

## Глубинное сейсмическое строение Сихотэ-Алиньской складчатой системы по данным ГСЗ (в створе опорного профиля 8-ДВ)

*В. М. Соловьев<sup>1</sup>\*, А. С. Сальников<sup>2</sup>, В. С. Селезнев<sup>3</sup>, Т. В. Кашибина<sup>4</sup>, Н. А. Галева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «Сибирский институт геологии, геофизики и минерального сырья», г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>3</sup> Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>4</sup> Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

\*e-mail: solov@gs.nsc.ru

**Аннотация.** Представлены результаты глубинных сейсмических исследований на Сихотэ-Алиньском фрагменте опорного геофизического профиля 8-ДВ. Построен глубинный сейсмический разрез земной коры и верхней мантии с распределением скорости продольных волн. Установлено сложно дислоцированное строение мощного палеозойского осадочного комплекса в пределах Среднеамурской впадины. Кристаллические породы со скоростью продольных волн в 6.0–6.2 км/с залегают на глубинах от 8 до 13 км на разных участках Среднеамурской впадины и 4–6 км в пределах Сихотэ-Алиньского орогенного комплекса. Во всей толще земной коры Сихотэ-Алиньского фрагмента профиля 8-ДВ скорость продольных волн составляет 6.3–6.35 км/с. Мощность земной коры изменяется от 32 до 35 км. По границе Мохоровичича скорость продольных волн в целом составляет 7.8–8.3 км/с. Проведена корреляция выделенных аномалий по данным *P*-волн с структурно-тектоническими зонами.

**Ключевые слова:** профиль ГСЗ, скорости продольных волн, сейсмический разрез

## Deep seismic structure of the Sikhote-Alin folded system according to the GSZ (in the alignment of the reference profile 8-DV)

*V. M. Solovyev<sup>1</sup>\*, A. S. Salnikov<sup>2</sup>, V. S. Seleznev<sup>3</sup>, T. V. Kashubina<sup>4</sup>, N. A. Galyova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Altai—Sayan Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>АО «Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources», Russian Federation

<sup>3</sup>Seismological Branch of the FRC UGS RAS, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>4</sup>All-Russian Scientific Research Geological Institute named after A. P. Karpinsky, Saint Petersburg, Russian Federation

\*e-mail: solov@gs.nsc.ru

**Abstract.** The results of deep seismic studies on the Sikhote-Alin fragment of the reference geophysical profile 8-DV are presented. A deep seismic section of the Earth's crust and upper mantle with the velocity distribution of longitudinal waves is constructed. The complex dislocated structure of a powerful Paleozoic sedimentary complex within the Middle Amur Depression has been established. Crystalline rocks with longitudinal wave velocities of 6.0–6.2 km/s lie at depths from 8 to 13 km in different parts of the Middle Amur Depression and 4–6 km within the Sikhote-Alin orogenic complex. In the entire thickness of the Earth's crust of the Sikhote-Alin fragment of the 8-DV profile, the velocities of longitudinal waves are 6.3–6.35 km/s. The thickness of the Earth's crust

varies from 32 to 35 km. Along the Mohorovichich boundary, the velocity of longitudinal waves in general is 7.8-8.3 km/s. The correlation of the identified anomalies according to P-wave data with structural-tectonic zones was carried out.

**Keywords:** GSZ profile, longitudinal waves, longitudinal wave velocities, seismic section

### *Введение*

Опорный геолого-геофизический профиль 8-ДВ (Восточно-Становой – Сихотэ-Алиньский) отрабатывался в 2016-2018 гг. в пределах крупных структурно-тектонических элементов земной коры (Восточно-Становая складчато-блоковая система, Амуро-Охотская складчатая система, Сихотэ-Алиньская складчатая система) [1], различающихся особенностями геологического строения: набором геологических формаций, степенью метаморфизма и дислоцированности отложений. В представленной ниже статье освещено глубинное сейсмическое строение земной коры и верхней мантии по данным продольных волн восточного фрагмента профиля 8-ДВ в пределах Сихотэ-Алиньской складчатой системы (рис. 1).



Рис. 1. Схема сейсмических исследований

### *Волновое поле продольных волн*

Полевые исследования на Сихотэ-Алиньском фрагменте профиля 8-ДВ выполнялись по методике точечных зондирований [2] на двух 300-километровых расстановках: 6 и 7 (рис. 1). Расстояния между источниками возбуждения (взрывы в водоемах зарядов весом 3 - 5 тонн) составляли 20-40 км, между станциями с вертикальными приборами от 5 до 8 км. Ниже, на рисунке 2, представлены примеры волнового поля продольных волн, освещающих земную кору и верхнюю мантию. В пределах расстановок 6 и 7 скорость Р-волн в первых вступлениях на удалениях 0–15 км в целом изменяется от 4.0-4.4 км/с до 5.0-5.8 км/с. Наиболее высокими значениями скорости характеризуются участки высо-

когорных хребтов (Баджальского, Мяочан и Сихотэ-Алинь [3], рис. 1) и плоскогорий; пониженные значения скорости Р-волн установлены на участках дельты Амура и поймы реки Тумнин в районе Татарского пролива (рис. 1). На базах свыше 10-15 км и до больших удалений в 130-150 км скорость продольных волн по основной массе годографов возрастает незначительно, примерно до 5.9 - 6.15 км/с. На удалениях свыше 130-140 км на расстановке 6 и свыше 160-180 км на расстановке 7 в первых вступлениях начинают регистрироваться волны с высокими значениями кажущейся скорости в 8.1-8.7 км/с, по кинематическим, динамическим характеристикам и области прослеживания отнесенным к преломленным продольным волнам от поверхности Мохоровичича ( $P_{np}^M$ -волнам).

