



УДК 551.24

Л. И. Гонтовая¹, С. Л. Сенюков², З. А. Назарова²

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: lecyu@emsd.ru*

² *Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: ssl@emsd.ru, sva04@emsd.ru*

Глубинная структура Ключевской группы вулканов в результатах сейсмической томографии

Обсуждается глубинная структура и геодинамические модели процессов, протекающих в верхней мантии области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, которые получены методом сейсмической томографии. Под Ключевской группой вулканов выявлена низкоскоростная структура типа астенолита; глубина его кровли составляет ~ 70 км. Согласно скоростной модели, в низах земной коры (глубина ~ 30 км) установлены аномальные зоны, вероятно, магматические очаги питания активных вулканов Толбачик и Ключевской. «Канал» их взаимосвязи с верхней мантией может быть одним.

Введение

В настоящее время одним из наиболее мощных средств изучения структуры земной коры (ЗК) и верхней мантии (ВМ) является метод сейсмической томографии. В различных вариантах (глобальном, региональном, локальном) он используется в районе Камчатки, в частности в области сочленения Курило-Камчатской (К-К) и Алеутской (Ал) островных дуг (ОД), к которой приурочена Ключевская группа вулканов (КГВ) [2, 3, 6, 9, 12–19]. Основное внимание большинство авторов уделяют характеристике слэба (погружающейся тихоокеанской литосферной плиты). В сейсмотомографическом изображении он представляется наклонной зоной повышенных значений скорости с приуроченной к нему фокальной зоной. Угол падения слэба уменьшается примерно от ~ 550 на юге полуострова до ~ 350 на севере; максимальная глубина гипоцентров снижается до 100–200 км вблизи сочленения ОД [13, 14 и др.]. Глубинная модель, разработанная с использованием томографии на поверхностных волнах, показывает, что под северной частью Камчатской вулканической дуги какой-либо реликтовый слэб отсутствует [6, 15]. Уменьшение глубины слэба по данным телесеismicической томографии показано в работе [16]; авторы предполагают в качестве возможной причины термальную абляцию, которая обусловлена процессами в астеносфере. На основании анизотропной томографии рассматривается модель проникания астеносферного потока в «окно» слэба под зоной стыка ОД [17]. Исчезновение слэба под северной Камчаткой, по мнению авторов [6], может быть обусловлено «трением между слэбом и окружающей астеносферой в ходе поворачивания Тихоокеанской

плиты по часовой стрелке около 30 млн л. н.»; далее, «совместное действие исчезновения слэба и субдукции гор Мейджи» вызвало выполаживание слэба и смещение КГВ к западу. Однако, согласно результатам, приведённым в [9], в северной части Камчатки ТХ слэб (высокоскоростная аномалия, хотя и менее контрастная по сравнению с югом полуострова) выделен до глубины около 250 км. погружающийся до глубины не менее 200 км. Предполагается разрыв («окно») между К-К и Ал слэбами на глубине около 220 км, а близкое расположение хр. Обручева на продолжении Императорских гор предопределяет специфику КГВ. Имеются и другие работы, в которых предприняты попытки объяснить смещение Восточного вулканического пояса к западу [11 и др.]. Практически все они не выходят за рамки гипотезы тектоники плит, и, так или иначе, связывают протекающие под КГВ глубинные процессы с зоной субдукции. Очевидно, что предложенные геодинамические модели нужно рассматривать в качестве гипотетических; в дальнейшем они могут быть пересмотрены, возможно, в рамках других, альтернативных, гипотез глубинных преобразований [4, 5, 7 и др.].

В настоящей публикации рассматривается глубинная скоростная модель ЗК и ВМ под КГВ, которая построена по данным регионального каталога землетрясений КФ ГС РАН. Использована методика сейсмической томографии, разработанная в Швейцарии (университете г. Цюрих) [19]. Распределение скоростных параметров V_p , V_s и V_p/V_s получено до глубины ~ 200 км. Это связано с особенностями взаимной геометрии сети станций и гипоцентров камчатских землетрясений. Вероятно, под КГВ име-

