

А. С. Сальников^{1✉}, В. М. Соловьев², В. С. Селезнев³, А. Е. Шенмайер²

Глубинные сейсмические исследования на восточной окраине архейского Сибирского кратона (в створе опорного профиля 3-ДВ)

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Алтае-Саянский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Сейсмологический филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: assalnikov@mail.ru

Аннотация. В работе представлена геолого-геофизическая модель земной коры, полученная с использованием новой технологии глубинных сейсмических зондирований на Центральном участке опорного профиля 3-ДВ, выполненного на северо-востоке Евразии. Средние скорости продольных волн в земной коре изменяются вдоль профиля от 6.4 км/с до 6.8 км/с, граничная скорость - от 7.7 до 8.5 км/с. Мощность земной коры меняется от 40-45 км до 50-55 км.

Ключевые слова: опорные профили, мощные вибраторы, коррелограмма, глубинные сейсмические разрезы, земная кора, поверхность Мохоровичича

A. S. Salnikov^{1✉}, V. M. Soloviev², V. S. Seleznev³, A. E. Shenmayer²

Deep seismic research on the eastern edge of the Archean Siberian craton (in the 3-DV reference profile)

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²Altai-Sayan Branch GS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³Seismological Branch GS RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: assalnikov@mail.ru

Abstract. The paper presents a geological and geophysical model of the Earth's crust obtained using a new technology of deep seismic sounding on the Central section of the 3-DV reference profile in northeastern Eurasia. The average velocities of longitudinal waves in the Earth's crust vary along the profile from 6.4 km/s to 6.8 km/s, and the boundary velocity ranges from 7.7 to 8.5 km/s. The thickness of the Earth's crust varies from 40-45 km to 50-55 km.

Keywords: profiles, powerful vibrators, correlogram, deep seismic section, the Earth's crust, the Moho

Введение

В России изучение глубинного строения земной коры на всю ее мощность носит системный характер и осуществляется в рамках региональных геолого-геофизических исследований по сети опорных геолого-геофизических профилей, пересекающих практически все крупные геологические структуры Северо-Восточной Евразии [1].

Методы и материалы

Полевые исследования методом ГСЗ были выполнены на 800 километровом Центральном участке профиля 3-ДВ от п. Томмот до г. Якутск (450-километровая расстановка 4) и от г.Якутск до п.Теплый ключ (350-километровая расстановка 5), проходящего вдоль федеральной трассы М-056 (рис. 1).

Была реализована достаточно плотная система наблюдений. Расстояния между источниками возбуждения составляли в среднем 15-30 км, между приемниками - 4-6 км. Обработка источников возбуждения осуществлялась взрывным и вибрационным способом. В качестве регистрирующей аппаратуры применялись 24-разрядные станции «Роса-А» и «Байкал-АС» с группами вертикальных и трехкомпонентных приборов. Координаты установки сейсмоприемников и источников возбуждения определялись с использованием GPS-приемников.

Детальный анализ волнового поля показывает, что на записях уверенно выделяются волны в первых вступлениях от границ в верхней части земной коры (осадочного чехла), поверхности кристаллических пород и поверхности Моховичича (рис. 2).

