



<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0333>

## SPECIFIC VELOCITY STRUCTURE OF THE UPPER MANTLE IN THE TRANSBAIKALIA SEGMENT OF THE MONGOLIA-OKHOTSK OROGENIC BELT

V. M. Soloviev<sup>1</sup>, V. V. Chechel'nitsky<sup>2</sup>, A. S. Salnikov<sup>3</sup>,  
V. S. Seleznev<sup>4</sup>, A. V. Liseikin<sup>4</sup>, N. A. Galyova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Altai-Sayan Branch of Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS', Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Baikal Branch of Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS', Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup>Seismological Branch of Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS', Novosibirsk, Russia

**Abstract:** The paper presents the results of deep seismic studies on Geophysical Reference Profile 1-SB (Sredneargusk – Ust-Karenga – Taksimo – Vitim) in East Transbaikalia, Russia. The 1200 km long profile crosses the major tectonic structures of the Central Asian fold belt: the Argun median massif, the Selenga-Stanovoy and Transbaikalia folded regions, and the Baikal rift zone. Its northwestern fragment extends into the Angara-Lena monocline of the Siberian platform. The southeastern (Transbaikalia) and northwestern (Baikal-Patom) fragments of the profile are based on the spot (differential) seismic sounding technique using explosions and 40-tonne vibrators. The southeastern (Transbaikalia) fragment shows small crustal thickness values (~40 km), an almost horizontal position of the Moho, and high velocities of longitudinal waves (~8.4 km/sec) beneath the Moho. The analysis of parallelism graphs and the dynamic expression of the wave refracted from the Moho suggests a less than 5–10 km thick layer of high velocities and low gradients below Moho. The database on the territory of Transbaikalia includes ~200 wave arrival times from large earthquakes, which were refracted at the Moho at distances of ~200–1400 km. As part of the tomographic interpretation, using additional DSS data on the Moho, the territory of Transbaikalia has been mapped to show the patterns of the threshold velocity values at the Moho. The seismic data was used to contour an area with high velocity values in the mantle in the central part of the Mongolia-Okhotsk orogenic belt and the neighboring fold structures of Transbaikalia. According to the analysis of the seismic and geologic data on the study area, the mantle layer with high velocity values in the Mongolian-Okhotsk orogenic belt may be represented by the eclogitic rock plates.

**Key words:** deep seismic sounding (DSS); velocity of longitudinal waves; hodographs from explosions and earthquakes; Moho; Mongolia-Okhotsk orogenic belt

### RESEARCH ARTICLE

Recommended by E.V. Sklyarov

Received: August 17, 2017

Revised: October 27, 2017

Accepted: November 13, 2017

**For citation:** Soloviev V.M., Chechel'nitsky V.V., Salnikov A.S., Seleznev V.S., Liseikin A.V., Galyova N.A., 2017. Specific velocity structure of the upper mantle in the Transbaikalia segment of the Mongolia-Okhotsk orogenic belt. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 1065–1082. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0333.

**Для цитирования:** Соловьев В.М., Чечельницкий В.В., Сальников А.С., Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Галёва Н.А. Особенности скоростного строения верхней мантии Забайкалья на участке Монголо-Охотского орогенного пояса // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 4. С. 1065–1082. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0333.

# ОСОБЕННОСТИ СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЗАБАЙКАЛЬЯ НА УЧАСТКЕ МОНГОЛО-ОХОТСКОГО ОРОГЕННОГО ПОЯСА

В. М. Соловьев<sup>1</sup>, В. В. Чечельницкий<sup>2</sup>, А. С. Сальников<sup>3</sup>,  
В. С. Селезнев<sup>4</sup>, А. В. Лисейкин<sup>4</sup>, Н. А. Галёва<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра  
«Единая геофизическая служба РАН», Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Байкальский филиал Федерального исследовательского центра  
«Единая геофизическая служба РАН», Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,  
Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра  
«Единая геофизическая служба РАН», Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Представлены материалы глубинных сейсмических исследований в Восточном Забайкалье на опорном геофизическом профиле 1-СБ (п. Среднеаргунск – п. Усть-Каренга – г. Таксимо – п. Витим) длиной свыше 1200 км. Профиль пересекает крупные тектонические структуры Центрально-Азиатского складчатого пояса: Аргунский срединный массив, Селенгино-Становую и Забайкальскую складчатые области, Байкальскую рифтовую зону и в северо-западной части выходит в Ангаро-Ленскую моноклизу Сибирской платформы. На юго-восточном (Забайкальском) и северо-западном (Байкало-Патомском) фрагментах профиля по методике точечных дифференциальных сейсмических зондирований с использованием взрывов и мощных 40-тонных вибраторов отработаны детальные системы наблюдений глубинного сейсмического зондирования. В юго-восточной части профиля (Забайкальский фрагмент) выявлена небольшая мощность земной коры (~40 км) при практически горизонтальном залегании границы Мохоровичича и высокая скорость продольных волн (~8.4 км/с) под ней. Анализ графиков параллельности и динамической выразительности преломленной волны от границы Мохоровичича позволил предположить наличие высокоскоростного слабоградиентного слоя мощностью не менее 5–10 км ниже границы Мохоровичича. По территории Забайкалья были собраны данные о ~200 временах пробега волн от крупных землетрясений, преломленных на границе Мохоровичича на удалениях ~200–1400 км. В рамках томографической интерпретации, с использованием дополнительных сведений о границе Мохоровичича по данным ГСЗ, построены площадные карты распределений граничной скорости по границе Мохоровичича на территории Забайкалья. Привлечение данных сейсмологии позволило оконтурить участок площади с высокими значениями скорости в подкоревой мантии центральной части Монголо-Охотского орогенного пояса и сопредельных складчатых структур Забайкалья. На основе анализа полученных сейсмических данных и геологических сведений по региону исследований высказано предположение, что в районе Монголо-Охотского орогенного пояса высокоскоростной слой мантии может быть представлен пластинами эклогитоподобных пород.

**Ключевые слова:** профиль ГСЗ; скорость продольных волн; годографы от взрывов и землетрясений; граница Мохоровичича; Монголо-Охотский орогенный пояс

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Территория Забайкалья хорошо изучена геофизическими методами, в особенности методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) [Puzyrev, 1981, 1993; Mishen'kin et al., 1999; Seleznev et al., 2003; Suvorov et al., 2002]. Главным образом это относится к западной и северной части Забайкалья в пределах Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). По результатам работ ГСЗ 70–80-х годов прошлого столетия были составлены детальные карты глубины залегания подошвы земной коры (поверхно-

сти Мохоровичича) и скорости продольных волн непосредственно под ней [Puzyrev, 1981; Mishen'kin et al., 1999; Suvorov et al., 2002]. Согласно [Puzyrev, 1981; Mishen'kin et al., 1999; Suvorov et al., 2002], толщина коры в среднем составляет 40 км (от 35 до 45 км), а скорость под корой изменяется от пониженных значений 7.7–7.8 км/с в пределах БРЗ до нормальных значений 8.1–8.2 км/с за ее границей. Практически неизученной до настоящего времени оставалась юго-восточная часть Забайкалья. В 2014–2015 гг. Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН совместно с ООО «Геотех» и АО «СНИИГГиМС»

по заданию Федерального агентства по недропользованию (Роснедра) на опорном геофизическом профиле 1-СБ (Восточный) по маршруту п. Среднеаргунск – п. Усть-Каренга – г. Таксимо – п. Витим, протяженностью свыше 1200 км, проведены глубинные сейсмические исследования методом ГСЗ с использованием взрывов в озерах и 40-тонных вибраторов в качестве источников возбуждения. В статье представлены материалы сейсмических исследований границы Мохоровичича на юго-восточном (Забайкальском) фрагменте опорного профиля 1-СБ (восточный участок), пересекающем крупные тектонические структуры Центрально-Азиатского складчатого пояса: Аргунский срединный массив, Селенгино-Становую и Забайкальскую складчатые области (рис. 1, а). Представлены также кинематические годографы по Байкало-Патомскому фрагменту профиля 1-СБ, пересекающему в северной части Байкальскую рифтовую зону. Результаты профильных исследований методом ГСЗ в Прибайкалье и Забайкалье дополнены данными о распределении скорости непосредственно под границей Мохоровичича (граничной скорости). Данные получены при площадной томографической интерпретации времен пробега преломленной на этой границе волны от землетрясений (рис. 1, б).

## 2. ИЗУЧЕНИЕ ГРАНИЦЫ МОХОРОВИЧИЧА НА ПРОФИЛЕ 1-СБ (ЗАБАЙКАЛЬСКИЙ ФРАГМЕНТ)

Работы ГСЗ на 640-километровом профиле выполнялись по методике точечных дифференциальных сейсмических зондирований [Fedynsky, Kosminskaya, 1978]. Была реализована достаточно плотная система наблюдений (рис. 1), с расстояниями в среднем 15–30 км между источниками возбуждения (взрывы в озерах массой заряда 3–6 т, мощные вибраторы) и в среднем 4–5 км между регистрирующими станциями (РОСА, Байкал) с группами вертикальных приборов СВ-5 и SerselSG-5 и 20 км – с трехкомпонентными приборами GS-20DX.

Для определения граничной скорости под границей Мохоровичича (М) использовались годографы преломленных продольных волн на удалениях ~200–350 км; с отдельных годографов (ПВ 10, 12, 21, 22) были зарегистрированы преломленные волны от границы М на удалениях до 400–500 км (рис. 2, а, б). Анализ протяженных годографов преломленных волн показывает, что резких изломов годографов (к более высоким значениям скорости) не происходит даже на удалениях свыше 450 км.

