

УДК 550.834.42+550.34

К обоснованию высоких скоростей P - и S -волн в верхней мантии Забайкалья

© 2020 г. В.М. Соловьев¹, В.С. Селезнев², В.В. Чечельницкий³, А.С. Сальников⁴,
Н.А. Галёва¹

¹АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия;

²СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия;

³БФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия;

⁴АО «СНИИГТиМС», г. Новосибирск, Россия

Аннотация. Представлены результаты анализа геолого-геофизических и геодинамических исследований по юго-востоку Забайкалья для обоснования установленных здесь профильными сейсмическими и площадными сейсмологическими исследованиями высоких скоростей P - и S -волн по границе Мохоровичича. Обсуждены вопросы возможной анизотропии верхней мантии. Проведено сопоставление экспериментальных значений скоростей P - и S -волн (по данным ГСЗ и сейсмологии) с расчётами значений упругих параметров по приближенному минеральному составу вероятных пород верхней мантии (перидотитов, лерцолитов, пироксенитов и эклогитов) и экспериментальных (при исследовании образцов) значений скоростей P - и S -волн для этих пород, полученных при давлениях как в верхней мантии (до 10 кбар). По результатам обсуждения возможных причин повышенных скоростей сделано заключение об обоснованности предположения о природе высокоскоростного блока в мантии Забайкалья как пластины эклогитов (или эклогитоподобных пород) в районе Монголо-Охотского орогенного пояса.

Ключевые слова: Забайкалье, граница Мохоровичича, сейсмологические данные, граничные скорости P - и S -волн, коэффициент Пуассона, Монголо-Охотский пояс, эклогиты.

Для цитирования: Соловьев В.М., Селезнев В.С., Чечельницкий В.В., Сальников А.С., Галёва Н.А. К обоснованию высоких скоростей P - и S -волн в верхней мантии Забайкалья // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 3. – С. 22–33. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.02>

Введение

Сейсмическими исследованиями на опорном геолого-геофизическом профиле 1-СБ и площадными сейсмологическими исследованиями в Прибайкалье и Забайкалье (рис. 1а) в юго-восточной части Забайкалья в верхней мантии по данным P - и S -волн выделен высокоскоростной мантийный блок с поперечными размерами около 600×600 км (рис. 1б) [Соловьев и др., 2020]. Скорости P - и S -волн по границе Мохоровичича (М) в его пределах повышены соответственно до 8.40–8.45 и 4.80–4.85 км/с. В створе профиля 1-СБ максимальные значения скорости продольных волн в пределах выделенного блока достигают 8.50–8.55 км/с [Соловьев, Селезнев и др., 2017]. Нормальные значения скорости P - и S -волн на сопредельных участках составляют соответственно 8.1 ± 0.1 и 4.65 ± 0.05 км/с (рис. 1б).

В пределах Забайкальского фрагмента профиля 1-СБ высокоскоростной участок приурочен к области сочленения Восточно-Забайкальской и Саяно-Байкальской складчатых областей Центрально-Азиатского складчатого пояса, разделённых Монголо-Охотским поясом [Соловьев и др., 2020; Соловьев, Чечельницкий и др., 2017]. С целью обоснования высоких скоростей упругих волн в верхней мантии Забайкалья ниже представлен анализ геолого-геофизических и геодинамических сведений по Прибайкалью и Забайкалью, теоретических и экспериментальных исследований причин появления высоких скоростей пород мантии, включая анизотропию и минеральный состав пород. Безусловный интерес вызывает также оценка мощности высокоскоростного блока и геодинамические причины его образования в юго-восточной части Забайкалья.

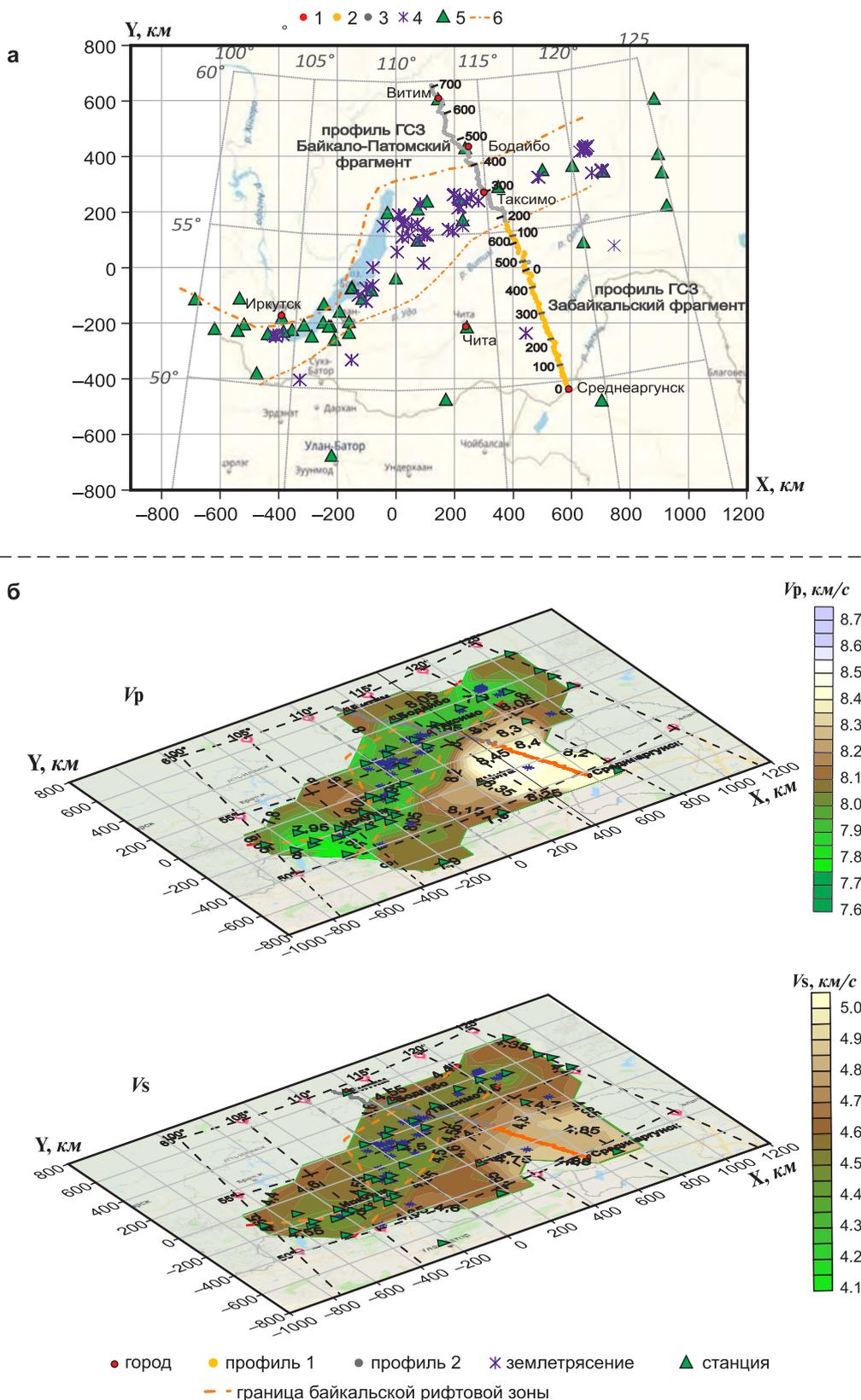


Рис. 1. Распределение скоростей по границе Мохоровичича в Прибайкалье и Забайкалье: а – схема площадных сейсмологических наблюдений, б – распределение значений скоростей P- и S-волн по границе Мохоровичича.