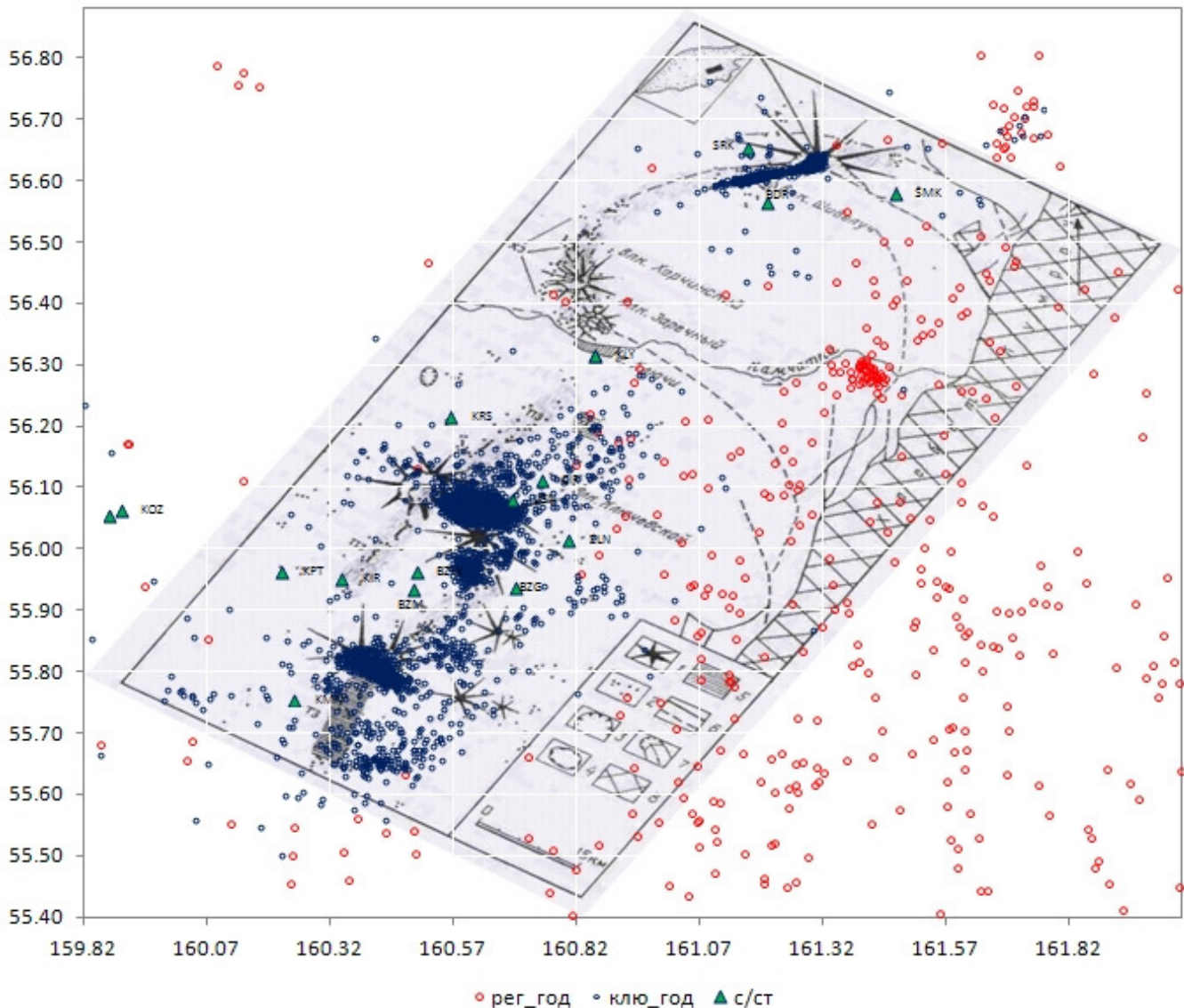


Рис. 1. Карта сейсмичности в районе Северной группы вулканов за период 2012–2014 гг. Чёрные кружки — эпицентры вулканотектонических землетрясений ($K_S = 2,6 - 11,3$), красные — региональных в верхней мантии ($K_S = 3,0 - 15,0$). Схема расположения вулканов и некоторые элементы тектоники взяты из [1].

ются и зоны плавления глубже в мантии, однако они не проявляются в магматизме, выносящем материал в доступную для изучения зону глубин.