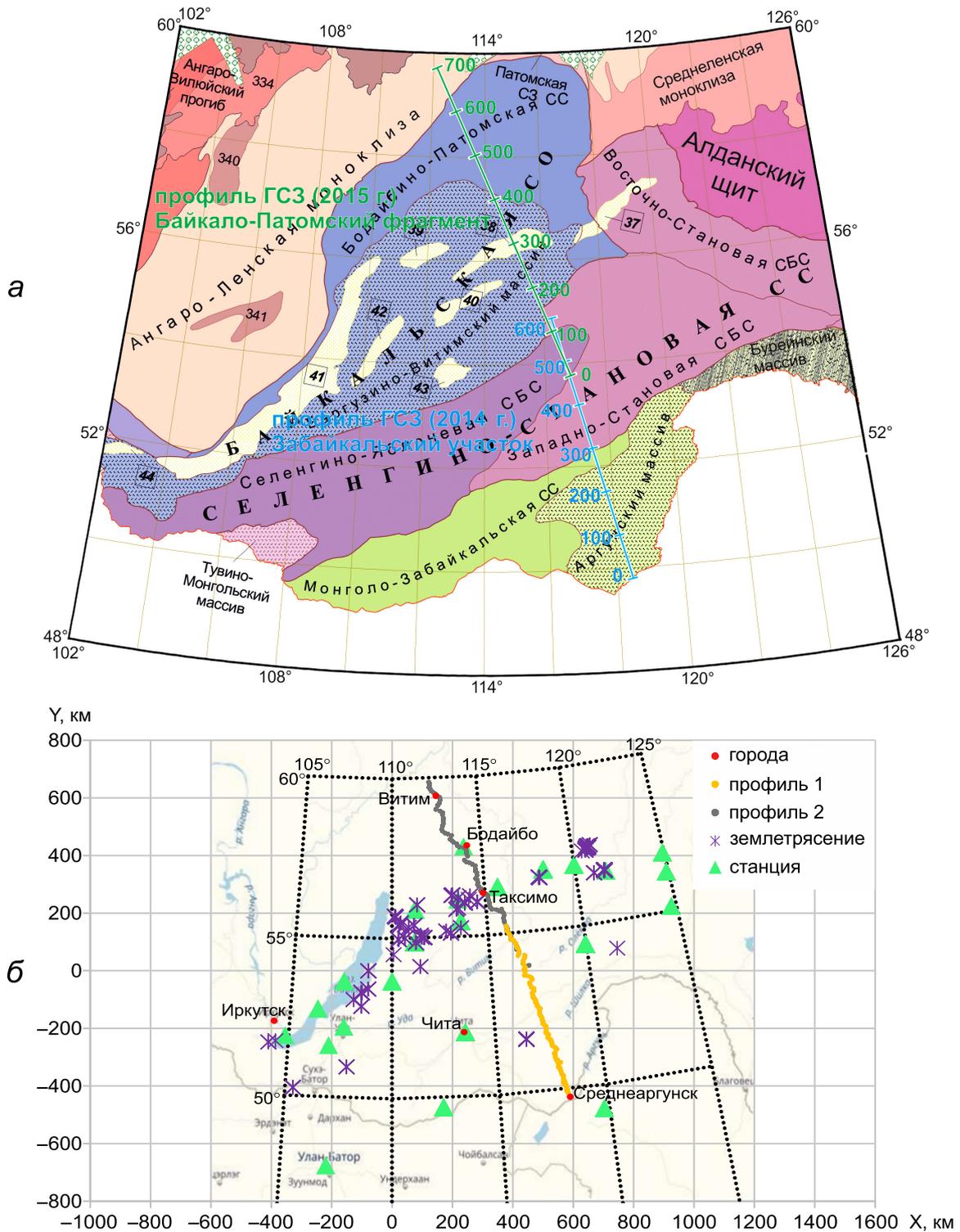
На основании графиков параллельности для ПВ 2, ПВ 4 в прямом и ПВ 22, ПВ 18 во встречном направлении (рис. 2, в) установлено, что в пределах протяженной совместной области прослеживания

(~110–170 км) годографы не сходятся. При этом отмечается разброс значений разности редуцированных времен в пределах 0.10–0.15 с, что практически соответствует погрешности определения времен вступлений на удалениях 200–400 км. Отсутствие схождения годографов на таких больших расстояниях свидетельствует о наличии высокоскоростного слабоградиентного слоя, расположенного ниже границы М. Мощность такого слоя должна быть не меньше 5–10 км, что следует из динамической выразительности преломленной волны ( $P_{пр}^M$ ) на этой границе.

По годографам  $P_{пр}^M$ -волн, достроенным с использованием начальных точек отраженных волн от границы М (рис. 2, а, б), были определены графики значений кажущейся скорости в прямом и встречном направлении, осредненные значения кажущейся скорости и граничная скорость (с учетом сейсмического сноса) (рис. 3) [Seleznev et al., 1987; Soloviev et al., 2014].

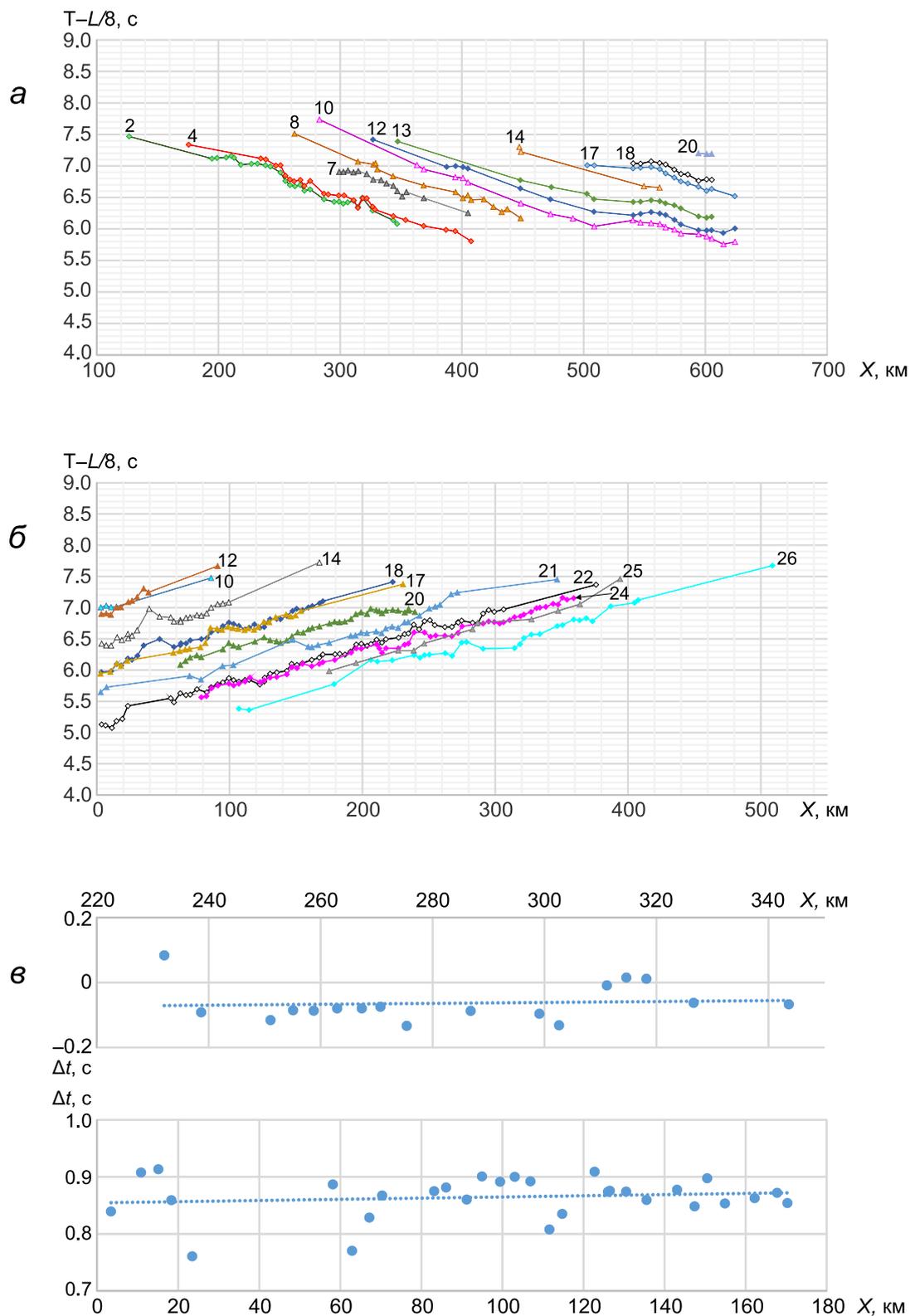
По данным продольных отраженных волн от поверхности Мохоровичича ( $P_{отр}^M$ -волн) на профиле 1-СБ (восточный участок, забайкальский этап) определялась средняя (эффективная) скорость продольных волн для всей толщи земной коры ( $V_{эф}$ ). С учетом высокой плотности годографов  $P_{отр}^M$ -волн (рис. 4, а) определение  $V_{эф}$  производилось по центрам зондирований (рис. 4, б) (согласно технике вычислений, описанной в работе [Soloviev et al., 2014]) и по сводному годографу в квадратичных координатах (рис. 4, в). Осредненные значения эффективной скорости продольных волн в земной коре оказались достаточно близки по разным определениям и составили  $6.4 \pm 0.1$  км/с. Наибольший разброс данных при определении по центрам зондирований получен на северо-западном участке профиля, что связано с невысокой плотностью наблюдений.

Глубины до поверхности Мохоровичича на исследуемом профиле определялись с использованием данных отраженных и преломленных волн от границы М в рамках простых соотношений: для отраженных волн  $H = \sqrt{((V_{эф} \cdot t)^2 - l^2) / 4}$ , где  $H$ ,  $V_{эф}$ ,  $t$ ,  $l$  – соответственно глубина до границы М, эффективная скорость продольных волн в земной коре, время пробега отраженных волн от границы М и удаление; для преломленных волн  $H = (t - l / V_{г}) \cdot (V_{эф} / 2 \cos(i))$ , где  $H$ ,  $V_{эф}$ ,  $t$ ,  $l$ ,  $V_{г}$  – соответственно глубина до границы М, эффективная скорость продольных волн в земной коре, время пробега преломленных волн от границы М, удаление и граничная скорость по границе М,  $i = \arcsin \left( \frac{V_{эф}}{V_{г}} \right)$  [Fedynsky, Kosminskaya, 1978]. При расчетах использовались представленные выше осредненные зна-