1 – города; 2, 3 – Забайкальский и Байкало-Патомский фрагменты профиля 1-СБ (цифрами указан километр по профилям); 4 – землетрясения с $K \geq 9$; 5 – сеймостанции; 6 – контуры Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) по [Солоненко, 1968]

Обсуждение результатов

Наряду с Забайкальем, высокие скорости продольных волн в верхней части мантии были установлены как в ряде платформенных участков России и мира, так и в океанах [Глубинное строение ..., 1991; Суворов и др., 1985; Чесноков, 1977; Егоркин и др., 1984, Зверев, 1999]. Появление высоких скоростей продольных волн в верхней части верхней мантии одни исследователи [Суворов и др., 1985; Соловьев, 1988] связывают с эклотитовым составом последней, другие [Рингвуд, 1981; Чесноков, 1977; Фукс, 1984; Crampin, 1982] – с анизотропией ультраосновных пород верхней мантии. Неоднозначность подобных заключений связана с недостатком исходной информации, а также с использованием данных о скоростях только продольных волн. Привлечение данных по поперечным волнам снижает эту неоднозначность, повышает достоверность результатов исследований [Крылов и др., 1990; 1993; Кашубин, 2001; Глубинное строение ..., 1991].

Рассмотрим главные причины появления высоких скоростей на границе кора-мантия и их применимость к образованию выделенного высокоскоростного блока в верхней части мантии на юго-востоке Забайкалья.

Анизотропия пород верхней мантии. Впервые азимутальная скоростная анизотропия в верхней мантии была зафиксирована в 1964 г. на профилях в Тихом океане [Hess, 1964]; различие в скоростях продольных волн в ортогональных направлениях достигало 0.6 км/с. В последующем сейсмическая анизотропия в мантии была установлена рядом исследователей в специальных экспериментах не только в океане, но и на континентах [Краснова, Чесноков, 1986; Чесноков, 1977; Shearer, Orcutt, 1986; Bamford et al., 1979]. Для обоснования анизотропии исследователи [Фукс, 1984; Чесноков, 1977; Crampin, 1982] рассматривали сравнительно тонкий анизотропный слой в верхней части мантии, состоящий из ультраосновных пород (главным образом, перидотит) преимущественно оливинового состава с преобладающей ориентировкой оливина, вызванной тектоническими силами. Было показано, что если примерно треть кристаллов оливина в перидотитовой модели верхней мантии будет иметь упорядоченную ориентацию, скоростная анизотропия может достигнуть 7–8%, соответственно различие в скоростях в ортогональных направлениях будет достигать 0.55–0.65 км/с [Чесноков, 1977]. Поскольку данные о сейсмической анизотропии содержат в том или ином виде информацию о вызывающих её при-

чинах, они открывают принципиально новые возможности для геологической интерпретации и решения задачи прогнозирования вещественного состава верхней мантии.

При глубинных сейсмических исследованиях на профиле 1-СБ, пересекающем по центральной части выделенное высокоскоростное тело на поверхности мантии (рис. 1), регистрация осуществлялась как вертикальными, так и горизонтальными приборами. Это позволяло проводить поляризационную обработку записей с выделением разнополяризованных P -, SV -, SH -волн и изучать анизотропию упругих свойств [Соловьев и др., 2019]. В результате обработки на профиле 1-СБ (Забайкальский фрагмент) было получено несколько десятков «представительных» сейсмограмм, на которых достаточно уверенно прослеживаются вступления поперечных волн на всех трёх компонентах для удалений источник–приёмник от 10 до 200 км [Соловьев, Селезнев и др., 2017; Соловьев и др., 2019].

Изучение пересчитанных записей на исследуемом профиле показывает, что на ряде сейсмограмм с различных участков не установлено различие времён разнополяризованных SV - и SH -составляющих, в то время как на значительном количестве сейсмограмм выявлены признаки проявления анизотропных свойств среды, заключающиеся в регистрации SV - и SH -волн с различными временами вступлений на одних и тех же сейсмограммах (рис. 2). Это различие времён регистрации SV - и SH -составляющих на ряде записей рефрагированных волн в земной коре и отражённых волн от границы М достигает 0.5 с (рис. 2а, б), что может свидетельствовать об анизотропии упругих свойств земной коры. В большинстве случаев время вступления квази- SH -волны меньше времени квази- SV -волны. Отношения T_{sv}/T_{sh} для рефрагированных волн, определённые по полным временам пробега волн от источника к регистрирующей станции, составили 1.02–1.07. Учитывая это, и, судя по различию времён регистрации отражённых SV - и SH -волн от границы М до 0.5 с на удалениях в 150–180 км, эффективные коэффициенты анизотропии всей толщи земной коры могут достигать 3–5%.

Получен был также ряд сейсмограмм с записями разнополяризованных преломлённых SV - и SH -волн от границы М (рис. 2в). Максимальные различия времён регистрации этих волн составляют 0.3–0.5 с; как и для отражённых и рефрагированных S -волн время вступления квази- SH -волны меньше времён прихода квази- SV -волны. Поскольку лучи преломлённых