Скоростная модель ЗК и ВМ, сейсмичность и тектоника

Северная группа вулканов расположена на Центральном поднятии (ЦП), которое с востока и запада граничит с впадинами (Хапиченской и Козыревской). Более молодые структуры (в частности Толбачинская депрессия) наложены на это поднятие. В региональном плане эта группа расположена на продолжении Императорского хребта, который здесь приближен к жёлобу; она характеризуется интенсивным выносом магматического вещества, сопоставимым с такими горячими точками как о-ва Гавайи, Исландия и др. Расположение вулканов, элементы тектоники и характер сейсмичности в пре-

делах ЦП показаны на рис. 1. Региональные землетрясения в пределах Восточного хребта относятся к интервалу глубин ВМ 40–150 км, а южнее в Толбачик — 150–320 км.

На рис. 2 приведена схема гипоцентрии коровых и мантийных землетрясений (последние с $K_S \leq 13$) в узком секторе, ориентированном вдоль активной зоны (профиль АБ). Сейсмические кластеры вдоль СФЗ приурочены к границам литосферных блоков; они выражены и в приповерхностной тектонике.

Для исследования более «тонкой» структуры СФЗ использовались слабые землетрясения ($K_S \leq 10$), охватывающих более 50% данных каталога [11]. В качестве меры активности рассматривалось не число событий, а их энергия. На рис. 4 (А) приведён один из разрезов плотности распределения энергии землетрясений вдоль Центрально-Камчатской де-

