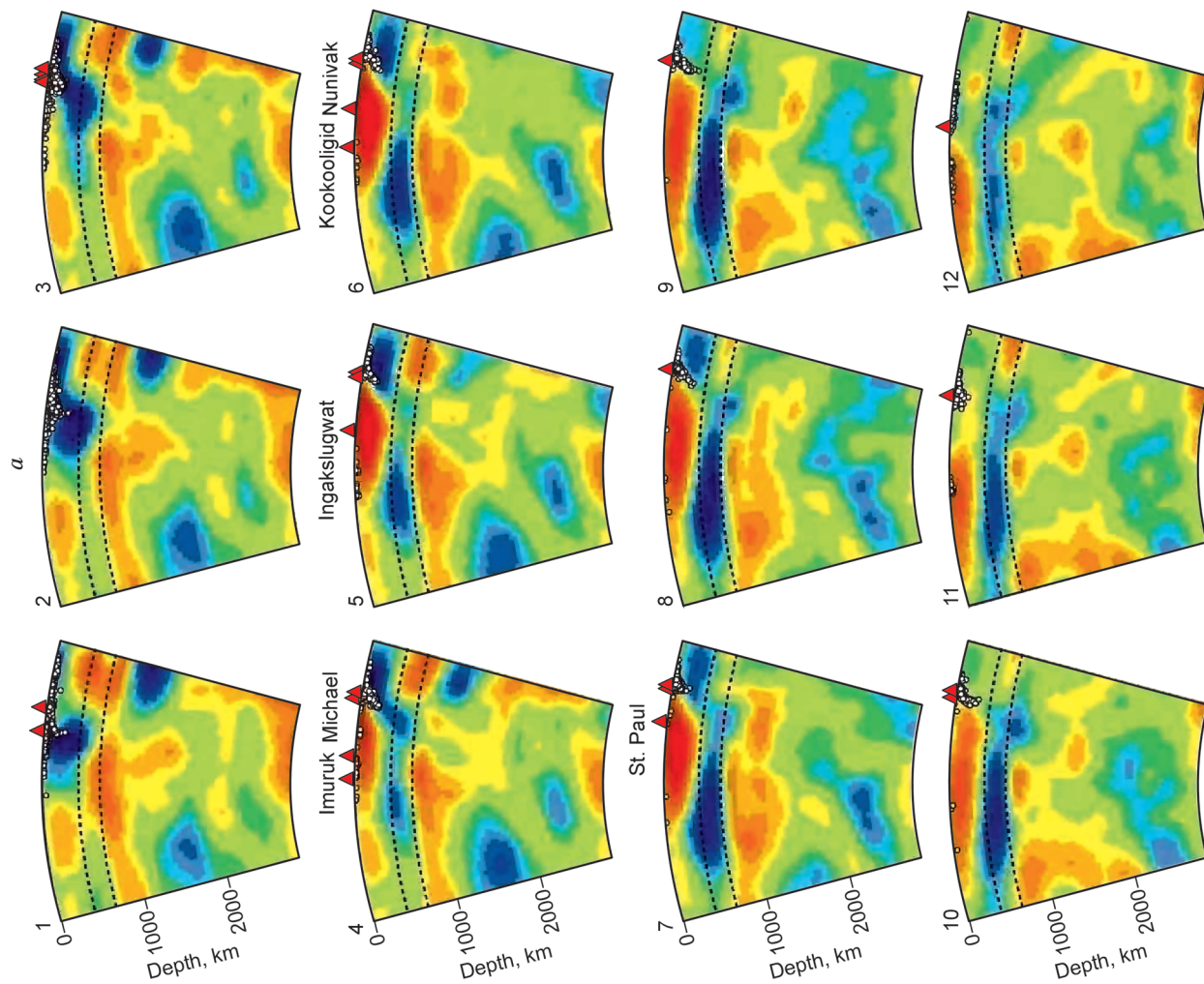
Черные, синие и красные крестики обозначают землетрясения с глубинами фокуса 0—100, 100—300 и 300—700 км соответственно.

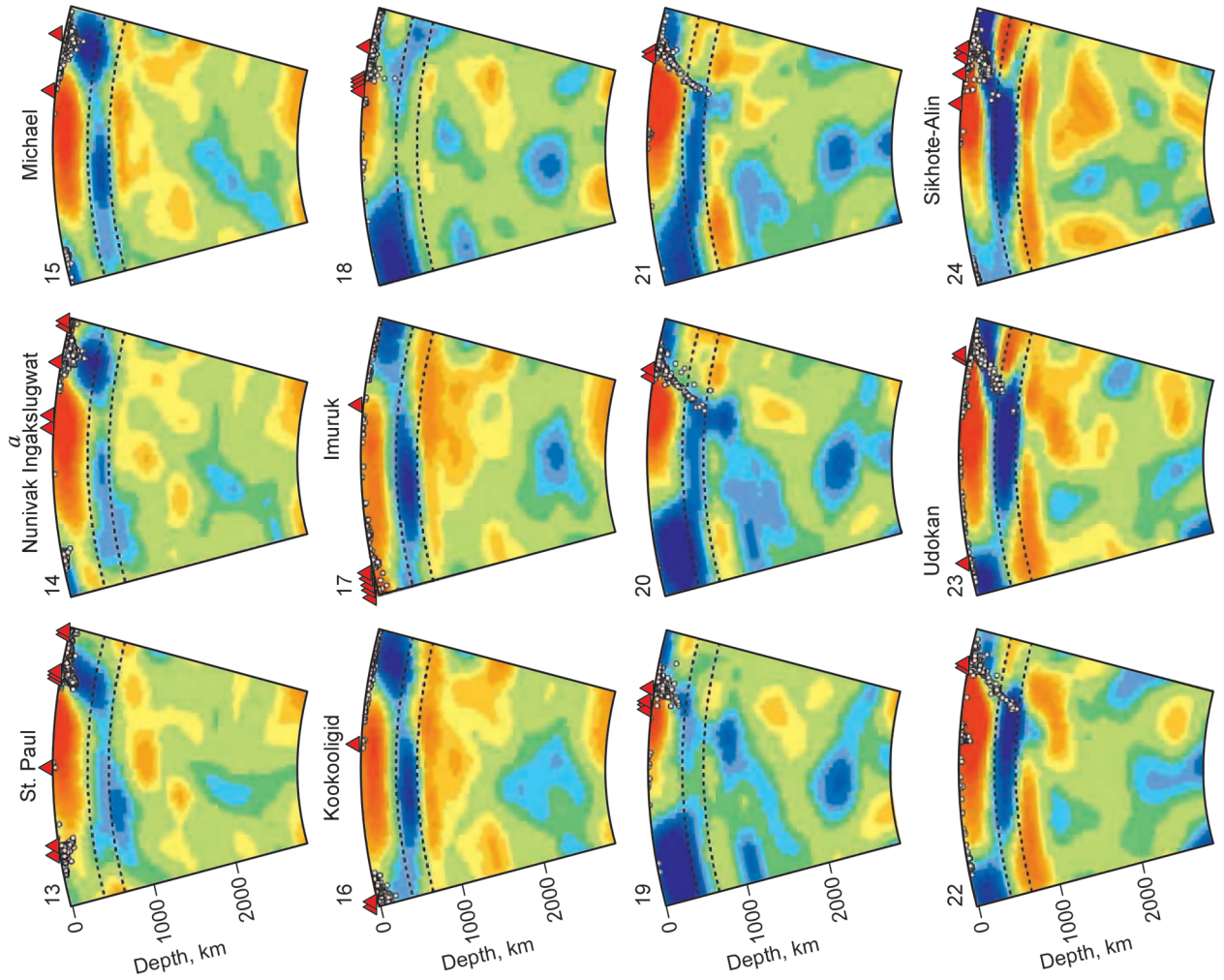
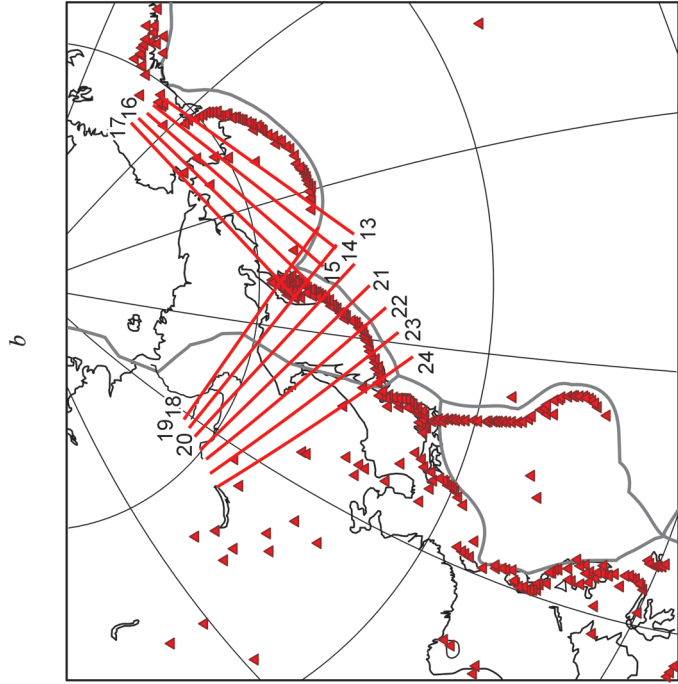
Для выяснения особенностей сеймотектоники, вулканизма и динамики мантии в этом обширном и сложном в тектоническом плане регионе важно определить детальную 3-мерную (3-D) структуру коры и мантии под этим регионом. Сейсмическая томография является наиболее мощным средством картирования 3-мерной гетерогенной структуры недр Земли и источником ключевой информации, которая значительно усовершенствовала наши представления о различных тектонических особенностях Земли и Луны [Zhao et al., 2008; Hasegawa et al., 2009; Zhao, 2009]. Для выполнения сейсотомографии высокого разрешения необходима плотная сеть сейсмических станций, однако в Восточной России и смежных регионах покрытие сеймостанциями очень низкое за исключением нескольких областей: Южной Аляски, п-ова Камчатка и Японских островов, где получены томограммы коры и верхней мантии более высокого качества. Для обширного региона в пределах территории Восточной России и вокруг нее мы должны опираться на глобальную томографию, обеспечивающую получение информации о характеристиках структуры мантии крупного масштаба.