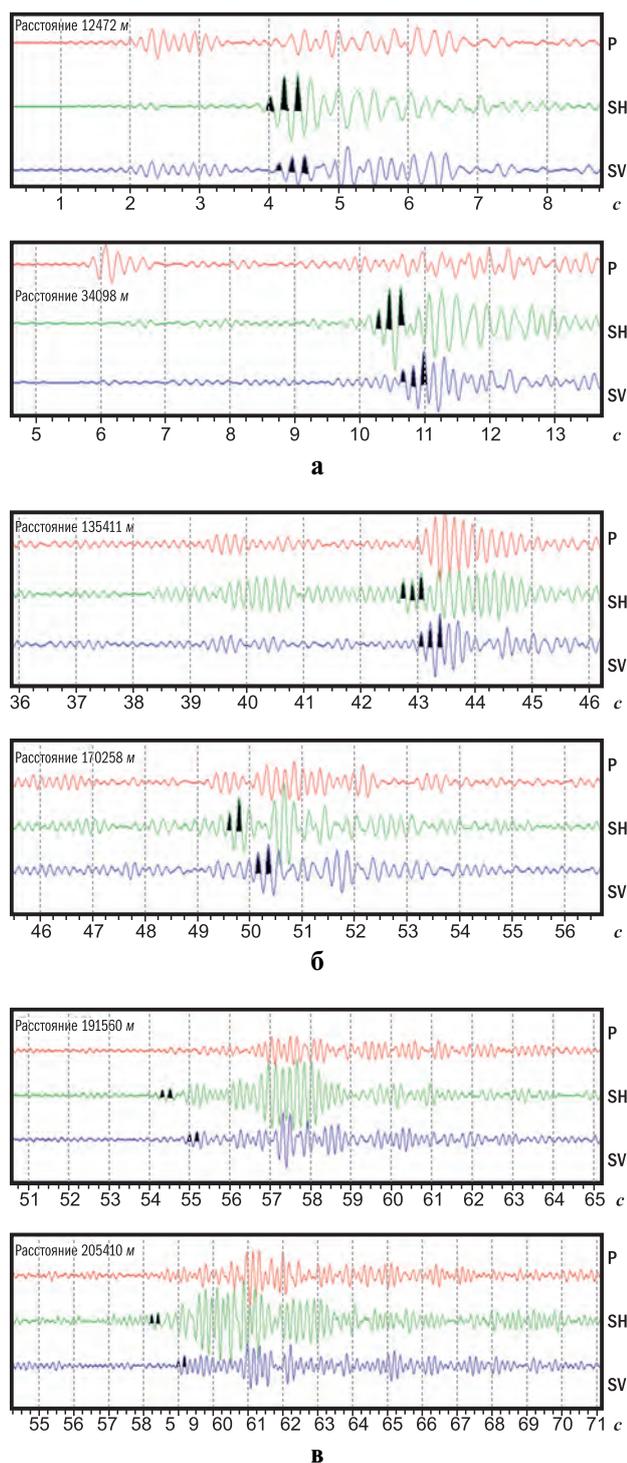


Рис. 2. Примеры записей поперечных волн после поляризационной обработки трёхкомпонентных данных на профиле 1-СБ (Забайкальский фрагмент):

а — данные рефрагированных S -волн из верхней и средней части земной коры; б, в — записи поперечных отражённых и преломлённых волн от границы Мохоровичича соответственно

SV -и SH -волн от границы М значительный пробог осуществляют по земной коре, то выделяемые

различия времён разнополяризованных преломлённых SV - и SH -волн могут быть обусловлены анизотропией земной коры, либо слабой анизотропией верхней мантии. Учитывая площадное распределение высокоскоростной неоднородности в мантии и отсутствие заметного азимутального изменения скоростей P - и S -волн в выделенном высокоскоростном блоке (рис. 1б), предпочтительнее считать анизотропию в мантии юго-восточной части Забайкалья слабой, либо отсутствующей.

Минеральный состав пород. В качестве вероятных типов пород верхней части верхней мантии, согласно существующим петрологическим представлениям о верхней мантии континентов [Добрецов, 1980], рассматриваются перидотиты, лерцолиты, пироксениты и эклогиты. Эти породы представляют определённые комбинации оливина, пироксена (моноклинного и ромбического), граната, рудных и других минералов. В работе [Соловьев, 1988] по приближенному минеральному составу пород (таблица), осреднённым значениям упругих характеристик этих пород и слагающих их минералов при различных давлениях из работ [Баяк и др., 1982; Беликов и др., 1970; Воларович и др., 1975; Справочник ..., 1978; Физические свойства ..., 1976; Birch, 1960] были рассчитаны графики зависимости скоростей продольных и поперечных волн от давления. В настоящей статье эти графики доработаны при сопоставлении с экспериментальными значениями скоростей P - и S -волн в верхней мантии Забайкалья.

Расчёт упругих параметров полиминеральной породы производился по приближенной формуле [Соловьев, 1988]:

$$\lg A = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \lg A_i,$$

где A_i и v_i — средние значения упругих параметров из работ [Баяк и др., 1982; Беликов и др., 1970; Воларович и др., 1975; Справочник ..., 1978; Физические свойства ..., 1976; Birch, 1960] и объёмные содержания (табл.) составляющих породу минералов соответственно; A — упругие параметры (скорости продольных и поперечных волн) полиминеральной породы.

Полученные графики зависимости скоростей продольных и поперечных волн от давления для исследуемых мантийных пород, полученные при расчётах по минеральному составу и при использовании данных лабораторных измерений на образцах пород в интервале давлений 0.001–10 кбар, представлены на рис. 3.

Из рис. 3а видно, что в области давлений, приближённо соответствующим давлениям в верхней части верхней мантии, наиболее близкие (к нормальным скоростям P - и S -волн, установленным в эксперименте) скорости имеют перидотиты и пироксениты (по соответствию обеих скоростей более близкими являются перидотиты); аномально высокими значениями скоростей P - и S -волн могут характеризоваться в большей степени эклогиты и лерцолиты. Эти выводы подтверждаются также результатами анализа максимальных и средних значений скоростей P - и S -волн, полученных при испытании рассматриваемых образцов пород в условиях высоких давлений (рис. 3б, в). В отличие от

перидотитов, пироксениты имеют пониженные (по сравнению с экспериментально установленными) скорости P - и S -волн. Аномальным значениям этих скоростей, исходя из рис. 3б, в, соответствуют максимальные значения скоростей P - и S -волн лерцолитов и эклогитов (по S -волнам ближе эклогиты) и средние – эклогитов. Для эклогитов рассчитанные по минеральному составу и при исследовании образцов значения скоростей P - и S -волн составляют, соответственно, 8.20–8.65 и 4.65–4.80 км/с. Знание скоростей P - и S -волн позволяет определить такой важный параметр, характеризующий породы, как коэффициент Пуассона (σ).

Таблица. Объёмные содержания составляющих породу минералов

Порода	Минералы	Оливин	Пироксены			Гранат	Рудные	Плагиоклаз
			а	б	в			
Перидотит		60–68	22–30			0–3	0–3	
Лерцолит		60–70	30–36	0–5		0–6		
Пироксенит		5–10	90–95					
Эклогит					40–60	40–60		0–10

Примечание: а – диопсид, б – энстатит, в – омфациит; цифры – объёмное содержание отдельных минералов в породе в %.