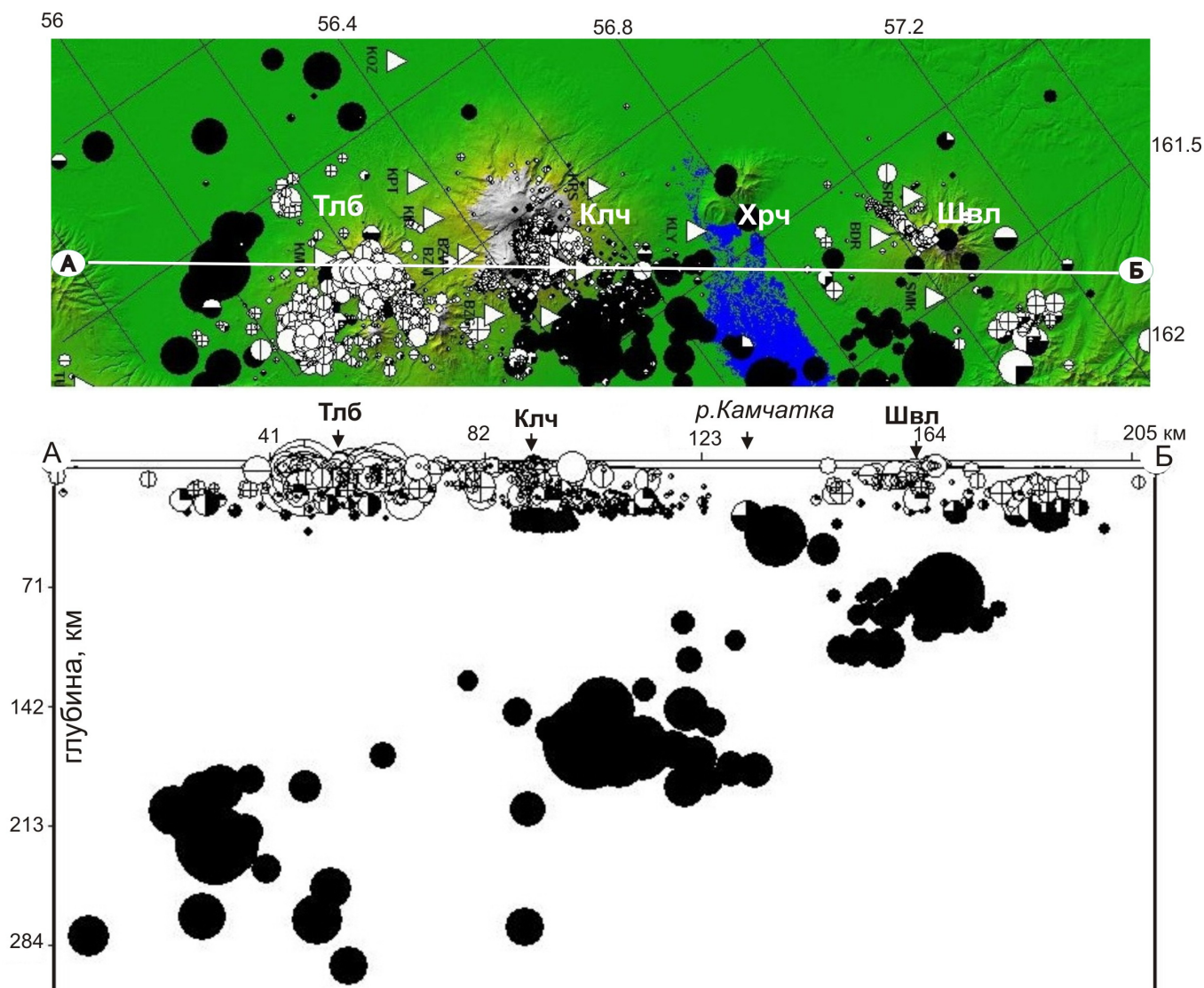


Рис. 2. Распределение гипоцентров под Северной группой вулканов (класс и период наблюдений тот же) в горизонтальной и вертикальной плоскости. K_S землетрясений в ВМ (чёрные кружки) от 7 до 13.

прессии [11]. Под КГВ в ВМ выделяется сложная аномальная зона повышенной сейсмичности на глубине 120–180 км. Она прослеживается к востоку до побережья (устье р. Сторож) и заметна в акватории Камчатского залива. Геометрия этой зоны и высокая интенсивность сейсмичности, вероятно, вызваны не только вертикальными, но и латеральными подвижками литосферных блоков. Это, в свою очередь, значительно повышает проницаемость ВМ и служит причиной интенсивного магматизма КГВ. Как будет показано далее, этой разломной зоне соответствует аномалия пониженной скорости, ориентированная в СЗ-ЮВ направлении; на рис. 3 её положение показано пунктиром.

Трёхмерная скоростная модель построена методом сейсмической томографии по данным регионального каталога камчатских землетрясений КФ ГС РАН. Выбирались землетрясения с записями

наилучшего качества ($c K_S \geq 10$), удовлетворяющие ряду условий, необходимых для уменьшения погрешностей модели за счёт исходной информации. Распределение скоростных параметров (в аномалиях скорости продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, а также параметра V_p/V_s) показано в виде горизонтальных и вертикальных сечений 3-мерной модели.

На картах, в интервале глубин 80–120 км, чётко отражена структура ВМ, а именно: высокоскоростная аномалия, соответствующая фокальному слою, её смещение и разворот к СЗ в районе Кроноцкого полуострова (рис. 3). В акватории Камчатского залива ВМ характеризуется пониженной скоростью, что, возможно, связано с близким расположением в. Обручева и Императорских гор. Северная группа вулканов приурочена к низкоскоростной аномалии скорости в интервале глубин 100–120 км. В целом,