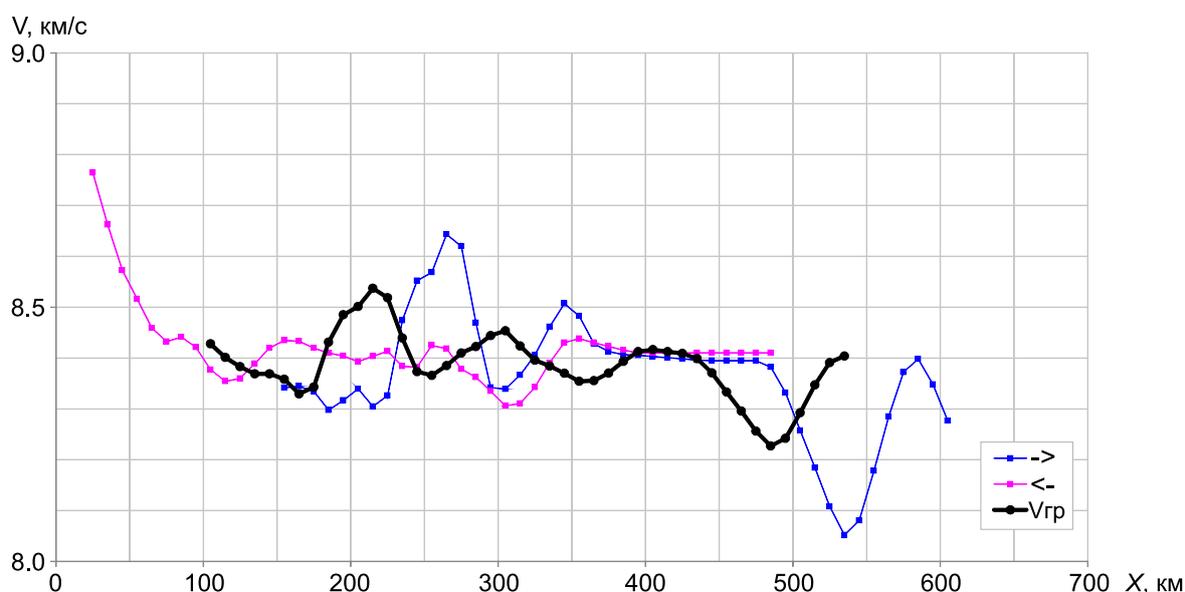
**Рис. 1.** Район исследований границы Мохоровичича в Забайкалье. *а* – схема тектонического районирования согласно [Petrov, 2012] в полосе опорного профиля 1-СБ (восточный участок). Цифрами на карте представлены структурные элементы Байкальской рифтовой системы: 37 – Чарско-Чаруодинская рифтогенная впадина, 38 – Муйская рифтогенная впадина, 39 – Верхнеангарская рифтогенная впадина, 40 – Ципинская рифтогенная впадина, 41 – Байкальский рифт, 42 – Баргузинская рифтогенная впадина, 43 – Амалатское лавовое поле, 44 – Киренская рифтогенная впадина, 334 – Ярославско-Олгуйдахская гряда, 340 – Илимская впадина, 341 – Илгинская впадина; *б* – схема площадных сейсмологических наблюдений.

**Fig. 1.** The Moho study area in Transbaikalia, Russia. *a* – scheme of tectonic zoning (after [Petrov, 2012] in the band of Reference Profile 1-SB (Eastern section). The structural elements of the Baikal rift system are numbered: 37 – Chara-Charuodin rift valley, 38 – Muya rift valley, 39 – Upper Angara rift valley, 40 – Tsipa rift valley, 41 – Baikal rift, 42 – Barguzin rift valley, 43 – Amalat lava field, 44 – Kirensk rift valley, 334 – Yarosimo-Olguydakh ridge, 340 – Ilim depression, 341 – Ilga depression; *б* – scheme of the area covered by seismicological observations.



**Рис. 2.** Интерпретация преломленных волн от поверхности Мохоровичича на профиле 1-СБ (восточный участок, забайкальский этап). а, б – редуцированные годографы преломленных волн от границы Мохоровичича с начальными точками по данным отраженных волн в прямом и встречном направлении, соответственно; в – графики параллельности для ПВ 2, ПВ 4 (верхний график) в прямом и ПВ 22, ПВ 18 (нижний график) во встречном направлении (по оси X – километраж по профилю ГСЗ, по оси Y – различие редуцированных времен).

**Fig. 2.** Interpretation of the refracted waves from the Moho in Profile 1-SB (Eastern section, Transbaikalia stage). а, б – reduced hodographs of refracted waves from the Moho with initial points according to the reflected waves in the forward and opposite directions, respectively; в – parallelism graphs for ПВ 2, ПВ 4 (upper graph) in the forward direction, and ПВ 22, ПВ 18 (lower graph) in the opposite direction (axis X – kilometers along the DSS profile; axis Y – reduced time difference).



**Рис. 3.** Определение граничной скорости преломленных волн под границей Мохоровичича на профиле 1-СБ (восточный участок, забайкальский этап): графики кажущейся скорости в прямом и встречном направлении и граничной скорости под границей М (выделена черным цветом), соответственно.

**Fig. 3.** Determination of the threshold velocity of refraction waves beneath the Moho in Profile 1-SB (Eastern section, Transbaikalia stage): curves of the apparent velocity in the forward and opposite directions and the threshold velocity beneath the Moho (highlighted in black), respectively.

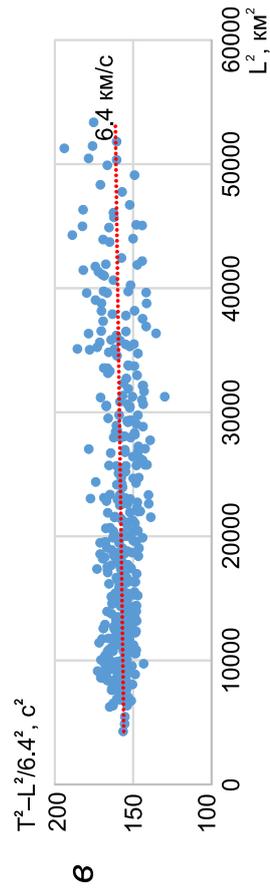
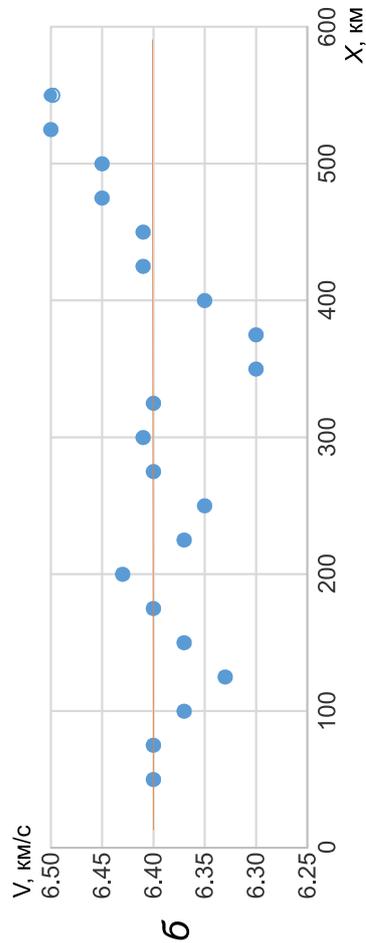
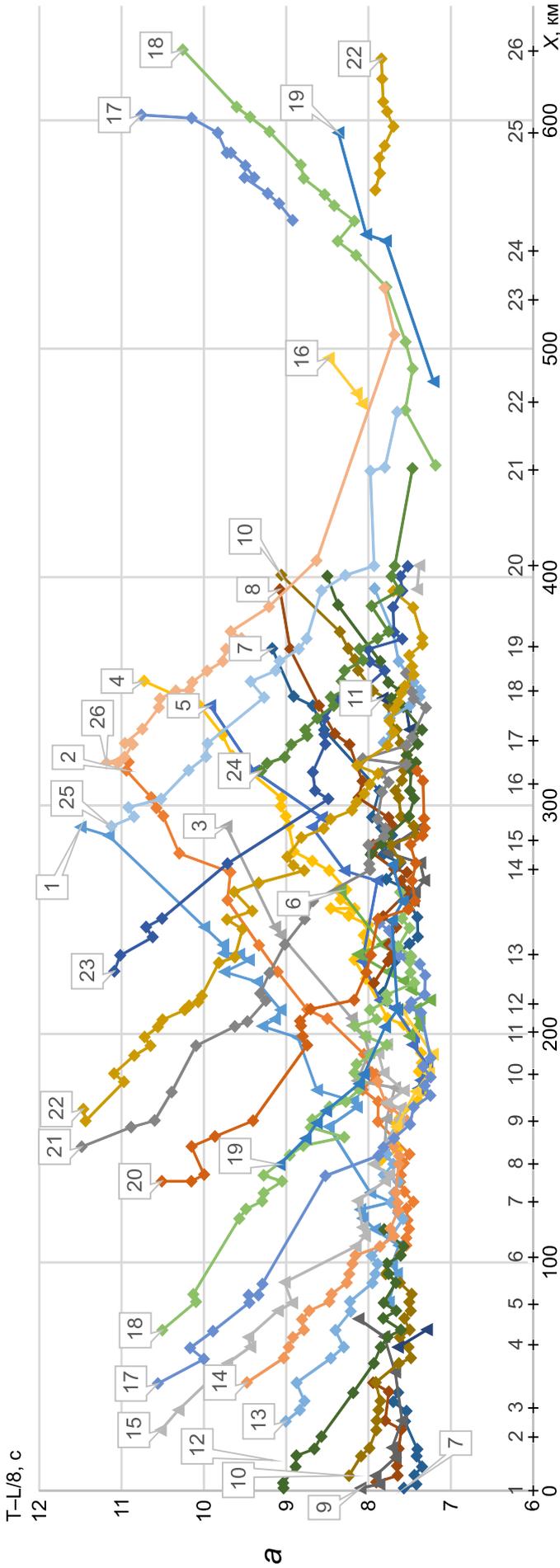
чения скоростей продольных волн в земной коре (дополнительно сглаженные окном в 50 км). Граничная скорость усреднялась на участке пробега вдоль границы Мохоровичича по данным, представленным на рис. 3.

Результаты изучения границы Мохоровичича на профиле 1-СБ (восточный участок, забайкальский этап) представлены на глубинном сейсмическом разрезе на рис. 5. Одной из особенностей глубинного сейсмического разреза на Забайкальском участке профиля 1-СБ является практически плоское горизонтальное залегание границы Мохоровичича (на глубинах  $\sim 40$  км) с высокими значениями граничной скорости 8.3–8.5 км/с. Эффективная скорость распространения сейсмических волн в земной коре составляет  $6.4 \pm 0.1$  км/с. Наиболее высокие значения граничной скорости Р-волн (до 8.55 км/с) непосредственно под корой отмечаются на северо-западном участке Газимурского блока ( $X=190$ – $240$  км на рис. 5); несколько пониженные значения граничной скорости Р-волн вдоль границы М (8.25–8.30 км/с) отмечены в северной части Витимо-Урюмского блока на северо-западе профиля ( $X=465$ – $505$  км). Полученные на Забайкальском участке профиля ГСЗ высокие значения граничной скорости ранее при глубинных сейсмических исследованиях не отмечались [Puzyrev, 1981; Mishen'kin et al., 1999; Seleznev et al., 2003; Suvorov et al., 2002], что вызывает повышенный интерес геоло-

гов и геофизиков к этому участку, диктуя необходимость дальнейшего его изучения и, в первую очередь, площадного оконтуривания высокоскоростного блока подкоровой мантии.

### 3. ПЛОЩАДНЫЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ПО ГРАНИЦЕ М В ЗАБАЙКАЛЬЕ

С целью локализации высокоскоростного блока под границей Мохоровичича в Забайкалье проводилось площадное изучение граничной скорости с использованием данных землетрясений. В обработке было использовано около 200 времен пробега преломленной на границе М продольной волны на удалениях от 200 до 1470 км из базы сейсмологических данных Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН за период с 2002 по 2014 г. [Masalsky et al., 2007; International Seismological Centre, 2017]. Эти данные отличаются высокой точностью, поскольку были получены на цифровой регистрирующей аппаратуре от крупных землетрясений с энергетическим классом  $K$  от 12.0 до 15.9 ( $M \sim 4.5$ – $6.5$ ); для них были определены с высокой точностью эпицентры и с меньшей точностью (в среднем не грубее чем  $\pm 5$  км) – глубины землетрясений. Лучевая схема, иллюстрирующая площадное освещение изучаемого участка данными от землетрясений, представ-



**Рис. 4.** Интерпретация отраженных волн от границы Мохоровичича на профиле 1-СБ (восточный участок, Забайкальский этап). *а* – редуцированные голографы отраженных волн от границы М; *б*, *в* – определение эффективной скорости продольных волн в земной коре ( $V_{\phi}$ ) по центрам зондирования (окно 50 км, шаг 25 км) и по сводному редуцированному голографу в квадратичных координатах, соответственно.

**Fig. 4.** Interpretation of the reflected waves from the Moho in Profile 1-SB (Eastern section, Transbaikalia stage). *a* – reduced hodographs of the reflected waves from the Moho; *б*, *в* – determination of the effective velocity of the longitudinal waves in the crust ( $V_{\phi}$ ) at the seismic sounding centers (box: 25 km) and the composite reduced hodograph in quadratic coordinates, respectively.

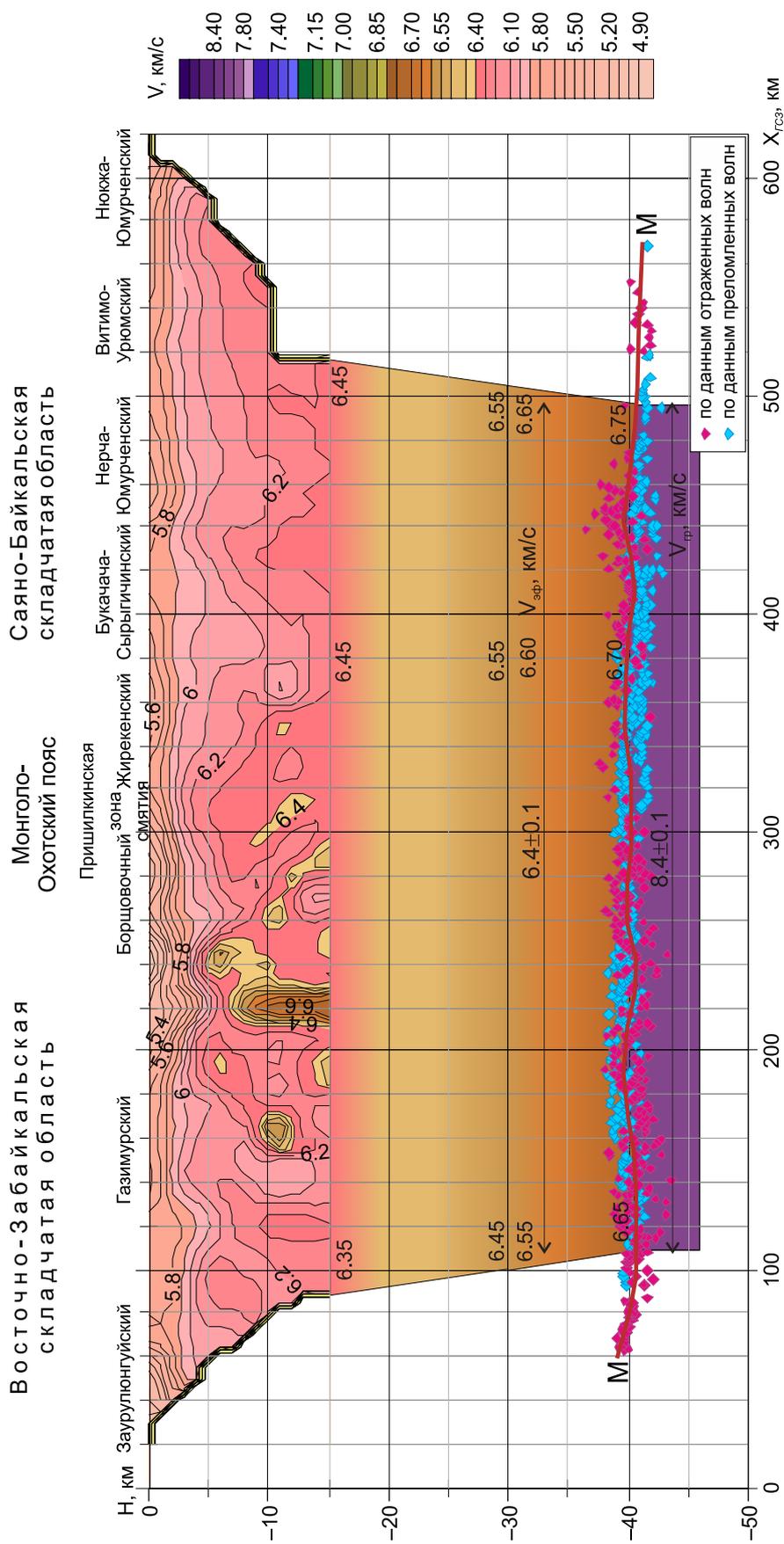


Рис. 5. Глубинный сейсмический разрез по профилю 1-СБ (Забайкальский участок).

Fig. 5. Deep seismic section in Profile 1-SB (Transbaikalia).

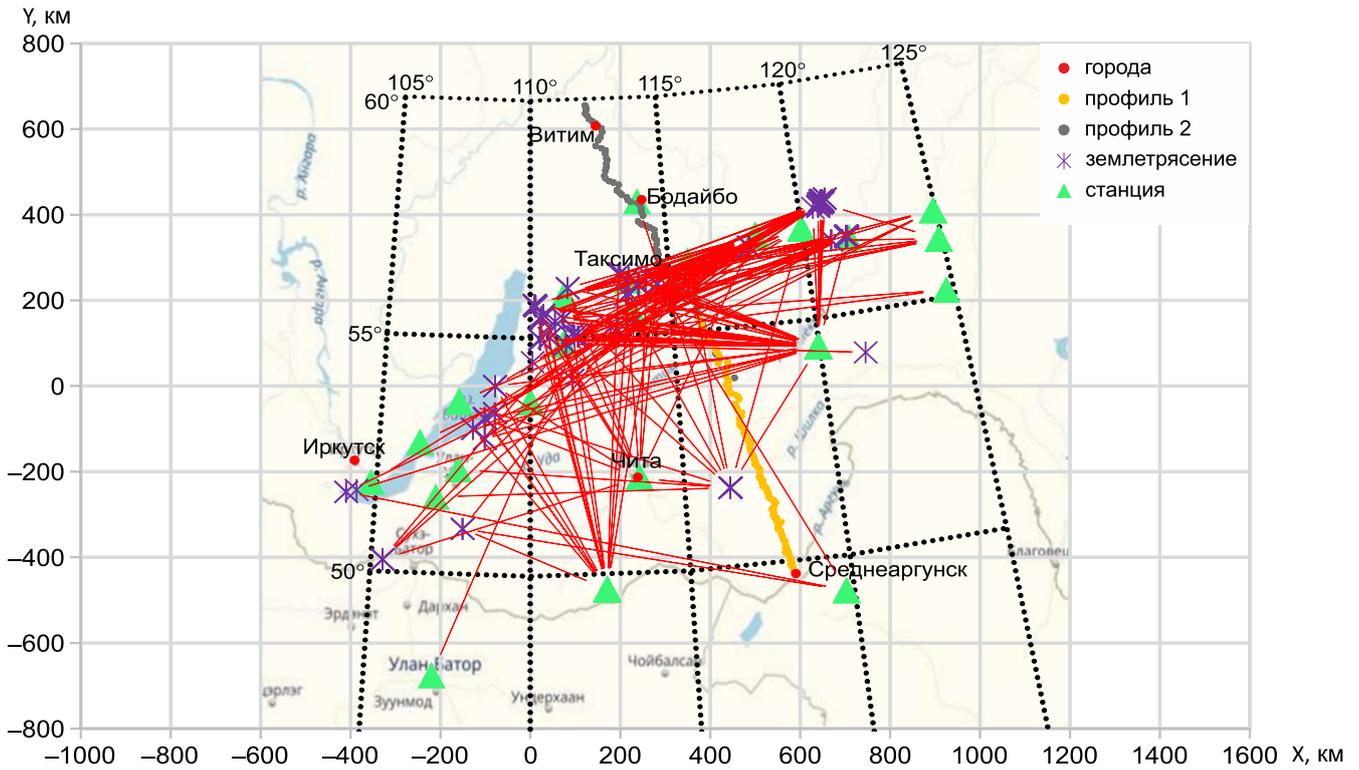


Рис. 6. Лучевая схема сейсмологических наблюдений в Прибайкалье и Забайкалье.

Fig. 6. Radial diagram of seismic observations in Pribaikalie and Transbaikalia.