**Рис. 2. Вертикальные разрезы мантии в виде томограмм в продольных волнах вдоль профилей (а), показанных на карте-врезке (b), вертикальный разрез мантии под Восточной Азией в направлении восток—запад в виде регионального томографического изображения в продольных волнах [Huang, Zhao, 2006] (с).**

а, с — красный и синий цвета — соответственно низкие и высокие скорости распространения сейсмических волн, максимальная амплитуда аномалий скорости составляет: а — 1%, с — 2%. Белые кружки — землетрясения, которые произошли в пределах 100 км от профиля, красные треугольники — активные вулканы. Штриховыми линиями показаны границы скачкообразного изменения сейсмических свойств на глубинах 410 и 670 км. b — тонкие красные линии на карте-врезке показывают границы плит. АК — Аляска, BK — оз. Байкал, BS — Берингово, ECS — Восточно-Китайское море, HW — Гавайские острова, JP — Японское, PHS — Филиппинское, SCS — Южно-Китайское, SO — Охотское море. Профили № 13—17 проходят через Берингово море, № 18—24 — через Охотское море, № 25—36 — через Японские острова, Японское море и Восточную Азию.





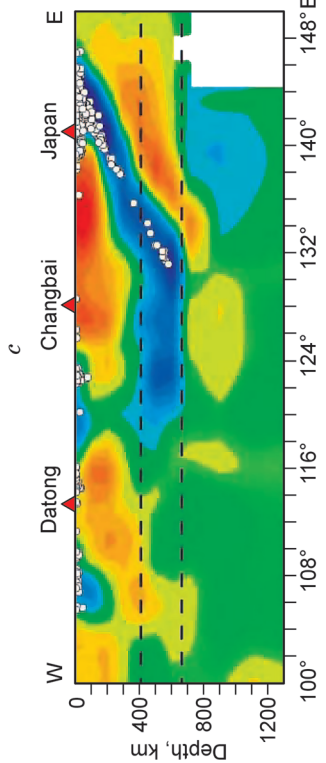
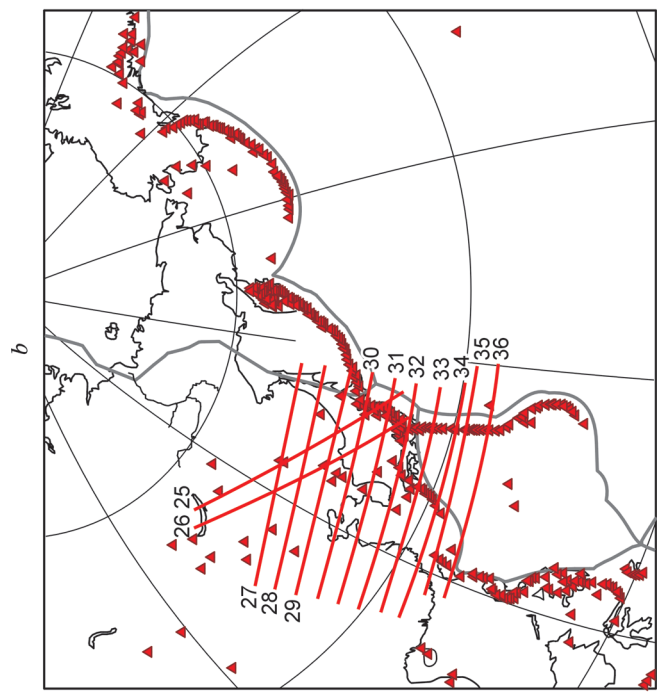
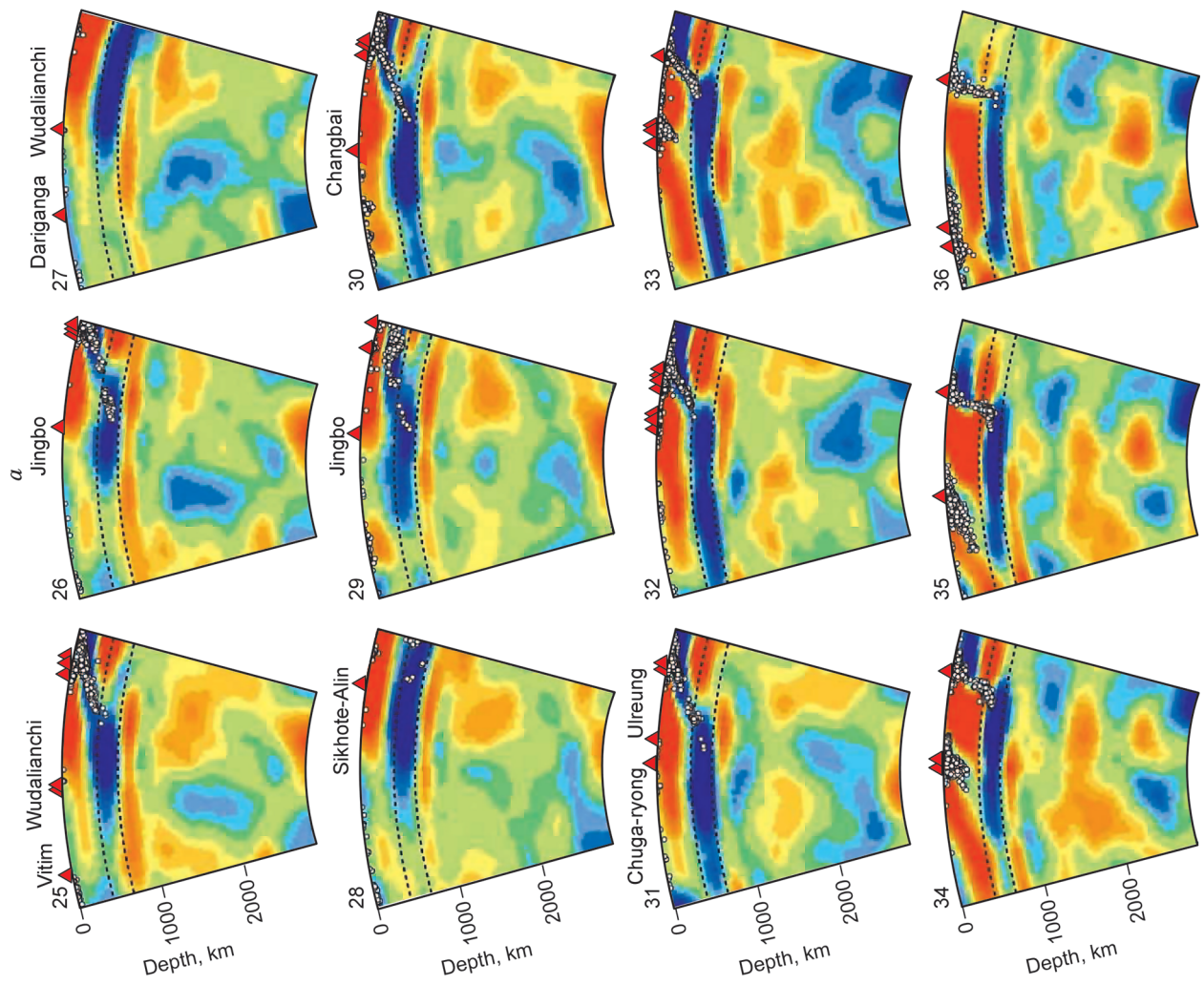


Рис. 2. Окончание.

В статье представлены томограммы всей мантии под северной и западной частями Тихого океана, а также региональные томограммы высокого разрешения для верхней мантии под Байкальской рифтовой зоной, п-овом Камчатка с последующим обсуждением вулканизма, сейсмотектоники, динамики мантии в этой обширной и важной тектонической обстановке, которая может улучшить наши представления о динамической эволюции континентов, субдукции плит и внутриплитных рифтовых зонах.