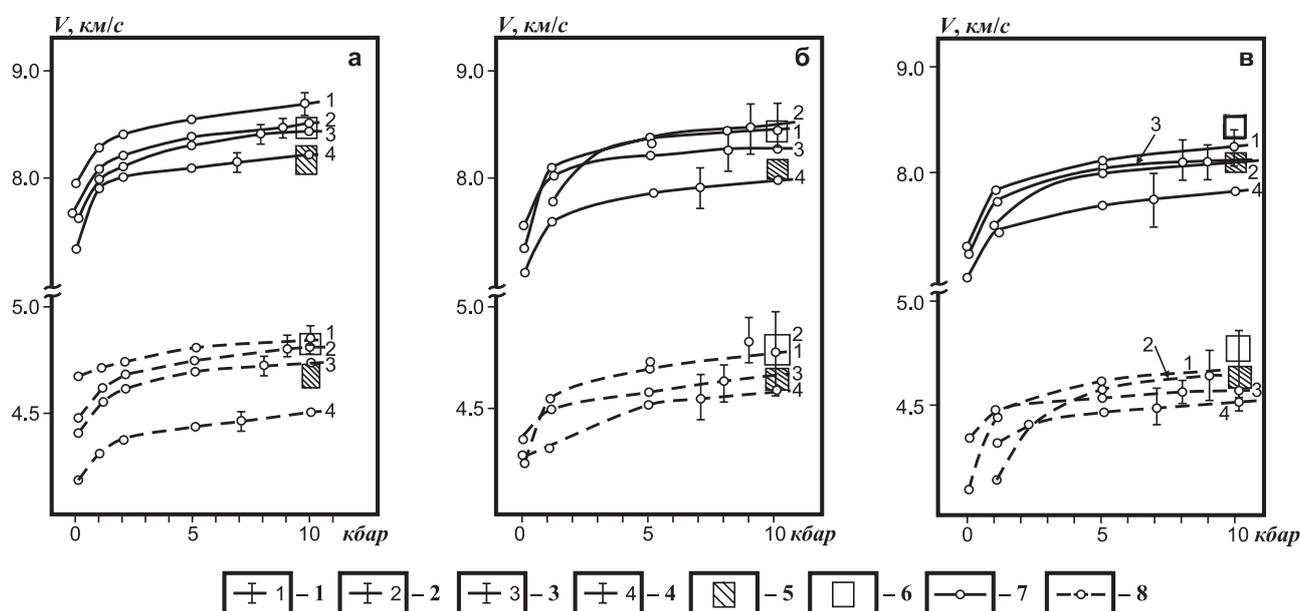


Рис. 3. Упругие характеристики пород верхней мантии при давлениях до 10 кбар: а – теоретически рассчитанные по приближенному минеральному составу; б, в – максимальные и средние значения скоростей P - и S -волн, полученные в результате лабораторных исследований образцов горных пород:

1, 2, 3, 4 – соответствуют эклогитам, лерцолитам, перидотитам и пироксенитам соответственно (вертикальный отрезок – дисперсия); 5, 6 – нормальные и аномальные значения скоростей P - и S -волн в верхней мантии, установленные при сейсмических исследованиях в Забайкалье [Соловьев, Селезнев и др., 2017; Соловьев и др., 2019; 2020]; 7, 8 – данные по P - и S -волнам соответственно

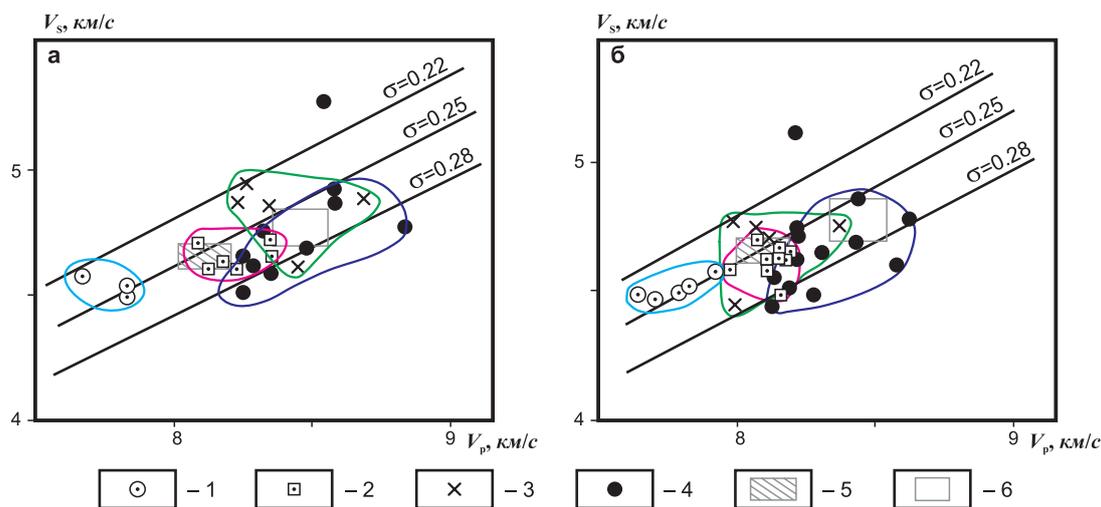


Рис. 4. К вопросу об определении состава пород верхней мантии Забайкалья: а, б – максимальные и средние значения скоростей упругих волн для пироксенитов (1), перидотитов (2), лерцолитов (3) и эклогитов (4), полученные в результате лабораторных исследований этих пород; 5, 6 – нормальные и аномальные значения скоростей P - и S -волн в верхней мантии, установленные при сейсмических исследованиях в Забайкалье

На рис. 4а, б представлены графики максимальных и средних значений скоростей P - и S -волн, полученных для одних и тех же образцов горных пород при давлении 10 кбар, там же нанесены изолинии значений коэффициента Пуассона.

Несмотря на небольшую выборку (рассматривались, в основном, свежие, не изменённые вторичными процессами породы), видно, что рассматриваемые типы пород различаются как по самим величинам скоростей P - и S -волн, так и по коэффициенту Пуассона. Нормальным значениям скоростей, установленным в эксперименте, отвечают перидотиты (эффективный коэффициент Пуассона составляет 0.25–0.26, в эксперименте $\sigma=0.25$); аномальным – эклогиты (эффективный коэффициент Пуассона 0.255–0.285, в эксперименте $\sigma=0.265$ –0.275 [Соловьев и др., 2020]). Наряду с повышенными значениями скоростей P - и S -волн и коэффициента Пуассона, эклогиты характеризуются повышенными значениями V_p/V_s (до 1.8–1.85 в расчётах на рис. 3, 4), коррелирующими с сейсмическими данными для выделенного высокоскоростного блока ($V_p/V_s=1.75$ –1.79).

Мощность высокоскоростного слоя. Анализ протяжённых годографов продольных преломлённых волн на Забайкальском фрагменте профиля 1-СБ показывает, что резких изломов годографов преломлённых волн (на более высокую скорость) не происходит даже на удалениях свыше 450 км (рис. 5а).

Из графиков параллельности с ПВ 2, ПВ 4 в прямом и с ПВ 22, ПВ 18 во встречном направ-

лениях (рис. 5б) видно, что в пределах протяжённой совместной области прослеживания (~110–170 км) годографы не сходятся. При этом отмечается разброс значений разности редуцированных времён в пределах 0.10–0.15 с, что практически соответствует погрешности снятия времён вступлений на удалениях 200–400 км. Отсутствие схождения годографов на таких больших расстояниях свидетельствует о наличии высокоскоростного слабо градиентного слоя, расположенного ниже границы М. Мощность такого слоя должна быть не меньше 5–10 км, что следует из динамической выразительности преломлённой волны ($P_{пр}^M$) от границы Мохоровичича [Соловьев, Селезнев и др., 2017].