лена на рис. 6. Для расчетов томографических моделей географические координаты землетрясений и регистрирующих станций были пересчитаны в плоскую прямоугольную систему координат с ортографической (азимутальной) проекцией с началом координат в точке 110°E и 54°N. Видно, что наиболее полно данные о временах пробега волн от границы М представлены для западного и северного участков Забайкалья. Из анализа материалов ГСЗ прошлых лет [Puzyrev, 1981; Mishen'kin et al., 1999; Seleznev et al., 2003; Suvorov et al., 2002] и представленных выше данных по Забайкальскому участку профиля 1-СБ следует, что средние глубины до границы М составляют 40 км, а средние скорости в земной коре ( $V$ ) – 6.4 км/с. С использованием этих данных и сведений о глубинах гипоцентров землетрясений по каждому отрезку (эпицентр землетрясения – сейсмостанция) в рамках простых соотношений из работы [Soloviev et al., 2016] определялись значения граничной скорости ( $V_r$ ) по границе М:

$$V_r = \frac{L}{t - \frac{(2H-h) \cos(i)}{V}}, \quad (1)$$

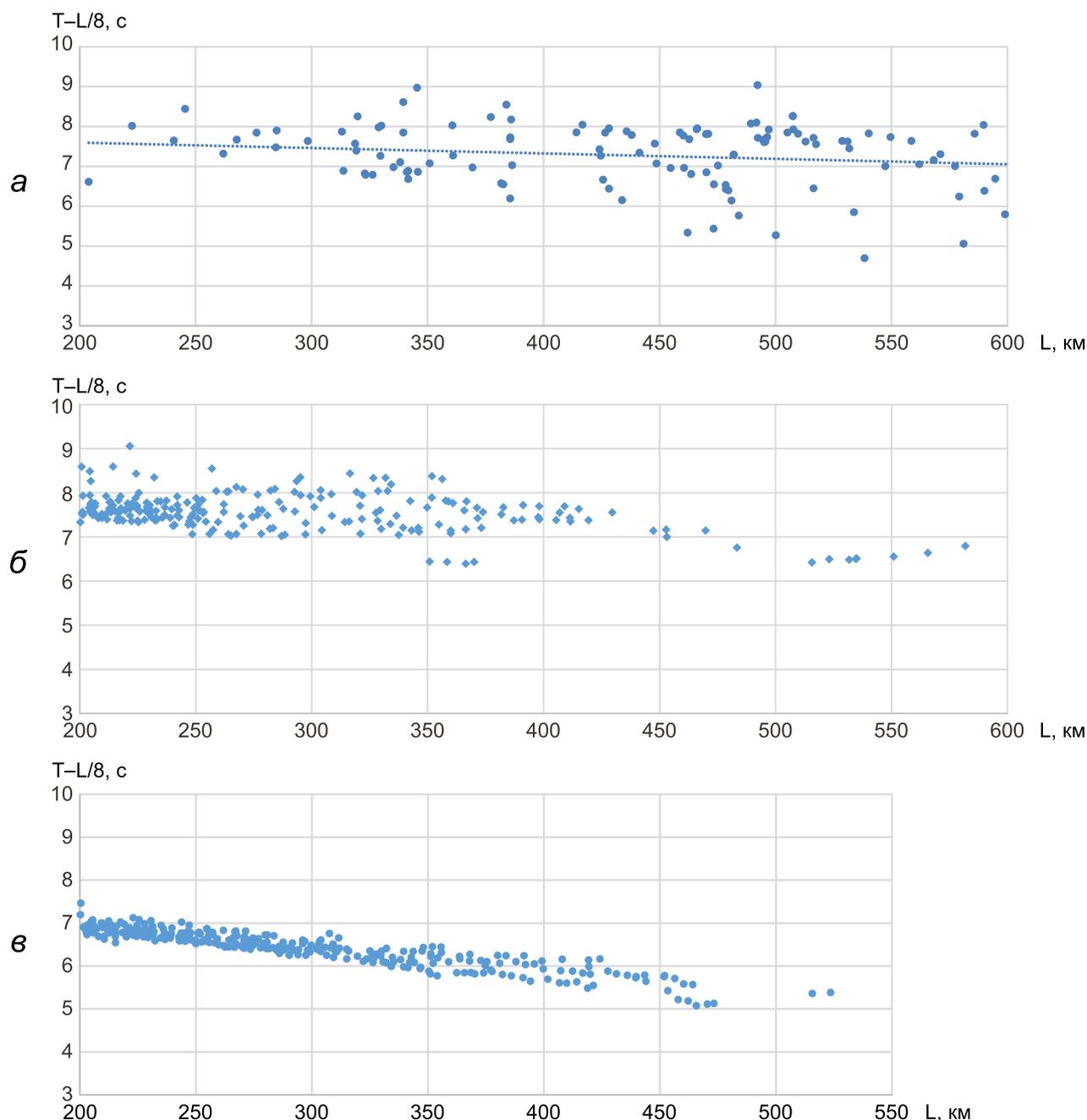
где  $i = \arcsin\left(\frac{V}{V_r}\right)$ .  $L$ ,  $t$ ,  $H$  и  $h$  – эпицентральное расстояние, время пробега от гипоцентра до сейсмо-

станции, глубина до границы М и глубина очага землетрясения, соответственно. Покрывающая среда при этом предполагается однородной, а граница – плоской и горизонтальной.

Эти же данные (средние скорости в коре, средняя глубина до границы М, данные времен от землетрясений, сведения о глубинах и координатах землетрясений) позволяют ввести поправку за глубину очага во времена вступления продольных волн от границы М и построить сводный годограф от землетрясений для территории Прибайкалья и Забайкалья. Разность времен одной и той же головной волны от поверхностного и заглубленного источников от  $k$ -того события до приемных  $j$ -станций ( $t_{kj}^0$ ) связана с глубиной гипоцентра ( $h$ ) следующим соотношением:

$$t_{kj}^0 = \frac{h}{V} \cos(i), \text{ где } i = \arcsin\left(\frac{V}{V_r}\right). \quad (2)$$

Ниже приведены фрагменты сводных годографов продольной преломленной волны от границы Мохоровичича, полученные как от данных регистрации землетрясений на площадной сейсмологической сети, так и от данных с Забайкальского и Байкало-Патомского участков профиля 1-СБ от взрывов и мощных вибраторов (рис. 7). Из представленного рисунка видно, что достаточно близ-

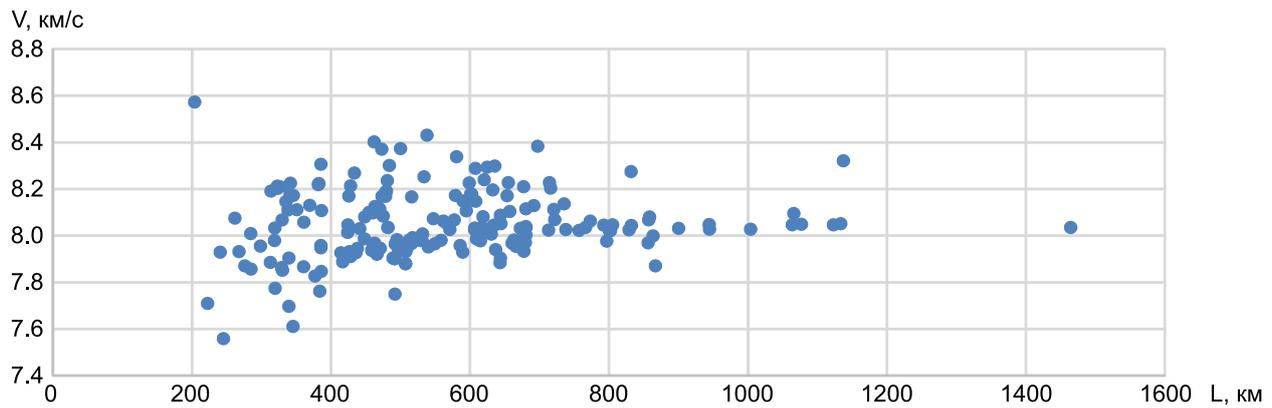


**Рис. 7.** Редуцированные годографы продольных преломленных волн от границы Мохоровичича от землетрясений, химических взрывов и мощных вибраторов. *a* – данные от землетрясений, полученные на площадной сейсмологической сети в Забайкалье (см. рис. 6); *б, в* – данные от взрывов и вибраторов, полученные на Байкало-Патомском и Забайкальском фрагментах профиля 1-СБ, соответственно.

**Fig. 7.** Reduced hodographs of the longitudinal refracted waves from the Moho from earthquakes, chemical explosions and strong vibrators. *a* – earthquake data obtained by the areal seismic network in Transbaikalia (see Fig. 6); *б, в* – data from explosions and vibrators in the Baikal-Patom and Transbaikalia fragments of Profile 1-SB, respectively.

кие годографы получены от землетрясений и по данным ГСЗ на Байкало-Патомском фрагменте профиля 1-СБ (рис. 7, *a, б*). Осредненные значения кажущейся скорости по ним также близки и составляют  $8.0 \pm 0.2$  км/с. Большой разброс значений времен на этих годографах (в особенности на годографе от землетрясений) обусловлен разнородно-

стью данных, полученных как с большой территории, так и с участков с различным строением зоны перехода кора-мантия, и, соответственно, скоростным строением (нормальная и аномальная мантия) (по [Puzyrev, 1981; Mishen'kin et al., 1999; Seleznev et al., 2003; Suvorov et al., 2002]). Значительно отличается от этих данных сводный годограф продольной



**Рис. 8.** Значения кажущейся скорости  $P_{\text{пр}}^M$ -волны для разных эпицентральных расстояний в Прибайкалье и Забайкалье.

**Fig. 8.** The apparent velocity values of  $P_{\text{пр}}^M$ -wave for different epicentral distances in Pribaikalie and Transbaikalia.

преломленной волны от границы М, полученный на Забайкальском участке профиля 1-СБ (рис. 7, в). По сравнению с годографами на рис. 7, а, б, здесь, при общем понижении примерно на 1 секунду, существенно меньше разброс значений редуцированных времен, а осредненные значения скорости по годографу повышены и составляют  $8.4 \pm 0.1$  км/с. Эти данные еще раз указывают на обособленность по скоростному строению мантии центрального участка Забайкальского фрагмента профиля 1-СБ от прилегающих территорий.

С целью его пространственной локализации по сейсмологическим данным проведена оценка значений кажущейся скорости  $P_{\text{пр}}^M$ -волны для различных интервалов регистрации и выполнена площадная томографическая интерпретация годографов от землетрясений.