## ТОМОГРАФИЯ МАНТИИ

Д. Жао [Zhao, 2009] применил метод гибкой сетки для обработки свыше миллиона записей о временах вступления сейсмических волн пяти видов ( $P$ ,  $pP$ ,  $PP$ ,  $PcP$  и  $P_{dip}$ ), порожденных приблизительно 10 тыс. произошедших на Земле землетрясений, зарегистрированных всеми сейсмическими станциями мира. В итоге он получил обновленную глобальную томографию всей коры и мантии. По сравнению с предыдущими томографическими моделями [Zhao, 2001, 2004] новая модель имеет лучшее разрешение для полярных регионов [Zhao, 2009], что позволяет обсуждать структуру мантии и динамику в приарктических областях. На рис. 2 показаны 36 вертикальных томографических разрезов в продольных волнах от поверхности до границы ядро—мантия (СМВ) (глубина 2889 км) под Аляской, Беринговым, Охотским, Японским морями, Восточной Азией и Сибирью, построенных на основе новой томографической модели [Zhao, 2009]. На томографических изображениях также показаны активные вулканы и сейсмичность вблизи каждого разреза.

**Регион Аляска—Алеутские острова.** Субдуцируемый Тихоокеанский слэб четко отображается в виде высокоскоростной зоны в верхней мантии под Южной Аляской и восточной ветвью Алеутской дуги, где землетрясения происходят на глубине 200—300 км (см. рис. 2). Активные островодужные вулканы располагаются над слэбом. Локальная высокоразрешающая томография показала, что субдуцируемый Тихоокеанский слэб имеет мощность 50—70 км, и в верхнемантийном клине под активными вулканами островных дуг существуют низкоскоростные аномалии [Zhao et al., 1995; Qi et al., 2007]. Глобальная томографическая модель характеризуется более низким разрешением по сравнению с локальной томографией, поэтому слэб изображается в виде более широкой наклонной зоны (см. рис. 2).

На западе Аляски и в восточной части Берингова моря находятся несколько кайнозойских вулканов, часть которых испытывала извержение за последние 10 тыс. лет [Simkin, Siebert, 1994; Mukasa et al., 2007]. В верхней мантии под этими внутриплитными вулканами существуют низкоскоростные аномалии (см. рис. 2). В переходной зоне мантии (ПЗМ) наблюдаются высокоскоростные аномалии, последние представляют остановившийся в ПЗМ Тихоокеанский слэб, аналогично ситуации с мантией, наблюдаемой под Восточным Китаем [Zhao, 2004; Huang, Zhao, 2006; Zhao et al., 2009]. Под западной частью Алеутской дуги Тихоокеанская плита не поддвигается под Берингово море, и граница между Тихоокеанской и Северо-Американской плитами фактически становится трансформным разломом сдвигового типа (разлом Беринга), поэтому в этом районе не происходят среднеглубинные и глубинные землетрясения и здесь не наблюдается слэб в верхней мантии, характеризующийся высокими скоростями распространения сейсмических волн (см. рис. 2, № 12). Однако в ПЗМ существует высокоскоростная зона под западной частью Берингова моря (см. рис. 2, № 11, 12), которая может представлять старый Тихоокеанский слэб или слэб Фараллон, застрявший в ПЗМ, и отделяющийся от современной Тихоокеанской плиты. Эти особенности также наблюдаются в поперечных разрезах, параллельных Алеутскому желобу (см. рис. 2, № 13—17).

**Курило-Охотский регион.** Погружающийся Тихоокеанский слэб отчетливо наблюдается в верхней мантии под п-овом Камчатка и Курильской дугой, при этом в высокоскоростном Тихоокеанском слэбе активно происходят среднеглубинные и глубинные землетрясения, формируя отчетливую глубинную сейсмическую зону Вадати—Беньоффа (см. рис. 2, № 18—24). Активные дуговые вулканы локализируются над восточным краем крупной зоны низких скоростей в верхней мантии. Неподвижный слэб в ПЗМ наблюдается под Курильской дугой (см. рис. 2, № 20—24), но не фиксируется под Камчаткой (см. рис. 2, № 18, 19). Высокоскоростные аномалии непрерывно протягиваются в нижнюю мантию под Южной Камчаткой и Северным Китаем (см. рис. 2, № 19—21); это позволяет предположить, что часть Тихоокеанского слэба в ходе субдукции достигла нижней мантии, а другая часть осталась в пределах ПЗМ. Под южной частью Курильской дуги Тихоокеанский слэб, по-видимому, полностью остановился в ПЗМ (см. рис. 2, № 22—24). Следует отметить, что угол наклона глубинной сейсмической зоны Вадати—Беньоффа постепенно уменьшается в направлении с севера на юг под Курильской дугой, т.е. он составляет 45—50° под Южной Камчаткой и около 30° под Хоккайдо в Северной Японии (см. рис. 2, № 20—24).

**Японская дуга—Восточный Китай.** Модель глобальной томографии имеет лучшее разрешение под Японскими островами и под территорией Восточной Азии благодаря большому количеству установленных там сейсмостанций и, соответственно, значительно большому количеству регистрируемых сейсмических волн, более детально зондирующих мантию [Zhao, 2009]. Поэтому Тихоокеанский слэб на

томографических изображениях проявляется более четко под Восточной Азией по сравнению с северными регионами (см. рис. 2). Тихоокеанская плита, испытывающая субдукцию в Японском желобе, отчетливо проявляется в верхней мантии с четкой фиксацией глубинной сейсмической зоны Вадати—Беньоффа в пределах слэба. Тихоокеанский слэб становится неподвижным в ПЗМ под Восточной Азией. Слэб и глубинная сейсмическая зона имеют пологий, около 30°, угол наклона под Японской дугой и под тыловой дугой (см. рис. 2, № 25—33), тогда как под областью Изу-Мариана они приобретают крутой наклон и становятся почти вертикальными. Под дугой Рюкю и тыловой дугой в верхней мантии также фиксируется испытывающий субдукцию слэб Филиппинского моря (см. рис. 2, № 33—36).

В Восточно-Азиатском регионе существует множество внутриплитных вулканов, например, Вудалианчи, Джингбо, Чангбай, Сихотэ-Алинь, Улреунг и др. [Simkin, Siebert, 1994]. Под этими вулканами в верхней мантии над застоявшимся в ПЗМ слэбом существуют заметные низкоскоростные аномалии (см. рис. 2, *a*). Неподвижный слэб и структура верхней мантии под внутриплитными вулканами в Восточной Азии лучше всего проявляются при использовании высокоразрешающей локальной и региональной томографии [Huang, Zhao, 2006; Zhao et al., 2009] (см. рис. 2, *c*). Взаимосвязь между стагнирующим слэбом и внутриплитными вулканами обсуждается ниже.

В нижней мантии вплоть до ГКМ наблюдаются значительные высокоскоростные аномалии (см. рис. 2, *a*), которые представляют фрагменты материала слэба, оседающие до ГКМ [Miyuama, 1994; Zhao, 2004]. В нижней мантии также существуют низкоскоростные аномалии, они могут представлять собой поднимающиеся возвратные потоки, вызванные оседанием материала слэба.

### МАНТИЙНЫЙ АПВЕЛЛИНГ ПОД БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНОЙ

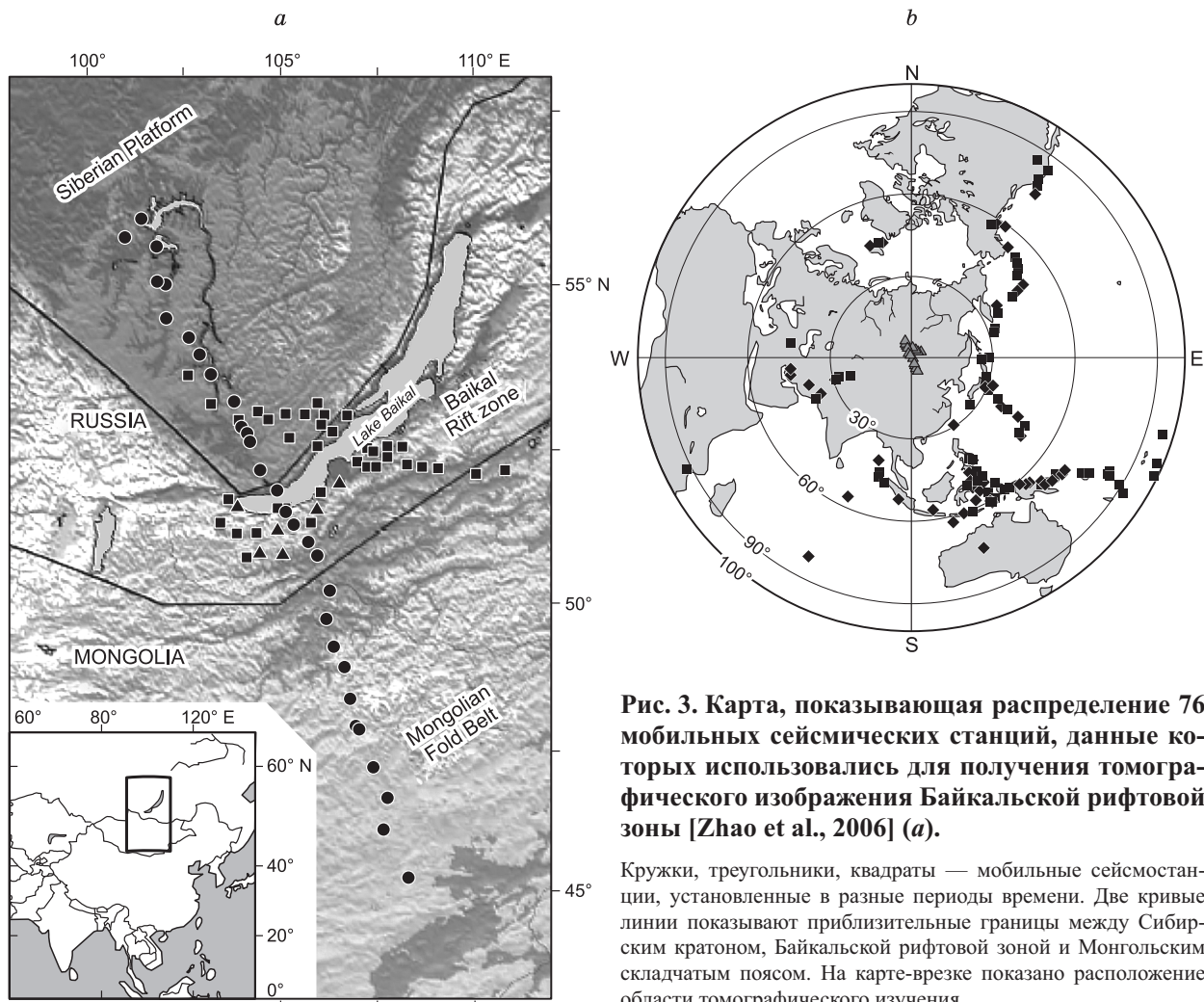
Байкальская рифтовая зона состоит из разветвленной цепи позднекайнозойских полуграбенов и протягивается по территории Сибири на расстояние около 1500 км (рис. 3, *a*). Она располагается на границе Сибирской платформы (кратона) на северо-западе и Монгольского складчатого пояса на юго-востоке. Озеро Байкал занимает всего около одной трети рифтовой зоны. Оно является самым глубоким озером в мире (1620 м) и содержит 20 % мировых запасов пресной воды. Байкальская рифтовая зона характеризуется высоким уровнем поверхностного теплового потока, нормальными сбросами на флангах и пониженными скоростями в верхней мантии [Gao et al., 2003; Zorin et al., 2003]. Протягивающаяся на 1500 км кулисообразная система рифтовых депрессий является самым сейсмически-активным континентальным рифтом в мире. За последние 300 лет в пределах этой области произошло 13 землетрясений с магнитудой более 6.5 [Doser, 1991]. Байкальский рифт располагается на расстоянии более 2000 км от ближайшей активной границы плит и поэтому хорошо подходит для изучения процессов внутриконтинентального рифтинга.