В пользу мощного однородного высокоскоростного слоя (пластины эклогитоподобных пород) свидетельствуют и другие сейсмические данные ГСЗ и метода ОГТ в данной зоне [Гошко и др., 2018; Соловьев, Селезнев и др., 2017]. В разрезах ГСЗ и ОГТ на профиле 1-СБ высокоскоростной мантийный блок несколько приподнят относительно сопредельных участков и залегает практически горизонтально на глубине 40 км. В разрезе ОГТ ниже границы Мохоровичича отмечается отсутствие видимых отражений.

Геодинамика. Согласно геодинамическим исследованиям [Парфенов и др., 2003; Диденко и др., 2013; Шевченко и др., 2011], формирование позднепалеозойско-раннемезозойского Монголо-Охотского орогенного пояса связывается с закрытием существовавшего на его месте океанического бассейна и субдукцией океанической

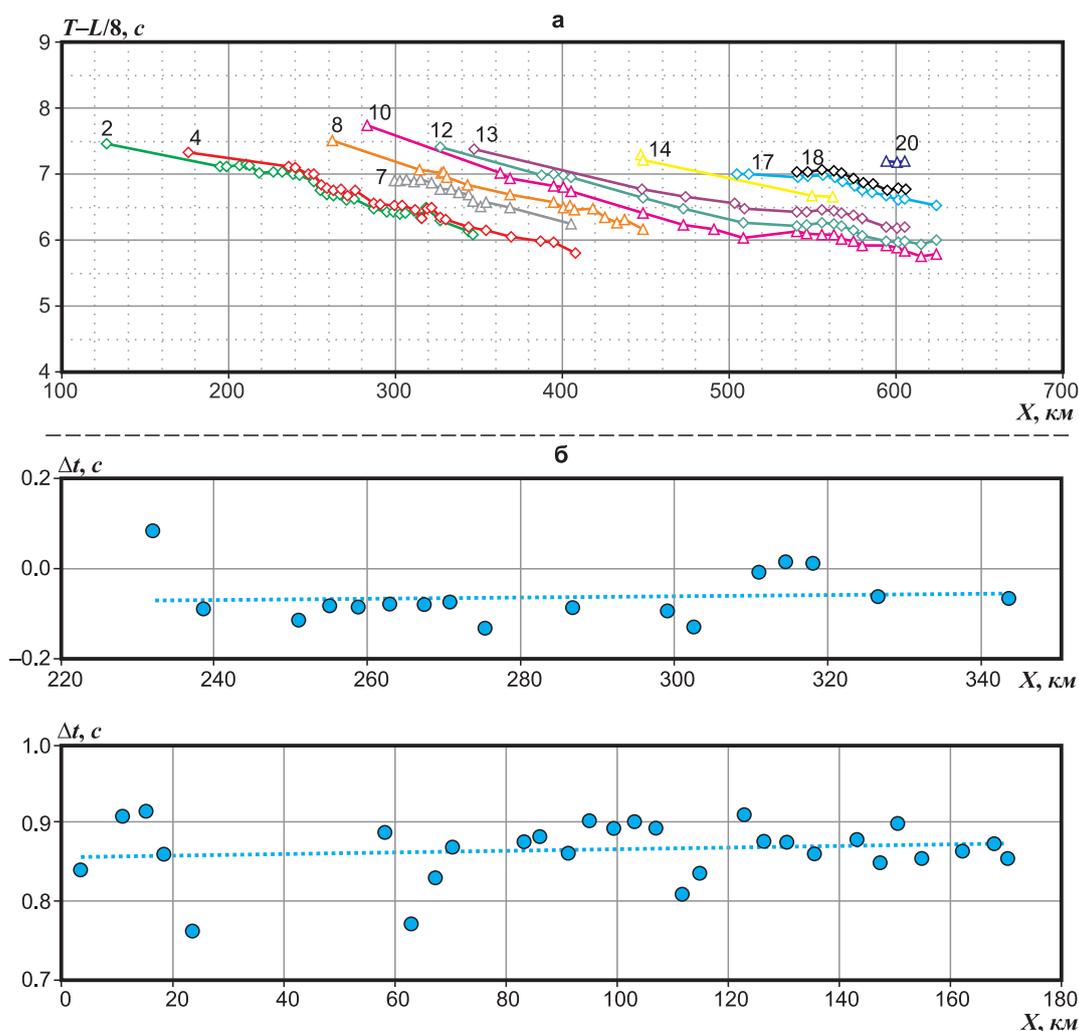


Рис. 5. К интерпретации преломлённых волн от поверхности Мохоровичича на профиле 1-СБ (Забайкальский фрагмент): а – редуцированные годографы преломлённых волн от границы Мохоровичича с начальными точками по данным отражённых волн в прямом направлении; б – графики параллельности с ПВ 2 ($X=23$ км), ПВ 4 ($X=63$ км) в прямом и ПВ 22 ($X=476$ км), ПВ 18 ($X=352$ км) во встречном направлениях.

По оси X – километраж по профилю ГСЗ на рис. 1а, по оси Y – различие редуцированных времён; ПВ – пункт взрыва, указан номером над началом годографа

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% [Добрецов и др., 1989], а значит, и скорости P - и S -волн выше, чем у пород верхней части верхней мантии.

Заключение

Проведённый анализ геолого-геофизических и геодинамических сведений по району исследований подтверждает сделанное ранее предположение [Соловьев, Чечельницкий и др., 2017;

Соловьев и др., 2020], что выделенный по данным сейсмологии и ГСЗ высокоскоростной слой в верхней мантии в юго-восточной части Забайкалья является пластиной эклогитов (или эклогитоподобных пород) в районе Монголо-Охотского орогенного пояса. Сейсмические данные указывают, что выделенное тело представляет мощный однородный высокоскоростной слой с практическим отсутствием анизотропии. Экспериментальные значения скоростей P - и S -волн слоя совпадают с расчётными по минеральному составу и измерениям на образцах эклогитов в условиях давлений верхней мантии, которые не противоречат геодинамическим представлениям об образовании эклогитов при формировании

позднепалеозойско-раннемезозойского Монголо-Охотского орогенного пояса.

Результаты проведённого анализа согласуются с результатами других исследований. В частности, геохимическими исследованиями [Соболев, 1974; Харьков, 1976] было показано существование эклогитов в верхней части верхней мантии Якутской кимберлитовой провинции, где сейсмическими работами ГСЗ, как и в Забайкалье, установлены высокие скорости продольных волн по границе Мохоровичича до 8.8–9.0 км/с [Суворов и др., 1985; 1988]. Для пород эклогитового состава по данным работ [Баяк и др., 1982; Чесноков, 1977] при давлениях, характерных для верхней мантии, анизотропия мала (либо отсутствует совсем), что согласуется с результатами сейсмических исследований как в Западной Якутии [Селезнев и др., 1987], так и на юго-востоке Забайкалья.