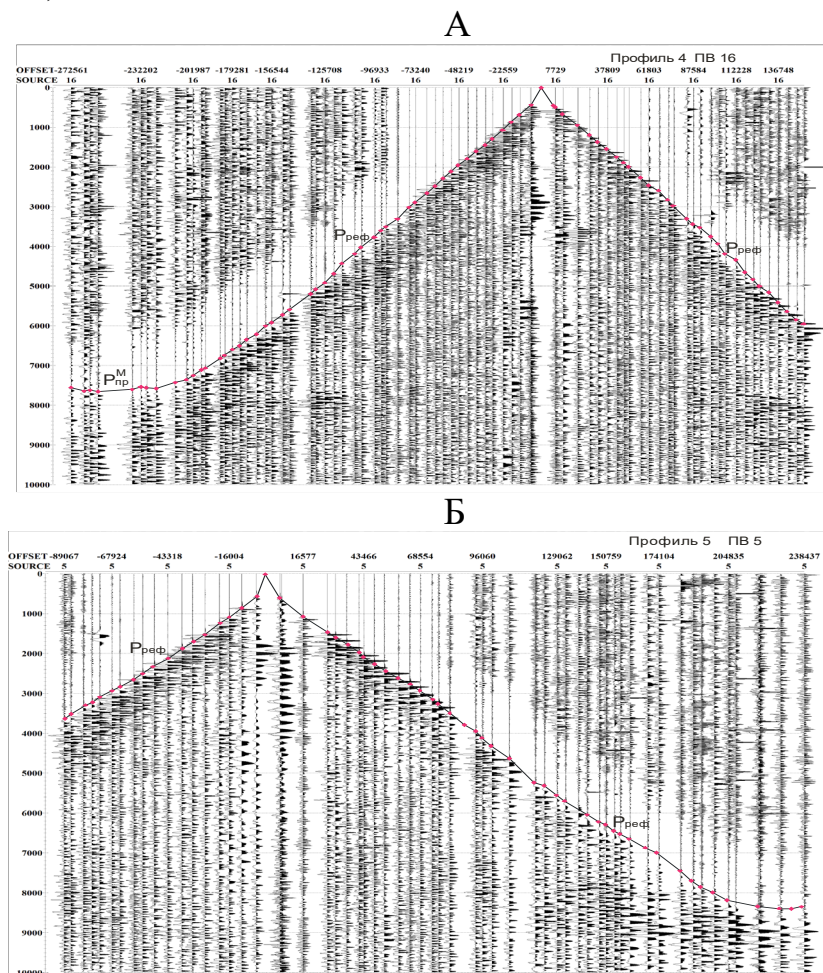


Рис. 2. Примеры динамических годографов от взрывного источника на расстановках 4 (А) и 5 (Б) профиля 3-ДВ (Центральный участок)

Скорости Р-волн в первых вступлениях на удалениях 0 – 10÷15 км в целом изменяются от 3.0 до 5.6-5.8 км/с (рис. 3). На базах свыше 10-15 км скорости продольных волн по годографам возрастают до 6.0 - 6.10 км/с. Уверенное прослеживание первых волн с кажущимися скоростями 6.0-6.1 км/с продолжается до удалений в 60-70 км. На больших удалениях (80-120 км) практически на всех годографах первых волн (только с разных удалений) отмечается уменьшение кажущихся скоростей на 0.2-0.3 км/с. На удалениях свыше 100 – 160 км кажущиеся скорости продольных волн по годографам снова возрастают до значений 6.4 – 6.7 км/с, соответствующим скоростям продольных волн в средней и нижней коре. На удалениях свыше 200-220 км в первых вступлениях начинают регистрироваться волны с высокими значениями кажущихся скоростей в 8.0-9.0 км/с, по кинематическим, динамическим характеристикам и области прослеживания отнесенным к преломленным волнам от поверхности Мохоровичича (P_{np}^M -волнам). Нагоняющие годографы (достроенные с использованием начальных точек отраженных волн) параллельны и увязываются во взаимных точках по системам встречных и нагоняющих годографов.

По выделенным в результате анализа волнового поля группам продольных преломленных волн построены сводные годографы в прямом и встречном направлениях и увязаны во взаимных точках (рис. 3). Интерпретация волн в первых вступлениях проводилась способом сейсмической томографии на временных задержках рефрагированных волн [7].