Д. Жао с соавторами [Zhao et al., 2006] получили томографическое изображение мантии в продольных волнах до глубины 700 км под Байкальской рифтовой зоной с помощью метода телесеismicкой томографии, примененного для обработки 1782 высококачественных записей о временах вступления. Эти записи сняты с оригинальных сейсмограмм 142 телесеismicких событий (см. рис. 3, *b*), зарегистрированных 76 портативными сейсмостанциями, которые были развернуты в пределах и вокруг оз. Байкал (см. рис. 3, *a*). 1782 волновых траектории были приурочены к перекрестному волноводу в верхней мантии под Байкальской рифтовой зоной (рис. 4, *a—c*), что обусловило получение надежного томографического изображения под этим регионом. На нем видны выступающая низкоскоростная аномалия под Байкальской рифтовой зоной, которая протягивается до глубины 600 км, а также высокоскоростные аномалии в литосфере под Сибирским кратоном (см. рис. 4, *d*). Этот результат в целом согласуется с литосферными и астеносферными характеристиками, выявленными в этом регионе другими геофизическими исследованиями [Achauer, Masson, 2002; Gao et al., 2003; Liu, Gao, 2006; Яковлев и др., 2007; Кулаков, 2008; Tiberi et al., 2008].

Низкоскоростная аномалия в верхней мантии под оз. Байкал (см. рис. 4, *d*) интерпретируется как мантийный апвеллинг (плюм), который играл важную роль в зарождении и эволюции Байкальской рифтовой зоны и развитии кайнозойского вулканизма в районе озера. Формирование рифта могло контролироваться и другими факторами, например, более древними (предрифтовыми) линейными литосферными структурами, расположенными подходящим образом относительно направления апвеллинга, а также благоприятной ориентировкой дальнедействующих напряжений, вызванных Индо-Азиатской коллизией [Zhao et al., 2006].

### КРАЕВАЯ ЧАСТЬ ТИХООКЕАНСКОЙ ПЛИТЫ ПОД КАМЧАТКОЙ

Полуостров Камчатка располагается на северо-западной окраине Тихоокеанской плиты (рис. 5, *a*). Плита мелового возраста погружается под Камчатскую дугу и движется вдоль Берингова разлома сбросо-сдвигового типа со скоростью от 7.7 см/год на 55° с.ш. до 8.3 см/год на 47° с.ш. [DeMets et al., 1990;



**Рис. 3. Карта, показывающая распределение 76 мобильных сейсмических станций, данные которых использовались для получения томографического изображения Байкальской рифтовой зоны [Zhao et al., 2006] (a).**

Кружки, треугольники, квадраты — мобильные сейсмостанции, установленные в разные периоды времени. Две кривые линии показывают приблизительные границы между Сибирским кратоном, Байкальской рифтовой зоной и Монгольским складчатым поясом. На карте-врезке показано расположение области томографического изучения.

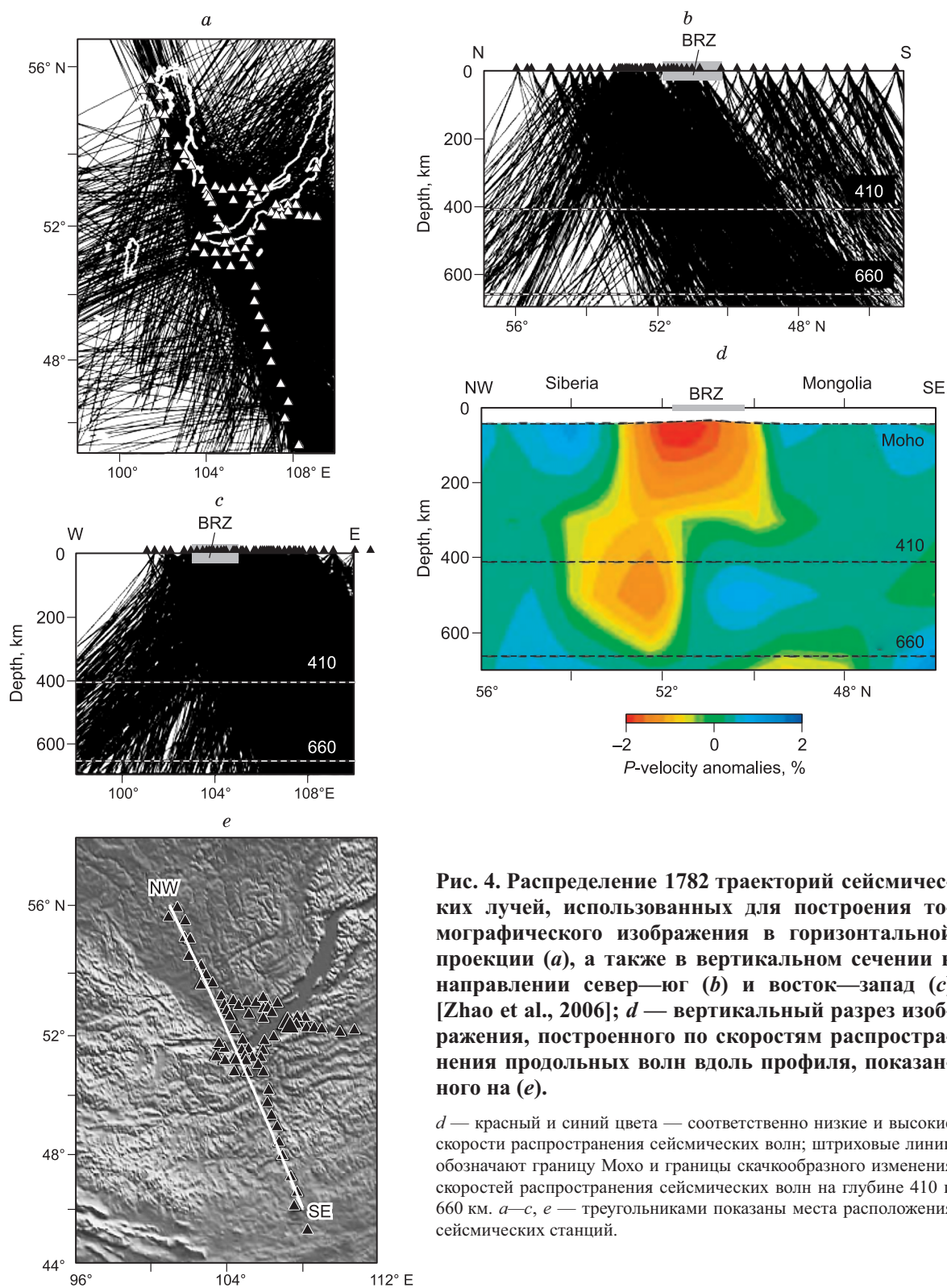
**b — положения эпицентров 142 телесеизмических событий, использованных для построения томографического изображения.**

Квадратами, ромбами показаны события, записанные в разные периоды времени. Серые треугольники обозначают мобильные сейсмостанции, показанные на a.