Полученный ряд новых сведений о природе установленных в сейсмическом эксперименте высоких скоростей продольных и поперечных волн в верхней мантии Забайкалья даёт дополнительные данные, позволяющие по-новому взглянуть на историю образования и развития данного региона, что весьма важно в задаче генезиса и размещения месторождений полезных ископаемых, а также при анализе сейсмичности территории.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-01304-20-01.

Литература

- Баяк Е.И., Воларович М.П., Левитова Ф.М. Упругая анизотропия горных пород при высоких давлениях. — М.: Наука, 1982. — 170 с.
- Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. — М.: Наука, 1970. — 276 с.
- Воларович М.П., Баяк Е.И., Ефимова Г.А. Упругие свойства минералов при высоких давлениях. — М.: Наука, 1975. — 132 с.
- Глубинное строение территории СССР / Отв. ред. В.В. Белоусов. — М.: Наука, 1991. — 224 с.
- Гошко Е.Ю., Жабин В.В., Сальников А.С. Строение земной коры в зоне сочленения Алдано-Станового щита и Саяно-Байкальской складчатой области вдоль опорного профиля 1-СБ // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, 18–20 апреля 2018 г.: в 2 т. Т. 2. — Якутск: Издательский дом Сев.-Вост. федерального ун-та, 2018. — С. 52–55.
- Диденко А.Н., Ефимов А.С., Нелюбов П.А., Сальников А.С., Старосельцев В.С., Шевченко Б.Ф., Горошко М.В., Гурьянов В.А., Заможная Н.Г. Структура и эволюция земной коры области сочленения Центрально-Азиатского пояса и Сибирской платформы: профиль Сквородино–Томмот // Геология и геофизика. — 2013. — Т. 54. — № 10. — С. 1583–1599.
- Добрецов Н.Л. Введение в глобальную петрологию. — Новосибирск: Наука, 1980. — 200 с.
- Добрецов Н.Л., Соболев Н.В., Шацкий В.С. и др. Эклогиты и глаукофановые сланцы в складчатых областях. — Новосибирск: Наука, 1989. — 236 с.
- Егоркин А.В., Зюганов С.К., Чернышев Н.М. Верхняя мантия Сибири // 27-й Международный геологический конгресс. Геофизика. Секция 8. Доклады. Т. 8. — М.: Наука, 1984. — С. 27–42.
- Зверев С.М. ГСЗ на океанах за 30 лет экспедиций: методика и волновые поля // Физика Земли. — 1999. — № 7–8. — С. 143–163.
- Кашубин С.Н. Сейсмическая анизотропия и эксперименты по её изучению на Урале и Восточно-Европейской платформе. — Екатеринбург: УрО РАН, 2001. — 182 с.
- Краснова М.А., Чесноков Е.М. Экспериментальное исследование сейсмической анизотропии литосферы Земли в СССР и за рубежом. — М.: ВИЭМС, 1986. — 36 с.
- Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Блинов В.Д. Детальные глубинные сейсмические исследования в Верхнеангарском районе Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. — 1990. — Т. 31, № 7. — С. 17–27.
- Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Сергеев В.Н., Шелудько И.Ф., Тен Е.Н., Кульчинский Ю.В., Мандельбаум М.М., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Суворов В.Д. Детальные сейсмические исследования литосферы на *P*- и *S*-волнах. — Новосибирск: Наука, 1993. — 199 с.
- Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгаков 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. 1–41.
- Рингвуд А.Е. Состав и петрология мантии Земли. — М.: Недра, 1981. — 584 с.
- Селезнев В.С., Соловьев В.М., Суворов В.Д. и др. Использование поперечных волн при глубинном сейсмическом зондировании в Западной Якутии // Геология и геофизика. — 1987. — № 1. — С. 109–117.
- Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. — Новосибирск: Наука, 1974. — 264 с.
- Соловьев В.М. Использование поперечных волн при глубинном сейсмическом зондировании в Западной Якутии: автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. — Новосибирск, 1988. — 16 с.
- Соловьев В.М., Галёва Н.А., Сальников А.С., Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Кашубина Т.В., Вяткина Д.В. Особенности сейсмического строения Забайкалья в створе опорного профиля 1-СБ «Восточный» по данным разнополяризованных *P*- и *S*-волн //

- Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2019. — № 3 (39). — С. 57–71.
- Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С., Лисейкин А.В., Романенко И.Е., Елагин С.А., Шенмайер А.Е., Серезников Н.А. Глубинное строение Забайкальского участка Центрально-Азиатского складчатого пояса по данным ГСЗ (в створе опорного профиля 1-СБ) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2017. — № 4 (32). — С. 91–103.
- Соловьев В.М., Селезнев В.С., Чечельницкий В.В., Галёва Н.А. Верхняя мантия Прибайкалья и Забайкалья по данным площадных сейсмологических исследований // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — Т. 2. — № 1. — С. 7–17.
- 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
- Солоненко В.П. Сеймотектоника и современное структурное развитие Байкальской рифтовой зоны // Байкальский рифт. — М.: Наука, 1968. — С. 57–71.
- Справочник по физическим свойствам горных пород и минералов при высоких термодинамических параметрах / Под ред. М.П. Воларовича. — М.: Недра, 1978. — 236 с.
- Суворов В.Д., Крейнин А.Б., Подваркова И.В. и др. Площадные глубинные сейсмические исследования в Мало-Ботуобинском районе Якутии // Геология и геофизика. — 1985. — № 1. — С. 82–90.
- Суворов В.Д., Крейнин А.Б., Уаров В.Ф. и др. Глубинные сейсмические исследования в центральной части Западной Якутии // Геология и геофизика. — 1988. — № 2. — С. 91–95.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / Под ред. Н.Б. Дортман. — М.: Недра, 1976. — 527 с.
- Фукс К. Сейсмическая анизотропия и состав континентальной подкоровой литосферы // 27-й Международный геологический конгресс. Геофизика. Секция 8. Доклады. Т. 8. — М.: Наука, 1984. — С. 43–52.
- Харькив А.Д. Минералого-геохимические особенности включений мантийных пород в кимберлитах Якутии и их связь с алмазоносностью // Геохимия. — 1976. — № 7. — С. 983–996.
- Чесноков Е.М. Сейсмическая анизотропия верхней мантии Земли. — М.: Наука, 1977. — 144 с.
- Шевченко Б.Ф., Горошко М.В., Диденко А.Н., Гурьянов В.А., Старосельцев В.С., Сальников А.С. Глубинное строение, мезозойская тектоника и геодинамика области сочленения восточной части Центрально-Азиатского пояса и Сибирской платформы // Геология и геофизика. — 2011. — Т. 52. — № 12. — С. 2122–2131.
- Bamford D., Jentsch M., Prodehl C. Pn anisotropy studies in Northern Britain, and in the Eastern and Western United States // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. — 1979. — V. 57. — P. 397–429.
- Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars. Pt.1 // Journal of Geophysical Research. — 1960. — V. 65, N 4. — P. 1083–1102.
- Crampin S. Comments on “Possible forms of seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans” by George E. Backus // Journal of Geophysical Research. — 1982. — V. 87. — P. 4634–4640.
- Hess H. Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans // Nature. — 1964. — V. 2. — P. 629–631.
- Shearer P.M., Orcutt J.A. Compressional and shear wave anisotropy in the oceanic lithosphere — the Ngendei seismic refraction experiment // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. — 1986. — V. 87. — P. 967–1003.