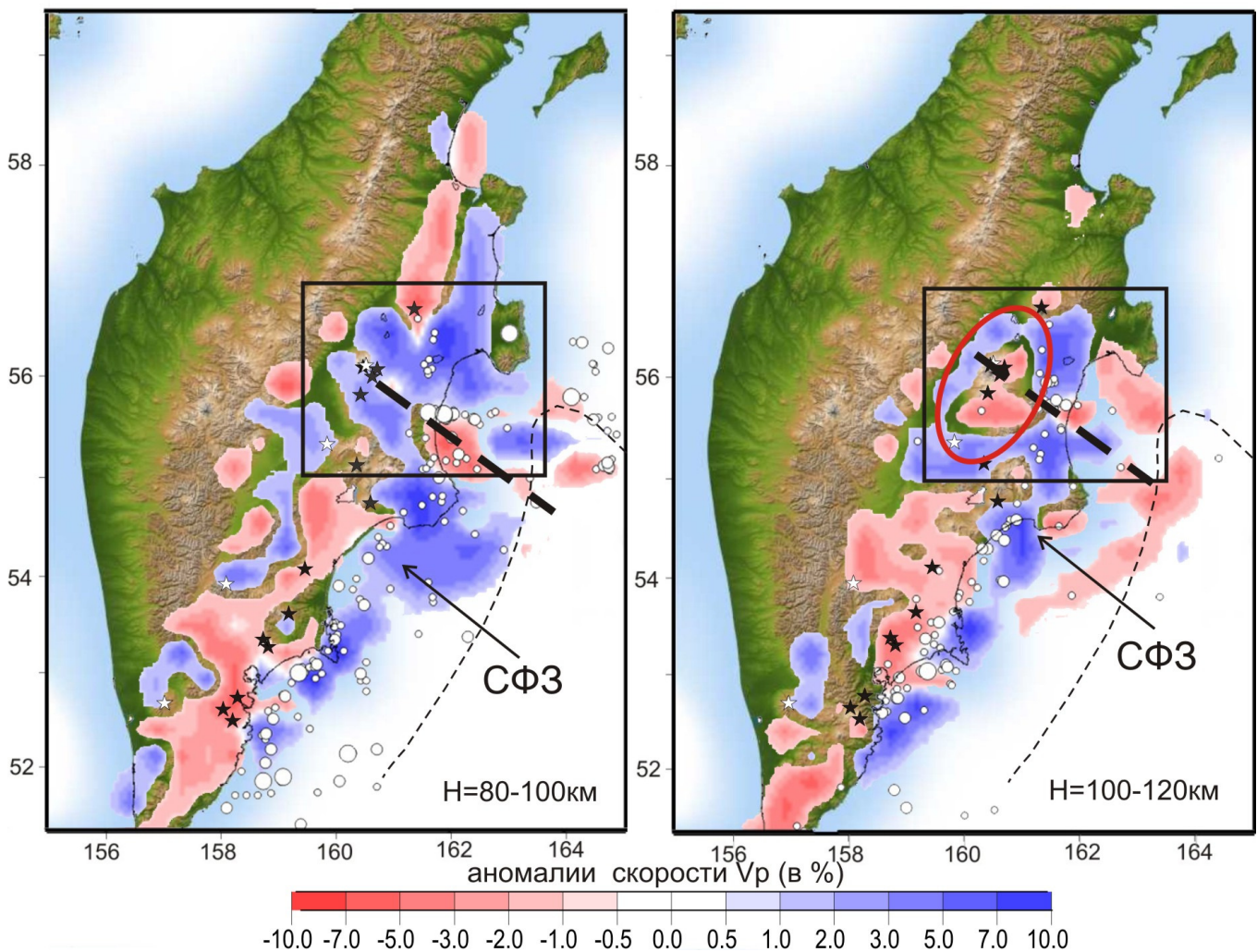


Рис. 3. Горизонтальное сечение региональной 3-мерной скоростной модели в аномалиях скорости продольных волн.

особенности глубинной структуры соответствуют сейсмотомографическим изображениям, построенным по другим исходным данным и способам расчёта (см. введение). Однако, нужно отметить большую детальность результатов, в частности это касается неоднородности фокального слоя и мантийного клина, взаимосвязи выявленных скоростных свойств с глубинной тектоникой и приповерхностными структурами.

На рис. 4 (Б и В) показаны распределения скоростных параметров V_s , V_p/V_s на вертикальном сечении вдоль Центрально-Камчатской депрессии (ЦКД) включительно. Согласно скоростной модели в аномалиях V_s , кровля астеносферы поднимается с глубины ~ 200 км до $\sim 70 - 100$ км под КГВ; её перегиб приурочен к Кроноцко-Крутогоровской зоне широтных разломов). Разрыв кровли слоя астеносферы под КГВ, отмеченный относительно меньшими значениями аномалии V_s , можно объяснить механизмом адвекции. Часть вещества ВМ в виде распла-

вов/флюидов вынесена в подкоровый интервал глубин, а погружившееся в астеносферу относительно холодное вещество понизило температуру (возможно, ниже солидуса мантийных пород). На границе кора-мантия (глубина ~ 30 км) чётко оконтурены две аномальные зоны пониженной интенсивности скорости V_s (рис. 4 Б). Возможно, они отражают раздельное положение промежуточных очагов вулканов Ключевской и Пл. Толбачик. По характеру распределения V_p/V_s канал взаимосвязи кора-мантия представляется общим (рис. 4 В).

Выводы

1. Выполнено сопоставление результатов сейсмотомографии, полученных на Камчатке, в частности под Северной группой вулканов. Несмотря на многообразие предложенных геодинамических моделей, эта проблема требует дальнейшей разработки. Вероятно, она потребует использования и других (кроме тектоники плит) представлений о природе глубинных процессов [5 и др.].