Steblov et al., 2003]. Геологические исследования показали, что вулканизм и конвергенция на Камчатке практически прекратились около 55 млн л.н., но вновь возобновились приблизительно 30 млн л.н. [Watson, Fujita, 1985]. Около 10 млн л.н. островодужный магматизм был распространен к северу от Алеутско-Камчатского сочленения вдоль Срединно-Камчатского вулканического пояса, но к настоящему времени он практически затух [Honthaas et al., 1995]. Под цепью активных вулканов голоценового возраста, протягивающейся вдоль восточного побережья Камчатки, на глубине около 100 км прослеживается контур погружающегося Тихоокеанского слэба [Gorbatov et al., 1997]. Вулканы Швелуч и Ключевской оказались сдвинутыми к северо-западу от вулканического фронта. Между 54° и 55° с.ш. подводные горы Мейджи, представляющие самый северный сегмент Гавайско-Императорской цепи подводных гор, входят в Камчатский желоб (см. рис. 7, a). Конфигурация Тихоокеанского слэба под территорией Камчатки изучалась с привлечением данных по распределению среднеглубинных и глубинных землетрясений в пределах слэба, показавших, что угол падения слэба уменьшается к северу приблизительно от 55° до 35° [Gorbatov et al., 1997]. Максимальная глубина (фокусов) землетрясений снижается вдоль зоны субдукции от ~600 км под Южной Камчаткой до ~100—200 км вблизи сочленения [Davaille, Lees, 2004].

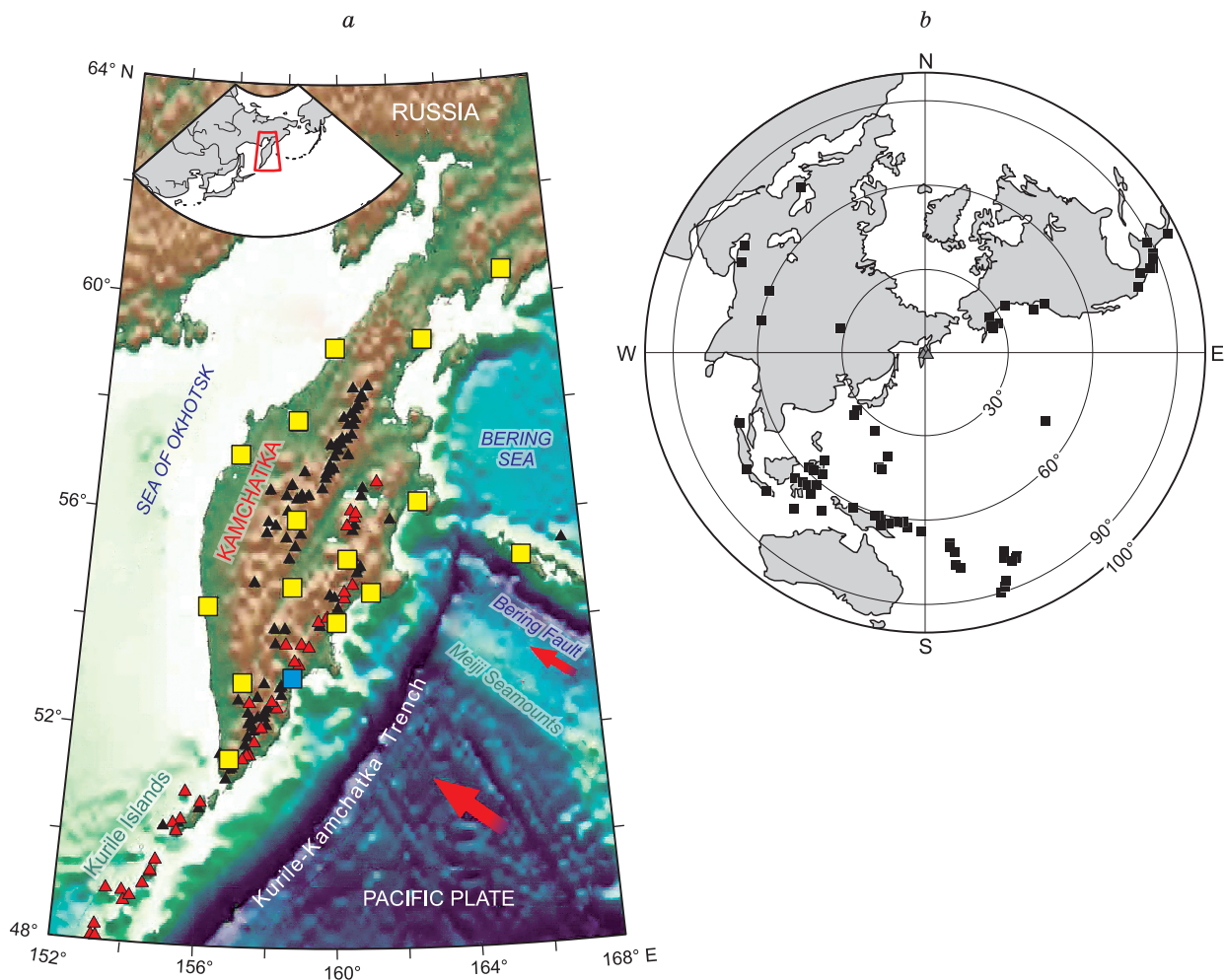
К настоящему времени было проведено несколько томографических исследований района п-ова Камчатка. А. Горбатов с соавторами [Gorbatov et al., 1999] применили томографический метод, описанный в работе [Zhao et al., 1992], для изучения 3-мерной структуры распределения скоростей продольных сейсмических волн до глубины 200 км, и их результаты показали заметную низкоскоростную аномалию





**Рис. 4.** Распределение 1782 траекторий сейсмических лучей, использованных для построения томографического изображения в горизонтальной проекции (а), а также в вертикальном сечении в направлении север—юг (b) и восток—запад (с) [Zhao et al., 2006]; d — вертикальный разрез изображения, построенного по скоростям распространения продольных волн вдоль профиля, показанного на (e).

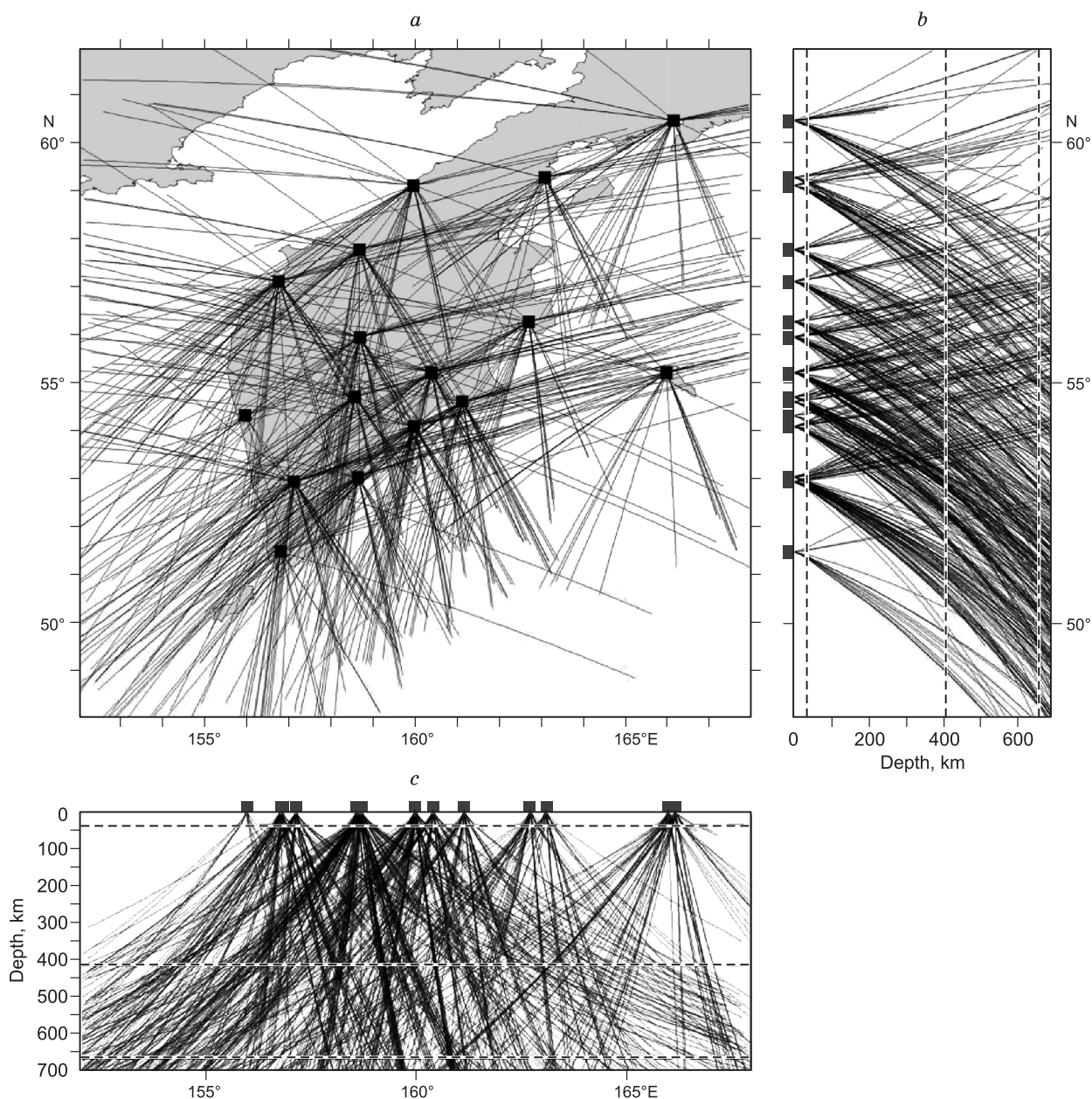
d — красный и синий цвета — соответственно низкие и высокие скорости распространения сейсмических волн; штриховые линии обозначают границу Мохо и границы скачкообразного изменения скоростей распространения сейсмических волн на глубине 410 и 660 км. a—c, e — треугольниками показаны места расположения сейсмических станций.