Сведения об авторах

Соловьев Виктор Михайлович, канд. геол.-мин. наук, зам. директора Алтае-Саянского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (АСФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: solov@gs.nsc.ru

Селезнев Виктор Сергеевич, д-р геол.-мин. наук, директор Сейсмологического филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: sel@gs.nsc.ru

Чечельницкий Владимир Васильевич, канд. геол.-мин. наук, зам. директора Байкальского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (БФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Иркутск, Россия. E-mail: chechel@crust.irk.ru

Сальников Александр Сергеевич, д-р геол.-мин. наук, зав. отд. Акционерного общества «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья» (АО «СНИИГГиМС»), г. Новосибирск, Россия. E-mail: assalnikov@mail.ru

Галёва Наталья Александровна, мл. науч. сотр. АСФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: tatapelya@gmail.com

To substantiate the high velocities of P- and S-waves in the upper mantle of Transbaikalia

© 2020 V.M. Solovyev¹, V.S. Seleznev², V.V. Chechelnitzsky³, A.S. Salnikov⁴, N.A. Galyova¹

¹ASB GS RAS, Novosibirsk, Russia; ²SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia; ³BB GS RAS, Irkutsk, Russia; ⁴JSC "SNIIGGIMS", Novosibirsk, Russia

Abstract The results of the analysis of geological, geophysical and geodynamic studies in the South-East of Transbaikalia are presented in order to substantiate the high speeds of P- and S-waves along the Mohorovichich boundary established here by profile seismic and area seismological studies. The issues of possible anisotropy of the upper mantle were discussed, and the experimental values of P- and S-wave velocities (according to the data of the GSS and seismology) were compared with the calculations of elastic parameters values based on the approximate mineral composition of probable upper mantle rocks (peridotites, lercolites, pyroxenites and eclogites) and experimental values of P- and S-wave velocities for these rocks obtained at pressures in the upper mantle (up to 10 kbar). By results of discussion of possible causes of increased speeds made the conclusion on the validity of assumptions about the nature of the high-speed block in the mantle of Transbaikalia as the plates eclogites (or eclogitic rocks) in the area of Mongol-Okhotsk orogenic belt.

Keywords Transbaikalia, Mohorovichich boundary, seismological data, boundary velocities of P- and S-waves, Poisson's ratio, Mongolo-Okhotsk belt, eclogites.

For citation Solovyev, V.M., Seleznev, V.S., Chechelnitzsky, V.V., Salnikov, A.S. & Galyova, N.A. (2020). [To substantiate the high velocities of P- and S-waves in the upper mantle of Transbaikalia]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(3), 22-33. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.02>

References

- Bamford, D., Jentsch, M., & Prodehl, C. (1979). Pn anisotropy studies in Northern Britain, and in the Eastern and Western United States. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 57, 397-429.
- Bayuk, E.I., Volarovich, M.P., & Levitova, F.M. (1982). *Uprugaja anizotropija gornyh porod pri vysokih davlenijah* [Elastic anisotropy of rocks at high pressures]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 170 p. (In Russ.).
- Belikov, B.P., Alexandrov, K.S., & Ryzhova, T.V. (1970). *Uprugie svoystva porodoobrazujushchih mineralov i gornyh porod* [Elastic properties of rock-forming minerals and rocks]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 276 p. (In Russ.).
- Belousov, V.V. (ed.). (1991). *Glubinnoe stroenie territorii SSSR* [Deep structure of the territory of the USSR]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 224 p. (In Russ.).
- Birch, F. (1960). The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars. Pt.1. *Journal of Geophysical Research*, 65(4), 1083-1102.
- Chesnokov, E.M. (1977). *Sejsmicheskaja anizotropija verhnjej mantii Zemli* [Seismic anisotropy of the Earth's upper mantle]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 144 p. (In Russ.).
- Crampin, S. (1982). Comments on "Possible forms of seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans" by George E. Backus. *Journal of Geophysical Research*, 87, 4634-4640.
- Didenko, A.N., Efimov, A.S., Nelyubov, P.A., Salnikov, A.S., Staroseltsev, V.S., Shevchenko, B.F., Goroshko, M.V., Guryanov, 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.
- Dobretsov, N.L. (1980). *Vvedenie v global'nuju petrologiju* [Introduction to global petrology]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 200 p. (In Russ.).
- Dobretsov, N.L., Sobolev, N.V., Shatsky, B.C., et al. (1989). *Jeklogity i glaukofanovyje slancy v skladchatyh oblastjakh* [Eclogites and glaucophane shales in folded areas]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 236 p. (In Russ.).