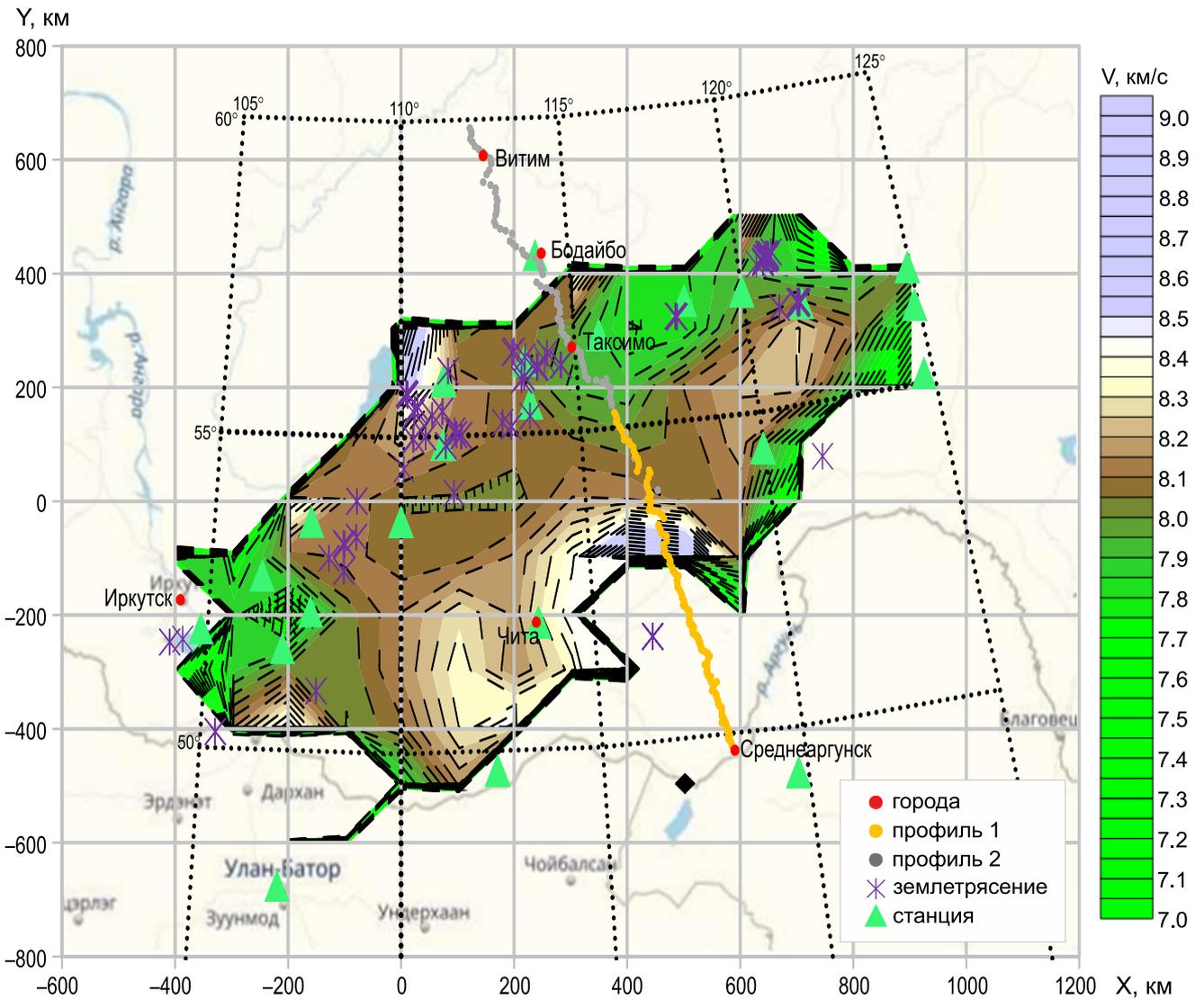
Из представленного на рис. 8 графика всей совокупности распределения кажущейся скорости (рассматриваемой, в первом приближении, как распределение граничной скорости  $P_{\text{пр}}^M$ -волны, вычисленной по формуле (1) для нарастающих интервалов регистрации), видно, что до удалений в 700 км отмечается значительный разброс данных. В интервале удалений 200–400 км значения скорости находятся в пределах 7.6–8.3 км/с, а на удалениях до 400–600 км они несколько повышены и составляют 7.8–8.4 км/с. На больших интервалах удалений (от 800 до 1200–1470 км) разброс существенно уменьшен и (за исключением пары точек) не превышает 0.1 км/с; значение скорости при этом составляет  $\sim 8.05$  км/с. Представленный график указывает на два обстоятельства: существенное влияние аномальной низкоскоростной мантии на удалениях до 600 км и наличие одного или нескольких непротяженных высокоскоростных блоков по границе М со скоростью 8.2–8.6 км/с. Наличие же протяженного

высокоскоростного блока по границе М в Прибайкалье и Забайкалье существенно бы подняло значение скорости на удалениях свыше 800 км. Была выполнена оценка влияния ошибок в определении глубин землетрясений на значения кажущейся скорости  $P_{\text{пр}}^M$ -волны для разных удалений. Для единичных определений ошибка в определении времен в  $\pm 0.5$  секунды (за счет средних ошибок в глубине гипоцентра  $\sim \pm 5$  км) приведет к ошибкам в значениях скорости  $\sim \pm 0.15$  км/с на малых базах (200–400 км) и к менее значительным ошибкам  $\sim \pm 0.05$  км/с на больших удалениях – 800–1200 км. При осреднении данных ошибки в определении скорости  $P_{\text{пр}}^M$ -волны за счет ошибок в глубинах гипоцентров будут существенно (в  $\sqrt{n}$ , где  $n$  – количество определений) меньше, в особенности для больших удалений.

Полученные значения граничной скорости на отрезках лучей в пределах площади на рис. 6 были использованы для дальнейшей томографической интерпретации. Первоначально в исходные времена и расстояния вводились поправки за сейсмический снос, чтобы полученные таким образом времена относились к участку пробега по границе М. Площадь была разбита на равные квадраты со стороной 200 км. Далее была составлена система уравнений:

$$t_i = \sum_j \frac{a_{ij}}{V_j}, \quad (3)$$

где  $t_i$  – времена пробега волны вдоль  $i$ -го луча по границе М;  $a_{ij}$  – длина сегмента  $i$ -го луча в  $j$ -м блоке разбиения поверхности М;  $\sum_j a_{ij} = l_i$  – длина  $i$ -го луча по границе М;  $V_j$  – неизвестная граничная скорость на поверхности мантии в  $j$ -м блоке разбиения поверхности. После ввода замены



**Рис. 9.** Схема распределения граничной скорости по поверхности Мохоровичича, полученная при томографической инверсии системы уравнений (5) методом QR-разложения.

**Fig. 9.** The pattern of the threshold velocity on the Moho, according to the tomographic inversion of the system of equations (5) by the QR decomposition.

$$x_j = \frac{1}{v_j} \quad (4)$$

система (3) приобретает вид:

$$t_i = \sum_j a_{ij} x_j. \quad (5)$$

Полученная система (5) является разреженной (большое число нулевых значений) и переопределенной (уравнений намного больше, чем неизвестных). Существуют разные способы решения подобных систем. В представленной работе использовано два способа: QR-разложение [Bakhvalov, 1988] и метод регуляризации [Nolet, 1987].

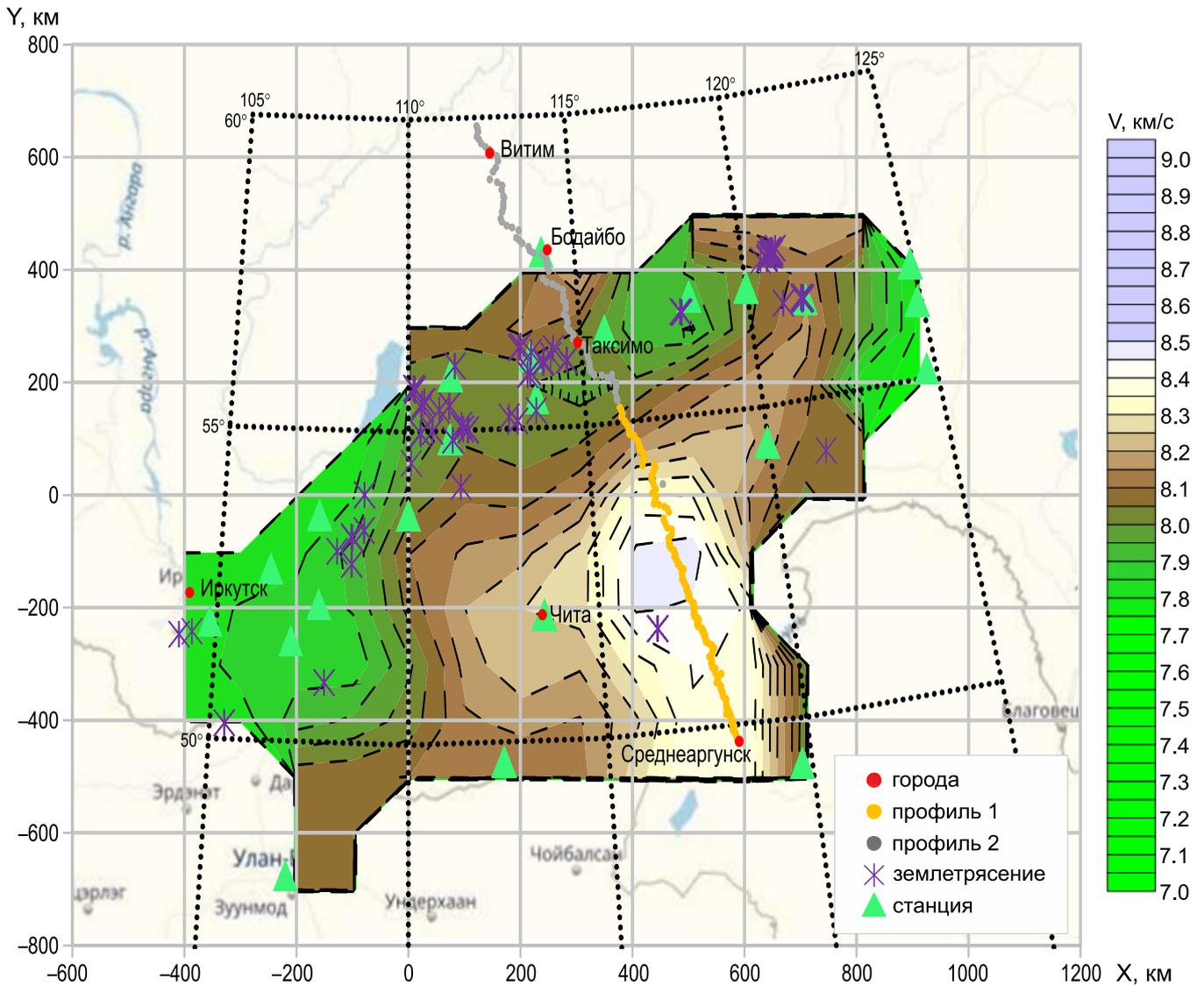
Метод QR-разложения используется для приближения методом наименьших квадратов. Риском

решения системы этим методом является возможное большое число обусловленности. На рис. 9 приведено решение данным методом для всех лучей.