**Рис. 5.** Карта района п-ова Камчатка [Jiang et al., 2009] (a): положение эпицентров 75 телесеismicких событий (квадраты), использованных для построения томографического изображения (b).

a — желтые квадраты показывают положение 15 мобильных сейсмических станций; синий квадрат обозначает стационарную сейсмостанцию; красные стрелки показывают направление движения Тихоокеанской плиты, испытывающей субдукцию вдоль Курило-Камчатского желоба и поперечное движение вдоль разлома Беринга; красные и черные треугольники представляют соответственно активные и недействующие вулканы. S — влк. Швелуч, K — влк. Ключевской. На карте-врезке показано расположение области томографического изучения. b — треугольник обозначает центр Камчатки.

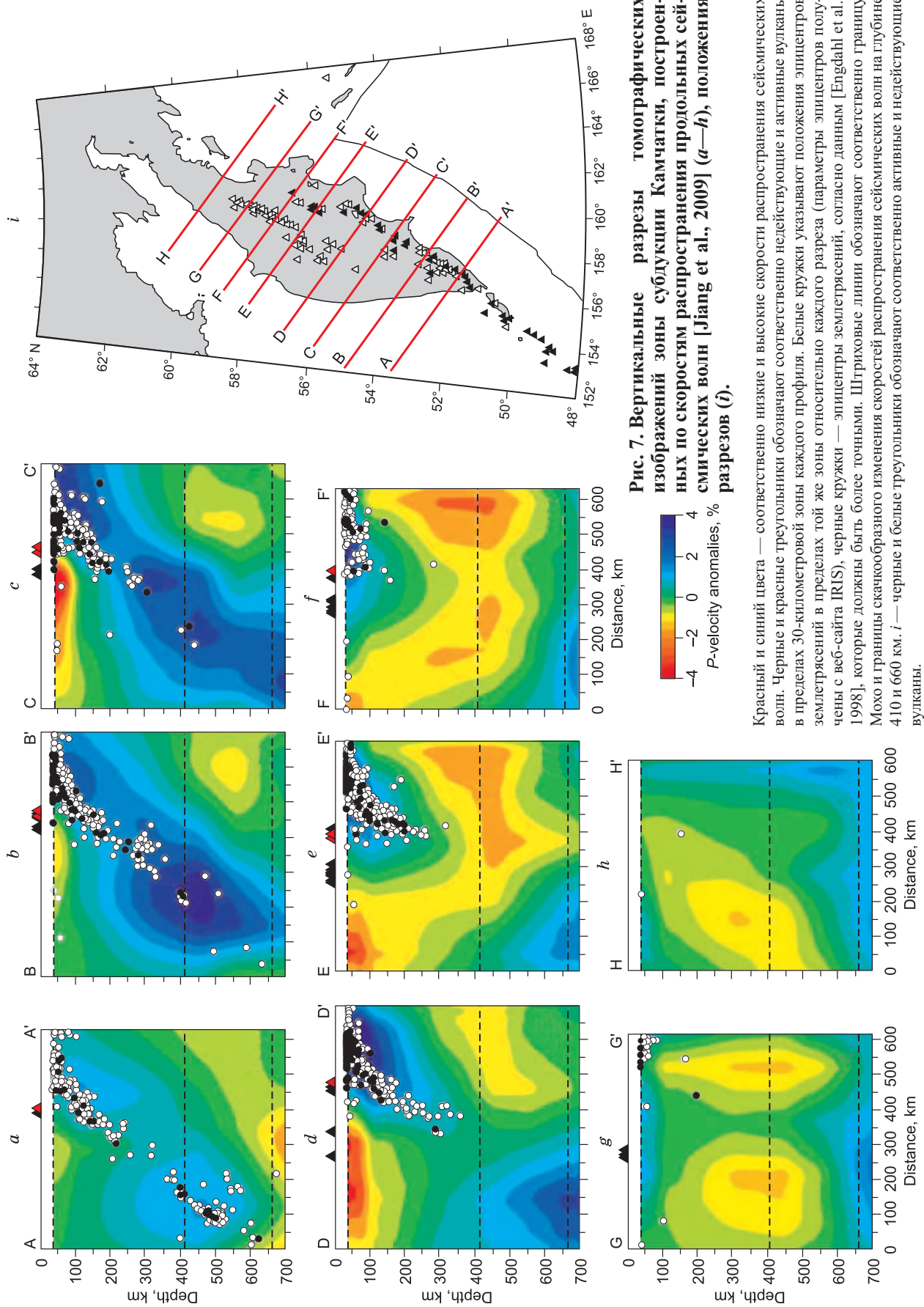
под вулканическим фронтом, а также зону высоких скоростей, соответствующую погружающемуся Тихоокеанскому слэбу. Однако регион их изучения ограничивался только юго-восточной частью Камчатской дуги вследствие имеющегося на то время распределения сейсмических станций. В. Левин с соавторами [Levin et al., 2002] выполнили томографию в поверхностных волнах до глубины 200 км, которая показала, что погружающийся Тихоокеанский слэб заканчивается в зоне Алеутско-Камчатского сочленения и что под затухающей северной ветвью Камчатской вулканической дуги отсутствует какой-либо реликтовый слэб. Авторы работы [Lees et al., 2007] получили телесеismicкое томографическое изображение в продольных волнах, показавшее снижение к северу глубины нахождения погружающегося слэба под Камчаткой, а в качестве возможной причины этого явления они рассматривали термальную абляцию, связанную с астеносферой. Исследования двоякого преломления поперечных волн позволили предположить, что ориентированные параллельно желобу напряжения распространяются по сейсмогенной зоне Вадати-Беньоффа, но изменяют свою ориентацию нормально к желобу у края слэба [Peyton et al., 2001; Portnyagin et al., 2005], свидетельствуя о том, под областью сочленения через окно слэба проходит астеносферный поток. Кроме того, термальное моделирование повторного нагрева оторванного слэба показывает, что тихоокеанская литосфера уже была утонена задолго до ее вступления в желоб вследствие замедленного утолщения литосферы под Мейджи-Гавайской горячей точкой [Davaille, Lees, 2004].



**Рис. 6. Распределение траекторий сейсмических лучей в плане (a) и в вертикальном сечении в направлении север—юг (b) и восток—запад (c) [Jiang et al., 2009].**

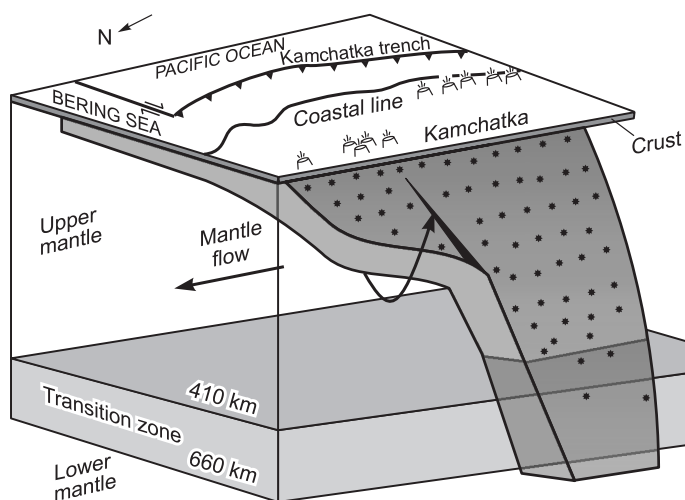
Квадраты обозначают 16 сейсмических станций, записи которых использованы в данном исследовании. *b, c* — штриховые линии показывают соответственно границу Мохо и границы скачкообразного изменения скоростей распространения сейсмических волн на глубине 410 и 660 км.