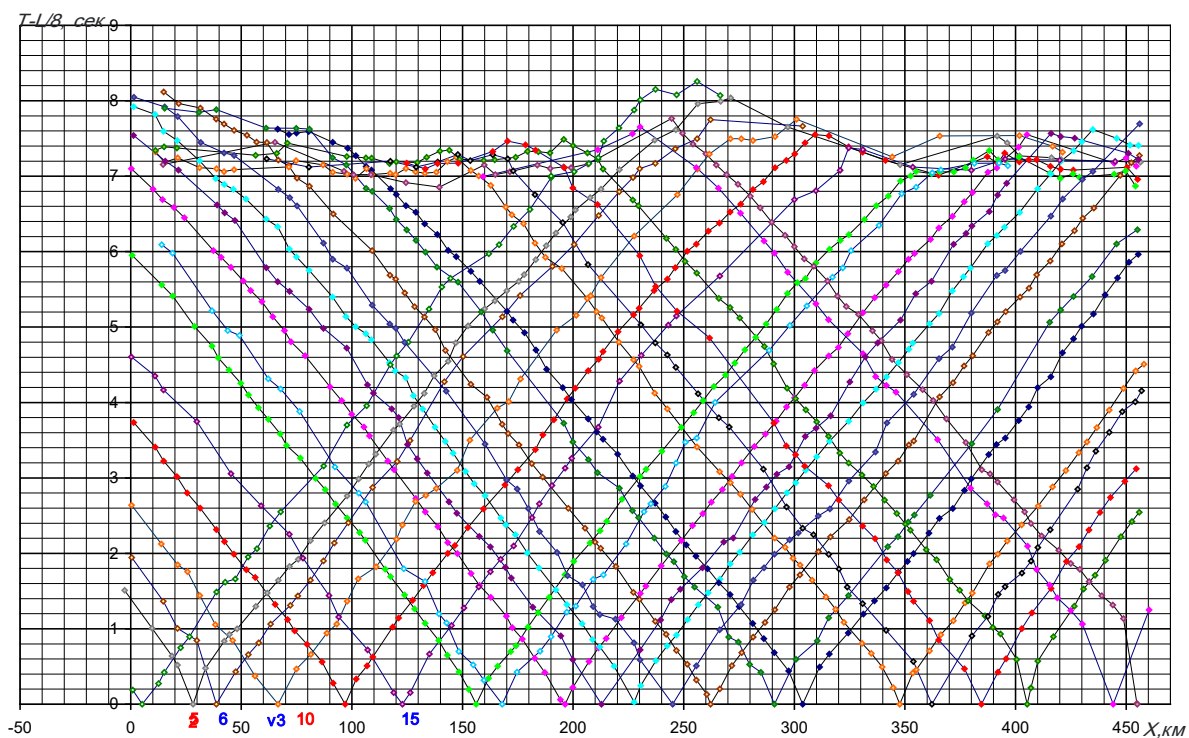


Рис. 3. Редуцированные годографы продольных преломленных волн по расстановке 4 профиля 3-ДВ (Центральный участок)

Наряду с интерпретацией по способу двумерной сейсмической томографии отдельно проводилась интерпретация данных преломленных волн от поверхности Мохоровичича. По годографам $P_{пр}^M$ -волн были определены графики значений кажущихся скоростей в прямом и встречном направлениях, осредненные значения кажущихся скоростей и граничные скорости (с учетом сейсмического сноса). По данным отраженных волн от поверхности Мохоровичича построены сводные редуцированные годографы отраженных волн в квадратичных координатах и поля времен отраженной волны. Глубины до поверхности Мохоровичича на исследуемых профилях определялись с использованием данных отраженных и преломленных волн от границы М.

Результаты

Обобщенный глубинный сейсмический разрез по опорному профилю 3-ДВ (Центральный участок) составлен на основе данных сейсмотомографического разреза земной коры, определения положения поверхности Мохоровичича по данным головных и закритических отраженных волн и освещает строение земной коры и верхи мантии до глубины около 60 км (рис. 4).

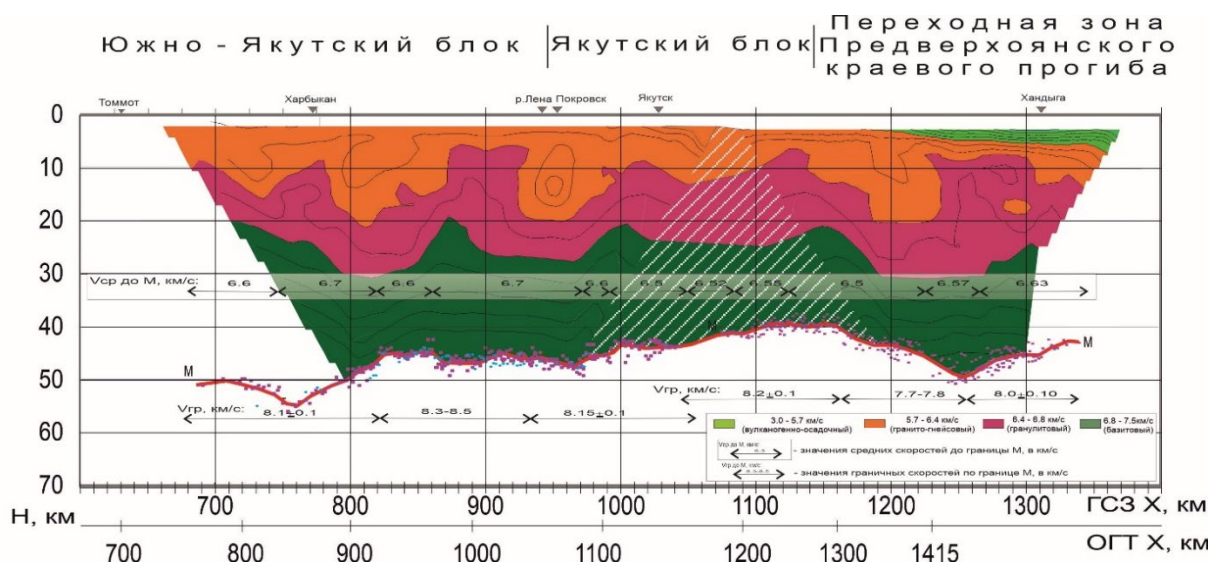


Рис. 4. Геолого-геофизический разрез по Центральному участку профиля 3ДВ (п.Томмот-п.Н.Бестях – п.Теплый Ключ).