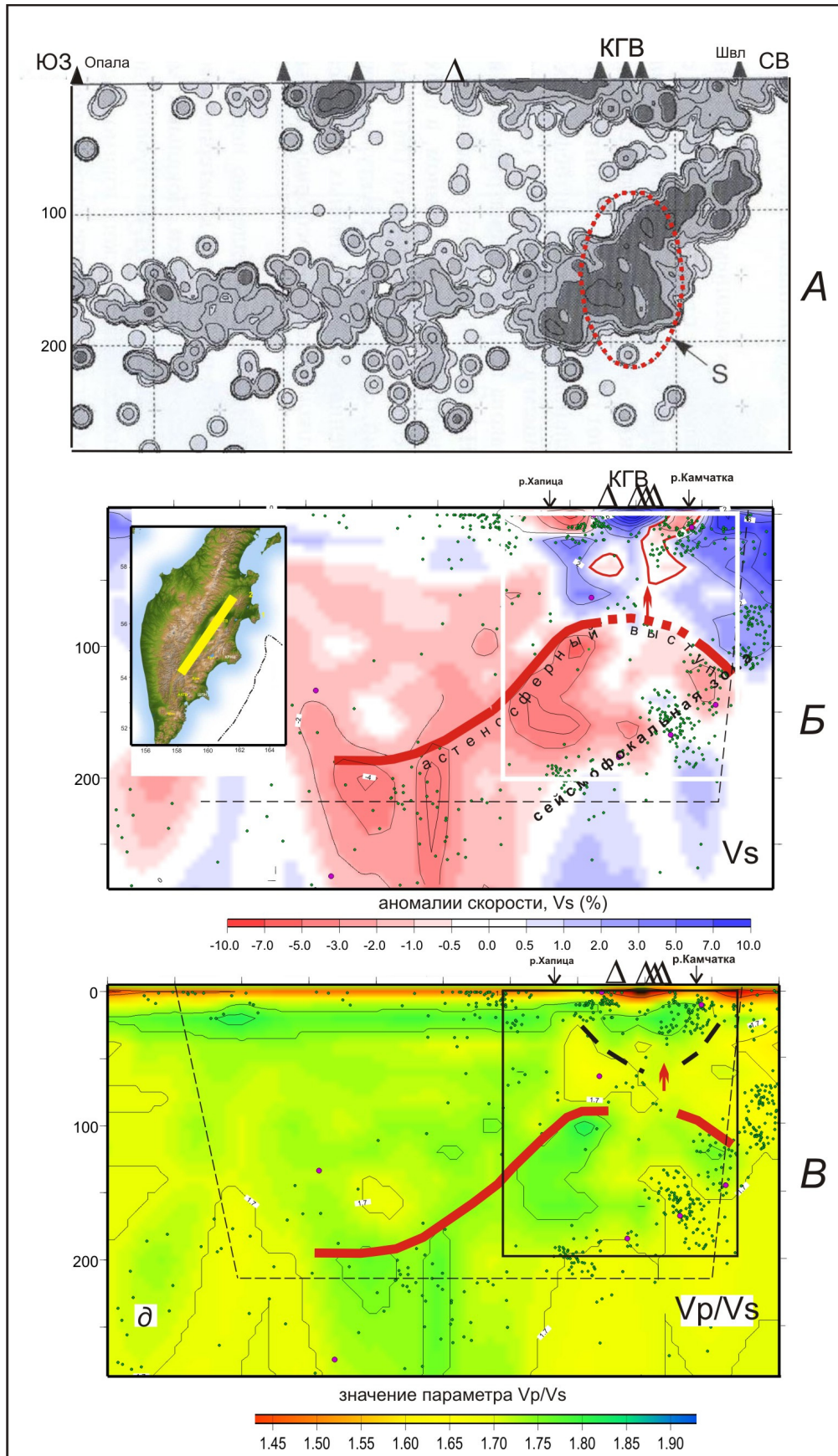


Рис. 4. Вертикальное сечение региональной скоростной модели и её сопоставление с распределением плотности энергии землетрясений с $K_S \leq 10$.

2. По данным региональной томографии предложена скоростная модель ЗК и ВМ для района КГВ, включающая астенолитный выступ в ВМ; подъём его кровли фиксируется к северу от Кроноцко-Крутогоровской зоны широтных разломов. В зоне перехода кора-мантия выделены аномалии пониженной скорости, которые вероятно соответствуют промежуточным очагам магматического питания вулканов Тлб и Клч. Магматический очаг в низах коры под Ключевским подтверждён данными локальной томографии [8, 9, 12].