В статье [Jiang et al., 2009] была определена 3-мерная структура мантии по скоростям распространения продольных сейсмических волн до глубины 700 км под п-овом Камчатка с использованием времен вступления продольных волн, отобранных по цифровым сейсмограммам 75 телесейсмических событий, зафиксированных 15 мобильными и 1 стационарной сейсмостанциями на Камчатке (см. рис. 5). Используемые данные базируются на очень густой сети траекторий сейсмических лучей под п-овом Камчатка (рис. 6), что обуславливает получение надежного глубинного томографического изображения этого региона (рис. 7). Погружающийся Тихоокеанский слэб отчетливо фиксируется в верхней мантии и прослеживается до зоны резкого изменения сейсмических свойств на глубине 660 км под Южной Камчаткой, при этом наблюдается сокращение его размеров в северном направлении и выклинивание вблизи Алеутско-Камчатского сочленения (см. рис. 7, 8). Под Северной Камчаткой и под зоной сочленения на-



**Рис. 7. Вертикальные разрезы томографических изображений зоны субдукции Камчатки, построенных по скоростям распространения продольных сейсмических волн [Jiang et al., 2009] (*a—h*), положения разрезов (*i*).**

Красный и синий цвета — соответственно низкие и высокие скорости распространения сейсмических волн. Черные и белые треугольники обозначают соответственно недействующие и активные вулканы в пределах 30-километровой зоны каждого профиля. Белые кружки указывают положения эпицентров землетрясений в пределах той же зоны относительно каждого разреза (параметры эпицентров получены с веб-сайта IRIS), черные кружки — эпицентры землетрясений, согласно данным [Engdahl et al., 1998], которые должны быть более точными. Штриховые линии обозначают соответственно границу Мохо и границы скачкообразного изменения скорости распространения сейсмических волн на глубине 410 и 660 км. *i* — черные и белые треугольники обозначают соответственно активные и недействующие вулканы.



**Рис. 8.** Изображение в перспективе, показывающее Тихоокеанскую плиту, погружающуюся в зоне субдукции в западном направлении через переходную зону мантии под Камчаткой [Jiang et al., 2009].

Звездочки схематически показывают сейсмичность, глубинность которой уменьшается к северу под Камчаткой. Усл. обозн. см. на рис. 5.

блюдаются области низкоскоростных аномалий (см. рис. 7, *e—h*), которые интерпретируются как астеносферный поток. Предложена модель для объяснения основных особенностей высокоскоростных аномалий (см. рис. 8).

На базе томографического изображения и других геологических и геофизических результатов было высказано предположение, что исчезновение слэба под Северной Камчаткой вызвано трением между слэбом и окружающей астеносферой в ходе поворачивания Тихоокеанской плиты по часовой стрелке около 30 млн л.н., после чего этот процесс активизировался вследствие отрыва края слэба астеносферным потоком и благодаря наличию подводных гор Мейджи [Jiang et al., 2009]. В результате совместное действие исчезновения слэба и субдукции подводных гор Мейджи вызвало субдукцию Тихоокеанской плиты под Камчатку с меньшим углом падения вблизи сочленения, которая привела к смещению в западном направлении вулканов Швелуч и Ключевской.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Для объяснения внутриплитного магматизма и динамики мантии в Восточной Азии предложена модель крупного мантийного клина (КМК) [Zhao et al., 2004, 2009]. Предполагается, что над стагнирующим слэбом в верхней мантии образуется КМК, а угловой поток в нем и поток флюидов, образующихся при глубинной дегидратации слэба, вызывает апвеллинг горячего астеносферного материала, что приводит к утонению и растрескиванию литосферы под Восточным Китаем. Проявления активного внутриплитного вулканизма (например, вулканы Чангбай и Вудалианчи, см. рис. 2), сильные внутриплитные землетрясения (см. рис. 1), бассейновые структуры, содержащие большие запасы нефти (например, нефтяное поле Дакиннг), а также запасы других полезных ископаемых (Au-эпитермальные и Mo-порфировые системы) в Восточном Китае связаны с развитием динамических процессов в КМК над застойным слэбом под Восточной Азией [Zhao, 2004; Zhao et al., 2009; Santosh et al., 2010]. Действительно, внутриплитные тектонотермальные события можно проследить, по крайней мере, с мезозоя (и вплоть до кайнозоя) вдоль восточных внутренних районов и прибрежной окраины Азии [Pirajno et al., 2009]. Характер и природа этих событий позволяют предположить, что они могут быть вызваны протекающими в КМК процессами, как описано в этой работе.

Последние исследования в области физики минералов продемонстрировали возможность глубинной дегидратации слэба в переходной зоне мантии [Ohtani et al., 2004; Inoue et al., 2004; Отани, Чжао, 2009]. Недавно полученные результаты по разделению поперечных волн [Liu et al., 2008], электропроводности недр [Ichiki et al., 2006], геохимическому анализу [Chen et al., 2007; Zou et al., 2008; Kuritani et al., 2009] и численному моделированию [Zhu et al., 2010] подтверждают наличие горячей и водосодержащей верхней мантии над застойным Тихоокеанским слэбом и их тесную связь с внутриплитным вулканизмом в СВ Китае и таким образом поддерживают модель КМК.

Современные томографические изображения показывают, что застойный слэб в КМК также прослеживается под Западной Аляской, Алеутскими островами, Охотским морем и Российским Дальним Востоком, а структура мантии под этими регионами очень похожа на структуру мантии под Восточным Китаем (см. рис. 2—4). Эти результаты показывают, что модель КМК также применима для этих обширных регионов и что развитие здесь внутриплитного вулканизма и магматизма могло быть вызвано застойным Тихоокеанским слэбом и протекающими над ним процессами в КМК.

В Восточной России и прилегающих регионах сети стационарных сейсмостанций развернуты только на нескольких ограниченных территориях, например, на Японских островах, в Южной Аляске и п-ове Камчатка, где была определена детальная 3-мерная сейсмическая структура коры и верхней мантии. Для обширной территории других регионов, где отсутствуют сейсмические станции, мы можем

получить только грубое представление о крупномасштабной структуре коры и мантии на основе использования глобальных томографических моделей более низкого разрешения. Необходима установка сетей стационарных сейсмо станций или, по крайней мере, портативных сейсмо станций на обширной территории России, а также донных сейсмометров в окраинных морях (Берингово, Японское, Охотское и др.) для решения некоторых важных геодинамических задач в этом регионе, например, происхождение внутриплитного магматизма, процесса спрединга в задуговых областях и механизма возникновения глубинных землетрясений.

## ВЫВОДЫ

Новейшие региональные и глобальные томографические изображения показывают, что испытывающий субдукцию Тихоокеанский слэб переходит в застойное состояние в нижней части переходной зоны мантии под территорией Западной Аляски, Берингова и Охотского морей, Российского Дальнего Востока, Японского моря и Восточного Китая, вероятно, вследствие сильного сопротивления, которое он испытывает на границе между верхней и нижней мантией из-за значительного роста вязкости мантийного материала на этой границе. Крупный мантийный клин образуется в верхней мантии и верхней части переходной зоны мантии над погружающимся Тихоокеанским слэбом и неподвижным слэбом. Дегидратация неподвижного слэба и угловой поток в КМК вызывают апвеллинг астеносферного материала, приводящий к формированию внутриплитных вулканов, утонению литосферы и реактивации Северо-Китайского кратона, что выражается в частых проявлениях сильных коровых землетрясений в пределах кратона [Xu, Zhao, 2009; Tian et al., 2009; Santosh et al., 2010]. Фрагменты высокоскоростных аномалий фиксируются в нижней мантии до границы кора—мантия, указывая на то, что окончательное разрушение неподвижного слэба происходит вплоть до основания мантии. В виде возвратного потока, разрушающего холодный материал слэба, горячий мантийный материал поднимается из нижней мантии и достигает верхней мантии под погружающимся слэбом, при этом он может вызвать взаимодействия слэб—плюм.

Высокоразрешающая региональная томография выявила низкоскоростную аномалию, которая фиксируется под Байкальской рифтовой зоной вплоть до глубины 600 км и может представлять Байкальский плюм. Глубина основания глубинной сейсмической зоны Вадати—Беньоффа и самого Тихоокеанского слэба уменьшается в северном направлении под п-овом Камчатка, а слэб исчезает под Северной Камчаткой, что вызвано трением между слэбом и окружающей его астеносферой в ходе поворачивания Тихоокеанской плиты по часовой стрелке около 30 млн л.н., после чего окно слэба расширилось вследствие поглощения его краевой части горячим астеносферным потоком и наличия подводных гор Мейджи.

Необходимы дополнительные работы по развертыванию сетей стационарных или мобильных сейсмо станций в Евразийском континентальном сегменте, а также установка донных сейсмометров в акваториях окраинных морей с целью установления детальной 3-мерной структуры коры и мантии под территорией России и прилегающих регионов, которая существенно улучшит наши представления о сейсмотектонике, вулканизме и динамике мантии в этой обширной и сложной тектонической среде.

Работа частично поддержана целевым грантом для проведения научных исследований (Kiban-A 17204037), выделенным Японским обществом поддержки науки (JSPS), а также получена поддержка по программе Глобального центра передовых знаний (G-COE) Университета Тохоку. Мы благодарны Я. Ямамото и К. Идехара за помощь по обработке данных и в подготовке графики.

## ЛИТЕРАТУРА

**Кулаков И.Ю.** Структура верхней мантии под Южной Сибирью и Монголией по данным региональной сейсмотомографии // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (3), с. 248—261.

**Отани Э., Чжао Д.** Роль воды в глубинных процессах в верхней мантии и переходном слое: дегидратация стагнирующих субдукционных плит и ее значение для «большого мантийного клина» // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (12), с. 1385—1392.

**Яковлев А.В., Кулаков И.Ю., Тычков С.А.** Глубина Мохо и трехмерная структура сейсмических аномалий земной коры и верхов мантии в Байкальском регионе по данным локальной томографии // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (2), с. 261—383.