Вторым способом решения является метод регуляризации. Данный метод – это способ предотвратить влияние экспериментальных ошибок в правом столбце на решение. Вместо (5) решается задача:

$$\begin{bmatrix} A \\ \lambda I \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $dt$  – разница экспериментального времени и времени, рассчитанного по референтной модели среды. Значения скоростей для референтной модели основаны на схемах распределения граничной



**Рис. 10.** Схема распределения граничной скорости по поверхности Мохоровичича, полученная при томографической инверсии системы уравнений (6) методом регуляризации (с использованием референтной модели).

**Fig. 10.** The pattern of the threshold velocity on the Moho, according to the tomographic inversion of the system of equations (6) by the regularization method (using the reference model).

скорости на поверхности мантии, полученной методом ГСЗ в 70–80-х годах прошлого столетия для территории Байкальской рифтовой зоны, юга Сибирской платформы и разновозрастных складчатых областей Прибайкалья и Забайкалья [Puzyrev, 1981, 1993; Mishen'kin et al., 1999; Seleznev et al., 2003; Suvorov et al., 2002], и данных профиля 1-СБ 2014–2015 гг. [Solov'ev et al., 2016; Soloviev et al., 2017].

Из (6) находится решение системы

$$x = [A^T A + \lambda^2 I]^{-1} A^T dt, \tag{7}$$

где  $x$  – отличие медленности (величина, обратная скорости), искомой от референтной модели. Искомая скорость находится следующим способом:

$$V_j \approx V_j^0 - x_j (V_j^0)^2. \tag{8}$$

Полученное распределение граничной скорости методом регуляризации представлено на рис. 10.

Анализ результатов расчетов граничной скорости разными способами показывает, что метод QR-разложения дает более контрастную карту распределения граничной скорости. Различие минимальных и максимальных значений скорости на исследуемой площади составляет более 1.25 км/с, что в полтора раза выше, чем на карте граничной скорости, полученной методом регуляризации. При сравнении данных, полученных разными методами, более высокие значения граничной скорости Р-волн (до 0.33 км/с) получены методом QR-разло-

жения в центральной части площади (в пределах Забайкальского фрагмента профиля 1-СБ); более низкие значения скорости получены методом *QR*-разложения по сравнению с данными, полученными методом регуляризации (от 0.29 до 0.63 км/с) в северо-восточной части площади. Примерно в половине точек площади получены достаточно близкие значения скорости разными способами (не более  $\pm 0.1$  км/с).

К чисто модельным погрешностям построенных карт распределений граничной скорости следует отнести частичное выпадение непротяженных участков площади с пониженной скоростью на границе Мохоровичича (участков аномальной мантии со скоростью 7.7–7.9 км/с и мощностью слоев в 10–15 км). По данным [Puzyrev, 1981, 1993; Mishen'kin et al., 1999; Suvorov et al., 2002], в годографах сейсмических волн в Забайкалье продольная волна от слоя пониженной скорости («аномальной мантии») и небольшой мощности прослеживается до удалений 280–300 км. Далее она сменяется волной от границы  $M_1$  с нормальной скоростью в 8.0–8.2 км/с [Puzyrev, 1981; Mishen'kin et al., 1999]. Фактически на этих участках мы имеем дело с двухслойной моделью верхней мантии. При использовании для томографии отрезков годографов для расстояний до 1000 км и более в результатах интерпретации в большей мере будет присутствовать информация о скорости по границе нормальной мантии. В Прибайкалье (район оз. Байкал) слой аномальной мантии сильно увеличен [Puzyrev, 1993] и длина годографов менее сказывается на результатах определения граничной скорости. В настоящей работе были выполнены расчеты с максимальными удалениями от землетрясений не более 600 км. На ряде участков БРЗ были получены более низкие значения скорости продольных волн по границе М, близкие к значениям в референтной модели, построенной по данным ГСЗ, и адекватно отражающие аномальную мантию данных участков.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на присутствие модельных погрешностей, результаты региональных сейсмических исследований вдоль опорного профиля 1-СБ и данные определений глубин землетрясений существенно дополнили построенные ранее карты граничной скорости. В северо-западной части района исследований (в пределах Байкальской рифтовой зоны) и северо-восточной части (Забайкалье) граничные скорости имеют пониженные значения в 7.80–7.95 км/с. В юго-восточной части площади в верхней мантии выделен высокоскоростной мантийный блок с поперечными размерами около

600×600 км. В пределах Забайкальского фрагмента профиля 1-СБ это область сочленения Восточно-Забайкальской и Саяно-Байкальской складчатых областей Центрально-Азиатского складчатого пояса, разделенных Монголо-Охотским поясом (см. рис. 5). Высокоскоростной участок от профиля 1-СБ вытянут в южном и в юго-западном (за Читу) направлении. В целом же, высокоскоростная зона по границе М прослеживается через всю исследуемую площадь с юго-запада на северо-восток (см. рис. 9, 10) и совпадает с простираем Монголо-Охотского орогенного пояса. Центральным звеном последнего является Главный Монголо-Охотский разлом [Milanovsky, 1996; Parfenov et al., 2003]. Установленные при сейсмических исследованиях высокоскоростные неоднородности в верхней части разреза (см. рис. 5) могут являться интрузиями, проникшими в верхнюю кору через указанный глубинный разлом.

В работах [Didenko et al., 2013; Parfenov et al., 2003; Shevchenko et al., 2011] формирование позднепалеозойско-раннемезозойского Монголо-Охотского орогенного пояса связывается с закрытием существовавшего на его месте океанического бассейна и субдукцией океанической коры под смежные континентальные окраины. В зонах субдукции океанической плиты возможно образование глаукофановых сланцев и эклогитов. Последние выступают как химические эквиваленты габбро и базальтов, но превышают их по плотности на 20–25 % [Dobretsov et al., 1989]. Их плотность (3.3–3.7 г/см<sup>3</sup>), а значит и скорость, выше, чем у пород верхней части верхней мантии. Можно предположить, что выделенный по данным сейсмологии и ГСЗ высокоскоростной слой в верхней мантии является пластиной эклогитов (или эклогитоподобных пород) в районе Монголо-Охотского орогенного пояса.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Территория Прибайкалья и Забайкалья в структурно-тектоническом плане является частью крупного Центрально-Азиатского орогенического пояса. Развитие современных представлений о геологическом строении и характере эволюции Центрально-Азиатского складчатого пояса требует привлечения новых данных по глубинной геодинамике, тектонике и магматизму. Чрезвычайно важны при этом сведения по глубинному строению земной коры и верхов мантии по данным геофизических, и прежде всего сейсмических, методов. В последние годы в России и за рубежом главный объем информации о строении литосферы Земли, в том числе о земной коре и верхней мантии, поступает при сейсмотомографических исследованиях.

Распространены также исследования с временными сетями широкополосных станций для получения информации о строении коры и мантии при обработке данных методом обменных волн от землетрясений (МОВЗ). При таких построениях фактически размываются опорные сейсмические границы, такие как поверхность Мохоровичича, с большими погрешностями в определении скорости упругих волн вдоль нее. В то же время в результатах ГСЗ граница М строится очень точно ( $\pm 3\%$ ) по данным отраженных и преломленных волн с распределением вдоль нее скорости упругих волн, с точностью  $\pm 0.1$  км/с. На больших удалениях (400–500 км и более, Западная Якутия, Алтай, Забайкалье) преломленная волна от взрывов от границы М зачастую прослеживается без значительного проницания, фактически как головная. Распределение скорости по границе М можно определять без учета рефракции. В настоящей работе сделана попытка совместной интерпретации данных ГСЗ и сейсмологии для построения площадной карты распределения скорости продольных волн по границе М территории Прибайкалья и Забайкалья. Были использованы данные о двух сотнях времен пробега преломленной волны от границы М от крупных землетрясений (энергетический класс  $K$  выше 12.5), зарегистрированные на удалениях от 200 км до 1400 км. Результаты глубинных сейсмических исследований 70–80-х гг. прошлого столетия и данные профилей ГСЗ 2014–2015 гг. по границе М при этом выступали как опорные. Хотя за счет неравномерного распределения землетрясений и

сейсмостанций по площади недостаточно освещенной по границе М оказалась юго-восточная часть Забайкалья, все же была получена новая площадная информация о распределении скоростей под границей М на значительной территории Прибайкалья и Забайкалья. Привлечение данных сейсмологии позволило оконтурить участок площади с высокими значениями скорости (до 8.4–8.5 км/с) в подкоровой мантии центральной части Монголо-Охотского орогенного пояса и сопредельных складчатых структур Забайкалья. В северо-западной части площади (в пределах Байкальской рифтовой зоны) и северо-восточной части площади исследований установлены пониженные до 7.80–7.95 км/с граничные скорости продольных волн.

Дальнейшее развитие площадных сейсмических исследований территории Прибайкалья и Забайкалья связывается авторами с увеличением плотности сейсмического освещения площади за счет привлечения данных от менее сильных землетрясений, с использованием данных поперечных волн.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность коллегам из Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН, участвующим в регистрации и создании базы сейсмологических данных по Прибайкалью и Забайкалью, а также коллегам из АСФ и СЕФ ФИЦ ЕГС РАН и АО «СНИИГГиМС» за ценные замечания при обсуждении статьи.