Основанием разреза является поверхность Мохоровичича, которая прослежена как отраженными, так и преломленными волнами. Средняя скорость распространения сейсмических волн до нее составляет 6.5-6.7 км/с. Граничная скорость вдоль профиля меняется от 7.7 до 8.5 км/с. Пониженные значения скоростей ($V_{г}=7.7-7.8$ км/с) установлены в области сочленения Якутского блока и Предверхоянского краевого прогиба ($X=1160-1255$ км), а повышенные ($V_{г}=8.3-8.5$ км/с) установлены в зоне сочленения Южно-Якутского блока с Якутским блоком $X=820-935$ км.

Мощность земной коры по профилю изменяется от 40-45 км в центральной части профиля ($X=1000-1200$ км) до 50-55 км в северной ($X=1230-1270$ км) и южной ($X=690-810$ км) частях. Сильное увеличение глубины залегания поверхности Мохоровичича от 45 км до 55 км происходит в центральной части Южно-Якутского блока и от 40 км до 50 км в Переходной зоне Предверхоянского краевого прогиба.

По характеру распределения скоростей в земной коре можно условно (как и ранее на участках профилей ГСЗ профиля 2ДВ, 2ДВ-А и 3ДВ (Южный участок) [2, 8] выделить 4 слоя.

Нижний – базитовый, характеризуется значениями скоростей от 6.8 до 7.4-7.6 км/с. Мощность его на освещенном участке профиля 3ДВ изменяется от 14-16 км в центральной части Южно-Якутского блока ($X=815-830$ км) и в Переходной зоне Предверхоянского краевого прогиба ($X=1190-1210$ км) до 22-28 км в пределах Южно-Якутского блока ($X=700-770$ км, $X=860-880$ км) и Якутского блока ($X=980-1010$ км). Повышение мощности базитового слоя в пределах Южно-Якутского блока привело к значительному увеличению скорости в земной коре до 6.6-6.7 км/с, отмечаемому здесь по данным отраженных волн от границы М. В данной зоне кровля базитового слоя приподнята до глубин 20 км.

На базитовом залегает слой со скоростями, характерными для гранулитовых пород ($V=6.4-6.8$ км/с). Мощность его на большей части профиля составляет 14-16 км. В отдельных частях ($X=760-780$ км, $X=870-930$ км, $X=1235-1300$ км и др.) отмечается столбообразное воздымание гранулитового слоя до глубин 6-10 км и общая мощность на этих участках достигает 20-22 км.

Гранулитовый слой перекрывается пачкой отложений, по скоростной характеристике ($V=5.8-6.4$ км/с) относимых ранее [2] к гранито-гнейсовым образованиям; мощность этого слоя на ряде участков отработанного профиля ($X=785-830$ км, $X=930-965$ км и $X=1185-1235$ км) достигает 20 км. Небольшая мощность гранито-гнейсового слоя в 3-5 км отмечается в Переходной зоне Предверхоянского краевого прогиба ($X=1235-1300$ км) и в Южно-Якутском блоке ($X=870-930$ км), где повышены мощности гранулитового слоя.

На гранито-гнейсовом основании по всему профилю залегает пачка низкоскоростных пород ($V=3.2-5.8$ км/с). На томографическом разрезе она представлена лишь фрагментарно - в северной части профиля на глубинах 3-6 км. На других участках профиля по данным интерпретации преломленных продольных волн на малых удалениях (рис. 3.34) мощность низкоскоростного слоя составляет в целом 1.0-1.3 км. Лишь в центральной части Южно-Якутского блока его мощность минимальна и составляет около 500 м.