**Achauer U., Masson F.** Seismic tomography of continental rifts revisited: from relative to absolute heterogeneities // Tectonophysics, 2002, v. 358, p. 17—37.

**Chen Y., Zhang Y., Graham D., Su S., Deng J.** Geochemistry of Cenozoic basalts and mantle xenoliths in Northeast China // Lithos, 2007, v. 96, p. 108—126.

**Davaille A., Lees M.** Thermal modeling of subducted plates: tear and hotspot at the Kamchatka corner // Earth Planet. Sci. Lett., 2004, v. 226, p. 293—304.

- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S.** Current plate motions // *Geophys. J. Int.*, 1990, v. 101, p. 425—478.
- Doser D.** Faulting within the western Baikal rift as characterized by earthquake studies // *Tectonophysics*, 1991, v. 196, p. 87—107.
- Engdahl E.R., van der Hillst R.D., Buland R.P.** Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination // *Bull. Seismol. Amer.*, 1998, v. 88, p. 722—743.
- Gao S., Liu K., Davis P., Slack P., Zorin Y., Mordvinova V., Kozhevnikov V.** Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone // *J. Geophys. Res.*, 2003, v. 108, p. 2194.
- Gorbatov A., Kostoglodov V., Subrez G.** Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone // *J. Geophys. Res.*, 1997, v. 102, p. 17883—17898.
- Gorbatov A., Domínguez J., Suárez G., Kostoglodov V., Zhao D.** Tomographic imaging of the *P*-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula // *Geophys. J. Int.*, 1999, v. 137, p. 269—279.
- Hasegawa A., Nakajima J., Uchida N., Okada T., Zhao D., Matsuzawa T., Umino N.** Plate subduction, and generation of earthquakes and magmas in Japan as inferred from seismic observations: an overview // *Gondwana Res.*, 2009, v. 16, p. 370—400.
- Honthaas C., Bellon H., Kepezhinskas P., Maury R.** New <sup>40</sup>K-<sup>40</sup>Ar dates for the Cretaceous-Quaternary magmatism of Northern Kamchatka (Russia) // *C. R. Acad. Sci. Paris Series II*, 1995, v. 320, p. 197—204.
- Huang J., Zhao D.** High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // *J. Geophys. Res.*, 2006, v. 111, B09305.
- Ichiki M., Baba K., Obayashi M., Utada H.** Water content and geotherm in the upper mantle above the stagnant slab: interpretation of electrical conductivity and seismic *P*-wave velocity models // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2006, v. 155, p. 1—15.
- Inoue T., Tanimoto Y., Irifune T., Suzuki T., Fukui H., Ohtaka O.** Thermal expansion of wadsleyite, ringwoodite, hydrous wadsleyite and hydrous ringwoodite // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2004, v. 143, p. 279—290.
- Jiang G., Zhao D., Zhang G.** Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka // *Tectonophysics*, 2009, v. 465, p. 190—203.
- Kuritani T., Kimura J., Miyamoto T., Wei H., Shimano T., Maeno F., Jin X., Taniguchi H.** Intraplate magmatism related to deceleration of upwelling asthenospheric mantle: implications from the Changbaishan shield basalts, northeast China // *Lithos*, 2009, v. 112, p. 247—258.
- Lees J., VanDecar J., Gordeev E., Ozerov A., Brandon M., Park J., Levin V.** Three-dimensional images of the Kamchatka-Pacific plate cups // *Volcanism and subduction: the Kamchatka region* / Eds. J. Eichelberger, E. Gordeev, M. Kasahara, P. Izbekov, J.M. Lees. AGU, Washington, D.C., 2007, p. 65—75.
- Levin V., Shapiro N., Park J., Ritzwoller M.** Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka // *Nature*, 2002, v. 418, p. 763—767.
- Liu K., Gao S.** Mantle transition zone discontinuities beneath the Baikal rift and adjacent areas // *J. Geophys. Res.*, 2006, v. 111, B1301.
- Liu K., Gao S., Gao Y., Wu J.** Shear wave splitting and mantle flow associated with the deflected Pacific slab beneath northeast Asia // *J. Geophys. Res.*, 2008, v. 113, B01305.
- Maruyama S.** Plume tectonics // *J. Geol. Soc. Japan*, 1994, v. 100, p. 24—49.
- Mukasa S., Andronikov A., Hall C.** The <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar chronology and eruption rates of Cenozoic volcanism in the eastern Bering Sea Volcanic Province, Alaska // *J. Geophys. Res.*, 2007, v. 112, B06207.
- Ohtani E., Litasov K., Hosoya T., Kubo T., Kondo T.** Water transport into the deep mantle and formation of a hydrous transition zone // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2004, v. 143, p. 255—269.
- Peyton V., Levin V., Park J., Brandon M., Lees J.** Mantle flow at a slab edge: seismic anisotropy in the Kamchatka region // *Geophys. Res. Lett.*, 2001, v. 28, p. 379—382.
- Portnyagin M., Hoernle K., Avdeiko G., Hauff F., Werner R., Bindeman I., Uspensky V., Garbe-Schunberg D.** Transition from arc to oceanic magmatism at the Kamchatka-Aleutian junction // *Geology*, 2005, v. 33, p. 25—28.
- Pirajno F., Ernst R.E., Borisenko A.S., Fedoseev G.S., Naumov E.A.** Intraplate magmatism in Central Asia and China and associated metallogeny // *Ore Geol. Rev.*, 2009, v. 35, p. 114—136.
- Qi C., Zhao D., Chen Y.** Search for deep slab segments under Alaska // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2007, v. 165, p. 68—82.
- Santosh M., Zhao D., Kusky T.** Mantle dynamics of the Paleoproterozoic North China Craton: a perspective based on seismic tomography // *J. Geodyn.*, 2010, v. 49, p. 39—53.
- Simkin T., Siebert L.** *Volcanoes of the world* // Geoscience Press, 1994, p. 1—368.

- Steblov G., Kogan M., King R., Scholz C., Bergmann R., Frolov D.** Imprint of the North American plate in Siberia revealed by GPS // *Geophys. Res. Lett.*, 2003, v. 30, GL017805.
- Tian Y., Zhao D., Sun R., Teng J.** Seismic imaging of the crust and upper mantle beneath the North China Craton // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2009, v. 172, p. 169—182.
- Tiberi C., Deschamps A., Deverchere J. et al.** Asthenospheric imprints on the lithosphere in Central Mongolia and Southern Siberia from a joint inversion of gravity and seismology (MOBAL experiment) // *Geophys. J. Int.*, 2008, v. 175, p. 1283—1297.
- Watson B.F., Fujita K.** Tectonic evolution of Kamchatka and Sea of Okhotsk and implication for the Pacific basin // *Tectonostratigraphic terranes of the Circum-Pacific region* / Ed. D.G. Howell. Circum-Pacific Council, Houston, TX, 1985, p. 333—348.
- Xu P., Zhao D.** Upper-mantle velocity structure beneath the North China Craton: implications for lithospheric thinning // *Geophys. J. Int.*, 2009, v. 177, p. 1279—1283.
- Zhao D.** Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, v. 192, p. 251—265.
- Zhao D.** Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2004, v. 146, p. 3—34.
- Zhao D.** Multiscale seismic tomography and mantle dynamics // *Gondwana Res.*, 2009, v. 15, p. 297—323.
- Zhao D., Hasegawa A., Horiuchi S.** Tomographic imaging of *P* and *S* wave velocity structure beneath northeastern Japan // *J. Geophys. Res.*, 1992, v. 97, p. 19909—19928.
- Zhao D., Christensen D., Pulpan H.** Tomographic imaging of the Alaska subduction zone // *J. Geophys. Res.*, 1995, v. 100, p. 6487—6504.
- Zhao D., Lei J., Tang R.** Origin of the Changbai intraplate volcanism in Northeast China: evidence from seismic tomography // *Chinese Sci. Bull.*, 2004, v. 49, p. 1401—1408.
- Zhao D., Lei J., Inoue T., Yamada A., Gao S.** Deep structure and origin of the Baikal rift zone // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, v. 243, p. 681—691.
- Zhao D., Lei J., Liu L.** Seismic tomography of the Moon // *Chinese Sci. Bull.*, 2008, v. 53, p. 3897—3907.
- Zhao D., Tian Y., Lei J., Liu L., Zheng S.** Seismic image and origin of the Changbai intraplate volcano in East Asia: role of big mantle wedge above the stagnant Pacific slab // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2009, v. 173, p. 197—206.
- Zhu G., Shi Y., Tackley P.** Subduction of the western Pacific plate underneath Northeast China: implications of numerical studies // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2010, v. 178, p. 92—99.
- Zorin Y., Turutanov E., Mordvinova V., Kozhevnikov V., Yanovskaya T., Treussov A.** The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure // *Tectonophysics*, 2003, v. 371, p. 153—173.
- Zou H., Fan Q., Yao Y.** U-Th systematics of dispersed young volcanoes in NE China: asthenosphere upwelling caused by piling up and upward thickening of stagnant Pacific slab // *Chem. Geol.*, 2008, v. 255, p. 134—142.

*Поступила в редакцию  
22 марта 2010 г.*