- Dortman, N.B. (ed.). (1976). *Fizicheskie svoystva gornyh porod i poleznyh iskopaemyh (petrofizika). Spravochnik geofizika* [Physical properties of rocks and minerals (petrophysics): Handbook of Geophysics]. Moscow, Russia: Nedra Publ., 527 p. (In Russ.).
- Egorkin, A.V., Zyuganov, S.K., & Chernyshev, N.M. (1984). [Verhnyaya mantiya Sibiri]. In *27 Mezhdunarodnyj geologicheskij kongress, sekcija C08. Doklady. T. 8* [27 International Geological Congress, Geophysics, section C08, reports, V. 8] (pp. 27-42). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Fuchs, K. (1984). [Seismic anisotropy and composition of the continental subcortical lithosphere]. In *27 Mezhdunarodnyj geologicheskij kongress, sekcija C08. Doklady. T. 8* [27 International Geological Congress, Geophysics, section C08, reports, V. 8] (pp. 43-52). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Goshko, E.Y., Zhabin, V.V., & Salnikov, A.S. (2018). [Crustal structure at the junction of the Aldano-Stanovoy shield and the Sayan-Baikal folded region along a control profile 1-SB]. In *Geologija i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy VIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, 18-20 aprelya 2018 g.: v 2 t. T. 2* [Geology and mineral resources of the North-East of Russia: materials of the VIII all-Russian scientific-practical conference, April 18-20, 2018, in 2 v. V. 2] (pp. 52-55). Yakutsk, Russia: NEFU Publ. House. (In Russ.).
- Hess, H. (1964). Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans. *Nature*, 2, 629-631.
- Kashubin, S.N. (2001). *Sejsmicheskaja anizotropija i eksperimenty po ejo izucheniju na Urale i Vostochno-Evropejskoj platforme* [Seismic anisotropy and experiments on its study in the Urals and the East European platform]. Yekaterinburg, Russia: UB RAS Publ., 182 p. (In Russ.).
- Kharkiv, A.D. (1976). [Mineralogo-geochemical features of mantle rock inclusions in Yakutia kimberlites and their relation to diamond content]. *Geohimija* [Geochemistry], 7, 983-996. (In Russ.).
- Krasnova, M.A., & Chesnokov, E.M. (1986). *Jeksperimental'noe issledovanie sejsmicheskoi anizotropii litosfery Zemli v SSSR i za rubezhom* [Experimental study of seismic anisotropy of the Earth's lithosphere in the USSR and abroad]. Moscow, Russia: VIMS Publ., 36 p. (In Russ.).
- Krylov, S.V., Mandelbaum, M.M., Seleznev, V.S., Soloviev, V.M., & Elinov, V.D. (1990). [Detailed deep seismic studies in the upper Angara region of the Baikal rift zone]. *Geologija i geofizika* [Geology and Geophysics], 31(7), 17-27. (In Russ.).
- Krylov, S.V., Mishenkin, B.P., Mishenkina, Z.R., Petrik, G.V., Sergeev, V.N., Sheludko, I.F., Ten, E.N., Kulchinsky Yu. V., Mandelbaum, M.M., Seleznev, V.S., Soloviev, V.M., & Suvorov, V.D. (1993). *Detal'nye sejsmicheskie issledovaniya litosfery na R- i S-volnah* [Detailed deep seismic studies in the upper Angara region of the Baikal rift zone]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 199 p. (In Russ.).
- 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, U., Prokopen, A.V., Timofeev, V.F., Tomurtogoo, O., & Yan, H. (2003). [Model of formation of orogenic belts of Central and North-East Asia]. *Tihookeanskaja geologija* [Pacific Geology], 22(6), 1-41. (In Russ.).
- Ringwood, A.E. (1981). *Sostav i petrologija mantii Zemli* [Composition and petrology of the Earth's mantle]. – Moscow, Russia: Nedra Publ., 584 p. (In Russ.).
- Seleznev, V.S., Solovyov, V.M., Suvorov, V.D., et al. (1987). [The use of transverse waves in deep seismic sounding in Western Yakutia]. *Geologija i geofizika* [Geology and Geophysics], 1, 109-117. (In Russ.).
- Shearer, P.M., & Orcutt, J.A. (1986). Compressional and shear wave anisotropy in the oceanic lithosphere – the Ngendei seismic refraction experiment. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 87, 967-1003.
- Shevchenko, B.F., Goroshko, M.V., Didenko, A.N., Guryanov, V.A., Staroseltsev, V.S., & Salnikov, 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.
- Sobolev, N.V. (1974). *Glubinnye vkljuchenija v kimberlitah i problema sostava verhnej mantii* [Deep inclusions in kimberlites and the problem of upper mantle composition]. Novosibirsk, Russia: Nauka Publ., 264 p. (In Russ.).
- Solonenko, V.P. (1968). [Seismotectonics and modern structural development of the Baikal rift zone]. In *Bajkal'skij rift* [Baikal rift] (pp. 57-71). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Soloviev, V.M. (1988). *Ispol'zovanie poperechnykh voln pri glubinnom sejsmicheskom zondirovanii v Zapadnoj Jakutii: avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk* [The use of transverse waves in deep seismic sounding in Western Yakutia. Cand. geol. and min. sci. diss.]. Novosibirsk, Russia, 16 p. (In Russ.).
- Soloviev, V.M., Chechelniczky, 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]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 8(4), 1065-1082. (In Russ.). doi: 10.5800/GT-2017-8-4-0333
- Solovyev, V.M., Galyova, N.A., Salnikov, A.S., Seleznev, V.S., Liseikin, A.V., Kashubina, T.V., & Vyatkina, D.V. (2019). [Peculiarities of the Transbaikalian seismic structure at the site of the base line 1-SB “Vostochny” on data of differently polarized P- and

- S-waves]. *Geologija i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia], 3, 57-71. (In Russ.).
- Solovyev, V.M., Seleznev, V.S., Chechel'nitsky, V.V., & Galyova, N.A. (2020). Upper mantle of Baikal and Transbaikalia according to the area data of seismological research. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(1), 7-17. (In Russ.).
- Solovyev, V.M., Seleznev, V.S., Salnikov, A.S., Liseikin, A.V., Romanenko, I.E., Elagin, S.A., Schoenmaier, A.E., & Serezhnikov, N.A. (2017). [Deep structure of the Zabaikalsky portion of the Central-Asian folded belt from deep seismic sounding (1-SB survey base line)]. *Geologija i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia], 4, 91-103. (In Russ.).
- Suvorov, V.D., Kreinin, A.B., Podmarkova, I.V., et al. (1985). [Areal deep seismic studies in the Malo-Botubinsky district of Yakutia]. *Geologija i geofizika* [Geology and Geophysics], 1, 82-90. (In Russ.).
- Suvorov, V.D., Kreinin, A.B., Uarov, V.F., et al. (1988). [Deep seismic studies in the Central part of Western Yakutia]. *Geologija i geofizika* [Geology and Geophysics], 2, 91-95. (In Russ.).
- Volarovich, M.P. (ed.). (1978). *Spravochnik po fizicheskim svojstvam gornyh porod i mineralov pri vysokih termodinamicheskikh parametroh* [Handbook of physical properties of rocks and minerals at high thermodynamic parameters]. Moscow, Russia: Nedra Publ., 236 p. (In Russ.).
- Volarovich, M.P., Bayuk, E.I., & Efimova, G.A. (1975). *Uprugie svojstva mineralov pri vysokih davlenijah* [Elastic properties of minerals at high pressures]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 132 p. (In Russ.).
- Zverev, S.M. (1999). *Deep seismic sounding in oceans over 30 years of expeditions: methods and wave fields. Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 35(7-8), 657-677.

Information about authors

Solovyev Victor Mikhaylovich, PhD, Deputy Director of the Altai-Sayan Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (ASB GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: solov@gs.nsc.ru

Seleznev Viktor Sergejevich, Dr., Director of the Seismological Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (SEB GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: sv0428@mail.ru

Chechel'nitsky Vladimir Vasil'yevich, PhD, Deputy Director of the Baikal Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (BB GS RAS), Irkutsk, Russia. E-mail: chechel@crust.irk.ru

Salnikov Alexander Sergejevich, Dr., Head of Department of the Joint Stock Company "Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources" (JSC "SRIGG&MR"), Novosibirsk, Russia. E-mail: assalnikov@mail.ru

Galyova Natalya Aleksandrovna, Junior Researcher of the ASB GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: tatapelya@gmail.com