Средние скорости продольных волн в земной коре, рассчитанные по томографическим разрезам по данным рефрагированных волн (рис. 4), изменяются вдоль отработанных профилей 4 и 5 от 6.4 км/с до 6.8 км/с (от 6.6 км/с до 6.8 км/с на профиле 4 и от 6.4 км/с до 6.55 км/с на профиле 5) и неплохо (с точностью до 0.1 км/с) коррелируют с данными отраженных волн от поверхности Мохоровичича (рассчитанные по центрам зондирования поля времен). Наблюдаемые же различия в 0.1 км/с связаны с интегральным (осредняющим для протяженного блока)

определением скоростей по центрам зондирований отраженных волн, в отличие от расчета скорости напрямую по разрезу по вертикали.

Заключение

В результате проведенных работ методом ГСЗ на Центральном участке опорного профиля 3-ДВ протяженностью около 800 км выполнен детальный анализ зарегистрированного волнового поля от мощных виброисточников и взрывов, охарактеризовано глубинное строение земной коры и верхней мантии юго-востока Сибирской платформы.

Средние скорости продольных волн в земной коре изменяются вдоль отрабатанных расстановок 4 и 5 от 6.4 км/с до 6.8 км/с (от 6.6 км/с до 6.8 км/с на расстановке 4 и от 6.4 км/с до 6.55 км/с на расстановке 5).

Граничная скорость вдоль профиля меняется от 7.7 до 8.5 км/с. Пониженные значения скоростей ($V_T=7.7-7.8$ км/с) установлены в области сочленения Якутского блока и Предверхоянского краевого прогиба, а повышенные ($V_T=8.3-8.5$ км/с) установлены в зоне сочленения Южно-Якутского блока с Якутским блоком.

Мощность земной коры меняется от 40-45 км до 50-55 км, при этом сильное увеличение глубины залегания поверхности Мохоровичича от 45 км до 55 км происходит в центральной части Южно-Якутского блока и от 40 км до 50 км в Переходной зоне Предверхоянского краевого прогиба.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00609-26) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира», а также в рамках проекта FWZZ-2026-0050 «Сейсмогравитационные неоднородности земной коры Сибири в связи с ее напряженным состоянием, признаками сейсмичности и разработка интерактивных вычислительных технологий построения разномасштабных структурно-скоростных сейсмических моделей».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Кудрявцев И.В., Андросов Е.А., Винокуров И.Ю., Тарасова О.А., Эринчек Ю.М. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии // Региональная геология и металлогения. 2018. № 76. С. 9–21.
2. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Ефимов А.С., Сальников А.С., Чичинин И.С., Кашун В.Н., Романенко И.Е., Елагин С.А., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е., Сережников Н.А., Максимов М.А. Глубинные вибросейсмические исследования на Востоке России / Проблемы информатики. –Новосибирск, 2013, № 3. –С.30-41.
3. Суворов В.Д., Мельник Е.А., Павлов Е.В. Сейсмические неоднородности верхней и всей коры Алдано-Станового щита (профиль 3-ДВ) / Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 1. С. 1-14.
4. Соловьев В.М., Сальников А.С., Тимофеев В.Ю., Шибяев С.В., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е. Глубинные сейсмические исследования на субширотном трансекте Хандыга-

Сусуман-Мякит в области сочленения Евразийской, Североамериканской и Охотоморской континентальных плит / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 4 т. Т. 3. – Новосибирск: СГГА, 2014. –С.65-70.

5. Суворов В.Д., Мельник Е.А. Сейсмическая модель зоны сочленения Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой системы (опорный профиль 3-ДВ) / Физика Земли. 2021. № 6. С. 52-67.

6. Суворов В.Д., Мельник А.Е., Павлов Е.В., Сальников А.С. Моделирование структуры земной коры Сибири и Дальнего Востока по данным широкоугольной сейсмики и гравиметрии вдоль профиля 3-ДВ // Тезисы докладов 7^й Международной конференции и выставке «Санкт-Петербург-2016. Через интеграцию геонаук — к постижению гармонии недр», 11-14 апреля 2016 г., Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург, EAGE. 2016. P017.

7. Мишенькина З.Р., Шелудько И.Ф., Крылов С.В. Использование линеаризованной постановки обратной кинематической задачи для двумерных полей времен $t(x, l)$ рефрагированных волн. Численные методы в сейсмических исследованиях. -Новосибирск, «Наука», 1993, с.140-152.

8. Павленкова Н. И., Кашубин С. Н., Павленкова Г. А. Земная кора глубоких платформенных впадин Северной Евразии и природа их формирования / Физика Земли, 2016, № 5, с. 150–164

© А. С. Сальников, В. М. Соловьев, В. С. Селезнев, 2026