3. Разработанная скоростная модель ЗК и ВМ под КГВ соответствует картине региональной и локальной сейсмичности, отвечает данным о природе региональных границ в ВМ [10], согласуется с элементами приповерхностной тектоники.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-05-12090 (И) «Астеносферный диапиризм на границах континентальных и океанических плит».

Список литературы

1. *Вольныц О. Н., Мелекесцев И. В., Пономарёва В. В. и др.* Харчинский и Заречный вулканы — уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: структурная приуроченность, морфология, возраст и геологическое строение // *Вулканология и сейсмология*. 1998. № 4–5. С. 5–18.
2. *Гонтовая Л. И., Левина В. И., Санина И. А. и др.* Скоростные неоднородности литосферы под Камчаткой // *Вулканология и сейсмология*. 2003. № 4. С. 56–64.
3. *Гонтовая Л. И., Попруженко С. В., Низкоус И. В.* Структура верхней мантии зоны перехода океан-континент в районе Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. 2010. № 4. С. 13–29.
4. *Гонтовая Л. И., Гордиенко В. В.* Глубинные процессы и геофизические модели мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива // *Геология и полезные ископаемые мирового океана*. Киев: Наукова думка, 2006. № 2. С. 107–122.
5. *Гордиенко В. В.* О возможной альтернативе тектонике плит (тепловые процессы в тектоносфере, геологическая история и физические поля) // *Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы*. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 84–96.
6. *Жао Д., Пирайно Ф., Луи Л.* Структура и динамика мантии под Восточной Россией и прилегающими регионами // *Геология и геофизика*. 2010. Том. 51, № 9. С. 1188–1203.
7. *Ермаков В. А.* Особенности развития активной континентальной окраины (на примере Курило-Камчатского региона) // *Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы*. М.: ОИФЗ РАН. 2002. С. 58–188.
8. *Ермаков В. А., Гонтовая Л. И.* Тектоно-магматические процессы на активной континентальной окраине (по данным сейсмической томографии). Современное состояние наук о Земле. МГУ. С. 625–630.
9. *Кулаков И. Ю., Добрецов Н. Л., Бушенков Н. А. и др.* Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // *Геология и геофизика*. 2011. Том. 52, № 6. С. 830–851.
10. *Павленкова Н. И.* Реологические свойства верхней мантии северной Евразии и природа региональных границ по данным сверхдлинных сейсмических профилей // *Геология и геофизика*. 2011. Том. 52, № 9. С. 1287–1301.
11. *Селивёрстов Н. И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга. 2009. 191 с.
12. *Федотов С. А., Жаринов Н. А., Гонтовая Л. И.* Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об её извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // *Вулканология и сейсмология*. 2010. № 1. С. 3–35.
13. *Gorbatov A., Dominguez J., Suarez G. et al.* Tomographic imaging of the P-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula // *Geophys. J. Int.* 1999. Vol. 137. P. 269–279.
14. *Gorbatov A., Kostoglodov V., Suarez G. et al.* Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone // *JGR*. 1997. Vol. 102. P. 17mbox,883–17 898.
15. *Jiang G., Zhao D., Zhang G.* Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka // *Tectonophysics*. 495 (2009). P. 190–203.
16. *Lees J., VanDear J., Gordeev E. et al.* Three-dimensional of the Kamchatka-Pacific plate // *Volcanism and Subdaction the Kamchatka region*. AGU, Washington, D. C., 2007. P. 65–75.
17. *Levin V., Park J., Brandon M, et al.* Crust and upper mantle of Kamchatka from teleseismic receiver function // *Tectonophysics*. 358, 233–265.
18. *Koulakov I., Gordeev E., Dobretsov N. et al.* Feeding paths of the Kluchevskoy volcano group (Kamchatka) from the results of local earthquake tomography // *Geoph. Res. Lett.* V. 38. LXXXXX. 2011.
19. *Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L. et al.* Correlation of Kamchatka Lithosphere, Velocity Anomalies With Subduction Processes // *Volcanism and Subduction the Kamchatka Region*. AGU, Washington. D. C., 2007. P. 97–106.