## 7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

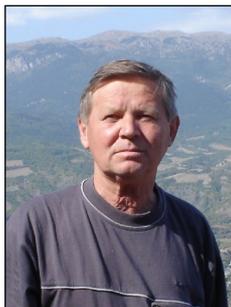
- Bakhvalov N.S.*, 1988. Numerical Methods. Nauka, Moscow, 314 p. (in Russian) [*Бахвалов Н.С.* Численные методы. М.: Наука, 1988. 314 с.].
- Didenko A.N., Efimov A.S., Nelyubov P.A., Sal'nikov A.S., Starosel'tsev V.S., Shevchenko B.F., Goroshko M.V., Gur'yanov V.A., Zamozhnyaya N.G.*, 2013. Structure and evolution of the Earth's crust in the region of junction of the Central Asian fold belt and the Siberian platform: Skovorodino–Tommot profile. *Russian Geology and Geophysics* 54 (10), 1236–1249. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.09.008>.
- Dobretsov N.L., Sobolev N.V., Shatsky V.S., Aschepkov I.V., Bakirov A.B., Gabov N.F., Gilbert A.E., Dobretsova L.V., Kozyreva N.V., Kolcheva K., Sklyarov E.V.*, 1989. Eclogites and Glaucophane Schists in Fold Areas. Siberian Branch, Nauka, Novosibirsk, 236 p. (in Russian) [*Добрецов Н.Л., Соболев Н.В., Шацкий В.С., Ащепков И.В., Бакиров А.Б., Габов Н.Ф., Гильберт А.Э., Добрецова Л.В., Козырева Н.В., Колчева К., Скляров Е.В.* Эклогиты и глаукофановые сланцы в складчатых областях. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1989. 236 с.].
- Fedynsky V.V., Kosminskaya I.P.* (Eds.), 1978. Technique and Equipment for Regional Seismic Studies in Remote Areas and Their Application in Siberia. Siberian Branch, Nauka, Novosibirsk, 206 p. (in Russian) [*Методика и аппаратура для региональных сейсмических исследований в труднодоступной местности и их применение в Сибири* / Ред. В.В. Федьинский, И.П. Косминская. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1978. 206 с.].
- International Seismological Centre*, 2017. On-line Bulletin. Thatcham, United Kingdom. Available from: <http://www.isc.ac.uk> (last accessed December 6, 2017).
- Masalsky O.K., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A.*, 2007. The state-of-the-art of seismic observations in Pribaikalie. In: Modern methods of seismological data processing and interpreting. Proceedings of the Second International Seismological School. GS RAS, Obninsk, p. 140–144 (in Russian) [*Масальский О.К., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А.* Современное состояние сейсмических наблюдений в Прибайкалье // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Второй международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2007. С. 140–144].

- Milanovsky E.E., 1996. Geology of Russia and the Neighboring Countries (Northern Eurasia). Moscow State University, Moscow, 448 p. (in Russian) [Милановский Е.Е. Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии). М.: МГУ, 1996. 448 с.].
- Mishen'kin B.P., Mishen'kina Z.R., Petrik G.V., Shelud'ko I.F., Mandel'baum M.M., Seleznev V.S., Solov'ev V.M., 1999. Deep seismic sounding of the Earth's crust and upper mantle in the Baikal rift zone. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 35 (7–8), 594–611.
- Nolet G. (Ed.), 1987. Seismic Tomography with Applications in Global Seismology and Exploration Geophysics. Kluwer, Dordrecht, 386 p. [Русский перевод: Сейсмическая томография. С приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике / Ред. Г. Нолет. М.: Мир, 1990. 416 с.].
- Parfenov L.M., Berzin N.A., Khanchuk A.I., Badarch G., Belichenko V.G., Bulgatov A.N., Dril S.I., Kirillova G.L., Kuzmin M.I., Nokleberg W.J., Prokopyev A.V., Timofeev V.F., Tomurtoogo O., Yang H., 2003. A model for the formation of orogenic belts in Central and Northeast Asia. *Tikhookeanskaya Geologiya (Russian Journal of Pacific Geology)* 22 (6), 7–41 (in Russian) [Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртоого О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. С. 7–41].
- Petrov O.V. (Ed.), 2012. Geological Map of Russia and Adjoining Water Areas. Cartographic Factory of VSEGEI, Saint Petersburg (in Russian) [Геологическая карта России и прилегающих акваторий. 1:2500000 / Ред. О.В. Петров. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012].
- Puzyrev N.N. (Ed.), 1981. Interior of Baikal from Seismic Data. Nauka, Novosibirsk, 173 p. (in Russian) [Недра Байкала (по сейсмическим данным) / Ред. Н.Н. Пузырев. Новосибирск: Наука, 1981. 105 с.].
- Puzyrev N.N. (Ed.), 1993. Detailed Seismic Studies of the Lithosphere Using P and S waves. Nauka, Novosibirsk, 199 p. (in Russian) [Детальные сейсмические исследования литосферы на Р и S-волнах / Ред. Н.Н. Пузырев. Новосибирск: Наука, 1993. 199 с.].
- Seleznev V.S., Soloviev V.M., Suvorov V.D., Kreinin A.B., Uarov V.F., 1987. Using the transverse waves in deep seismic sounding in West Yakutia. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* (1), 109–117 (in Russian) [Селезнев В.С., Соловьев В.М., Суворов В.Д., Крейнин А.Б., Уаров В.Ф. Использование поперечных волн при глубинном сейсмическом зондировании в Западной Якутии // Геология и геофизика. 1987. № 1. С. 109–117].
- Seleznev V.S., Tibo G., Perchuk E., Emanov A.F., Suvorov V.D., Soloviev V.M., Tat'kov G.I., Liseikin A.V., Annenkov V.V., Mishen'kina Z.R., 2003. Using the new deep seismic technology to study the deep structure of the southwestern flank of the Baikal rift zone. In: Problems of seismology in the third millennium. Proceedings of the International Geophysical Conference (15–19 September 2003, Novosibirsk). Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 324–329 (in Russian) [Селезнев В.С., Тибо Г., Перчук Э., Еманов А.Ф., Суворов В.Д., Соловьев В.М., Татьков Г.И., Лисейкин А.В., Анненков В.В., Мишенькина З.Р. Использование новой технологии глубинных сейсмических исследований при изучении глубинного строения юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Проблемы сейсмологии III тысячелетия: Материалы международной геофизической конференции (15–19 сентября 2003 г., г. Новосибирск). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. С. 324–329].
- Shevchenko B.F., Goroshko M.V., Didenko A.N., Gur'yanov V.A., Starosel'tsev V.S., Sal'nikov A.S., 2011. The junction of the eastern Central Asian fold belt and the Siberian platform: deep structure and Mesozoic tectonics and geodynamics. *Russian Geology and Geophysics* 52 (12), 1672–1679. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.11.008>.
- Solov'ev V.M., Seleznev V.S., Sal'nikov A.S., Shibaev S.V., Timofeev V.Y., Liseikin A.V., Shenmaier A.E., 2016. Deep seismic structure of the boundary zone between the Eurasian and Okhotsk plates in Eastern Russia (along the 3DV deep seismic sounding profile). *Russian Geology and Geophysics* 57 (11), 1613–1625. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.007>.
- Soloviev V.M., Salnikov A.S., Seleznev V.S., Elagin S.A., Romanenko I.E., Galyova N.A., 2017. Deep seismic studies of the Baikal-Patom fragment of the Eastern section of Reference Profile 1-SB. *Interexpo Geo-Siberia* 2 (4), 106–112 (in Russian) [Соловьев В.М., Сальников А.С., Селезнев В.С., Елагин С.А., Романенко И.Е., Галёва Н.А. Глубинные сейсмические исследования на Байкало-Патомском фрагменте восточного участка опорного профиля 1-СБ // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 2. № 4. С. 106–112].
- Soloviev V.M., Seleznev V.S., Salnikov A.S., Kashubina T.V., Shenmaier A.E., 2014. Effective seismic models of media used in DSS operations on base lines in Eastern Russia. *Geology and Mineral Resources of Siberia* (4), 74–86 (in Russian) [Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С., Кашубина Т.В., Шенмайер А.Е. Использование эффективных сейсмических моделей сред при работах ГСЗ на опорных профилях в восточной части России // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 4. С. 74–86].
- Soloviev V.M., Seleznev V.S., Salnikov A.S., Liseikin A.V., Romanenko I.E., Elagin S.A., Shenmaier A.E., 2016. Features of seismic structures in the Transbaikalia segment of the Central Asian fold belt in Geophysical Reference Profile 1-SB. *Interexpo Geo-Siberia* 2 (2), 234–238 (in Russian) [Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С., Лисейкин А.В., Романенко И.Е., Елагин С.А., Шенмайер А.Е. Особенности сейсмического строения структур забайкальской части Центрально-Азиатского складчатого пояса в створе опорного геофизического профиля 1-СБ // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 2. № 2. С. 234–238].
- Suvorov V.D., Mishen'kina Z.M., Petrick G.V., Sheludko I.F., Seleznev V.S., Solovyov V.M., 2002. Structure of the crust in the Baikal rift zone and adjacent areas from deep seismic sounding data. *Tectonophysics* 351 (1–2), 61–74. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00125-7).



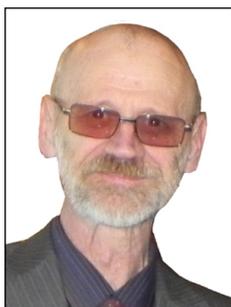
**Соловьев Виктор Михайлович**, канд. геол.-мин. наук, зам. директора по научной работе Алтай-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия  
e-mail: [solov@gs.nsc.ru](mailto:solov@gs.nsc.ru)

**Soloviev, Victor M.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Deputy Director for Science Altai-Sayan Branch of Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS'  
3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [solov@gs.nsc.ru](mailto:solov@gs.nsc.ru)



**Чечельницкий Владимир Васильевич**, канд. геол.-мин. наук, зам. директора по научной работе Байкальский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия  
Тел.: (3952)427490; e-mail: [chechel@crust.irk.ru](mailto:chechel@crust.irk.ru)

**Chechelnickey, Vladimir V.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Deputy Director for Science Baikal Branch of Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS'  
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia  
Tel.: (3952)427490; e-mail: [chechel@crust.irk.ru](mailto:chechel@crust.irk.ru)



**Сальников Александр Сергеевич**, докт. геол.-мин. наук Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья 630091, Новосибирск, Красный проспект, 67, Россия  
e-mail: [seispv@sniiggims.ru](mailto:seispv@sniiggims.ru)

**Salnikov, Aleksander S.**, Doctor of Geology and Mineralogy Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources  
67 Krasnyy ave., Novosibirsk 630091, Russia  
e-mail: [seispv@sniiggims.ru](mailto:seispv@sniiggims.ru)



**Селезнев Виктор Сергеевич**, докт. геол.-мин. наук, директор Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия  
e-mail: [svs0428@mail.ru](mailto:svs0428@mail.ru)

**Seleznev, Victor S.**, Doctor of Geology and Mineralogy, Director Seismological Branch of Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS'  
3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [svs0428@mail.ru](mailto:svs0428@mail.ru)



**Лисейкин Алексей Владимирович**, канд. геол.-мин. наук Сейсмологический филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия  
e-mail: [lexik1979@mail.ru](mailto:lexik1979@mail.ru)

**Liseikin, Aleksei V.**, Candidate of Geology and Mineralogy Seismological Branch of Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS'  
3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [lexik1979@mail.ru](mailto:lexik1979@mail.ru)



**Галёва Наталья Александровна**, геофизик  
Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия  
e-mail: [tatapelya@gmail.com](mailto:tatapelya@gmail.com)

**Galyova, Natalia A.**, geophysicist  
Altai-Sayan Branch of Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS'  
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [tatapelya@gmail.com](mailto:tatapelya@gmail.com)