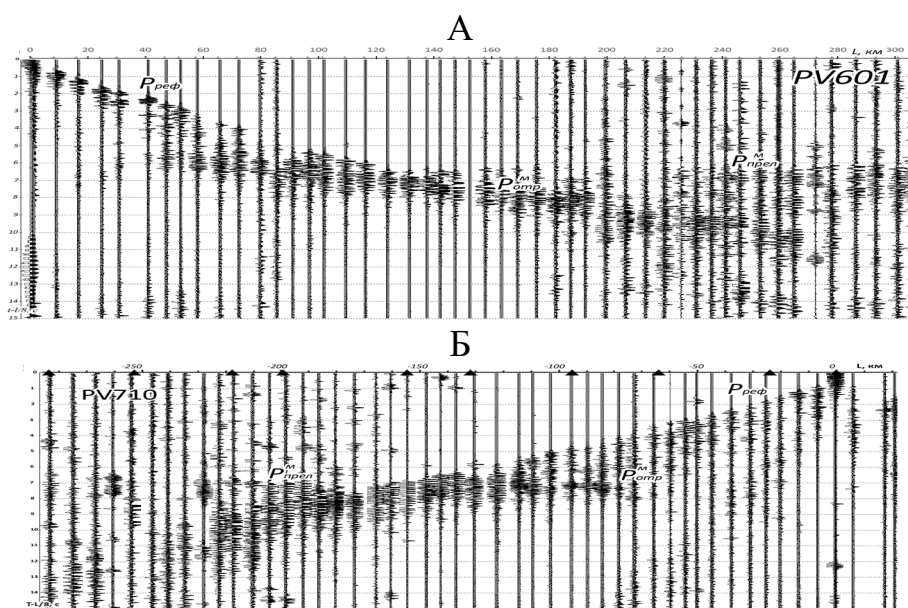


Рис. 2. Примеры сводных динамических редуцированных годографов, полученные на расстановках 6 (А) и 7 (Б) профиля 8-ДВ

Продольные волны от поверхности Мохоровичича на сейсмограммах состоят из двух-трех фаз с видимыми частотами 8–11 Гц. Нагоняющие годографы параллельны и увязываются во взаимных точках по системам встречных и нагоняющих годографов. Осредненные значения  $V^*$  (кажущейся скорости) по годографам составляют 7.7-8.7 км/с.

В последующих частях записей поля продольных волн на удалениях 80-200 км на ряде годографов выделяется мощная отраженная волна, идентифицируемая по кинематическим и динамическим признакам (рис. 2) как отраженная волна от поверхности Мохоровичича ( $P_{отр}^M$ ). Представлена она как трехфазными, так и многофазными группами колебаний с видимыми частотами 6-10 Гц.

### **Интерпретация и результаты**

Интерпретация данных продольных волн на двух расстановках Сихотэ-Алиньского фрагмента профиля 8-ДВ проводилась традиционными в ГСЗ спосо-

бами [2, 4]. Были построены годографы рефрагированных Р-волн от границ в земной коре, преломленных и отраженных волн от границы Мохоровичича, увязанные во взаимных точках. По данным рефрагированных волн рассчитаны томографические разрезы земной коры до глубин 15–25 км. По данным преломленных и отраженных продольных волн от границы  $M$  определялась средняя (эффективная) скорость  $P$ -волн в земной коре, положение поверхности Мохоровичича и распределение вдоль нее значений граничной скорости.

Осредненные значения эффективной скорости продольных волн в земной коре ( $V_{эфф}$ ), определенные по сводным годографам в квадратичных координатах, составили  $6.3 \pm 0.1$  км/с и  $6.35 \pm 0.1$  км/с для расстановок 6 и 7. По годографам  $P_{np}^M$ -волн построены графики значений кажущейся скорости в прямом и встречном направлениях, определены осредненные значения кажущейся скорости и граничная скорость (с учетом сейсмического сноса) [4]. Граничная скорость  $P_{np}^M$ -волн по поверхности Мохоровичича в целом составляет 8.1 – 8.3 км/с. Выделен ряд участков с пониженным значением скорости в 7.8–8.0 км/с (главным образом участки  $X=90$ –130 км и  $X=155$ –180 км расстановки 7). Глубины до поверхности Мохоровичича определялись с использованием данных отраженных волн от границы  $M$  при средних значениях  $V_{эфф}$  в  $6.3 \pm 0.1$  км/с для расстановки 6 и  $6.35 \pm 0.1$  км/с для расстановки 7 профиля 8-ДВ.

В результате сводной интерпретации волн в первых вступлениях, преломленных и отраженных волн от границы Мохоровичича построены глубинные сейсмические разрезы по расстановкам 6 и 7 и сводный результирующий разрез по Сихотэ-Алиньскому фрагменту профиля 8ДВ (рис. 3).

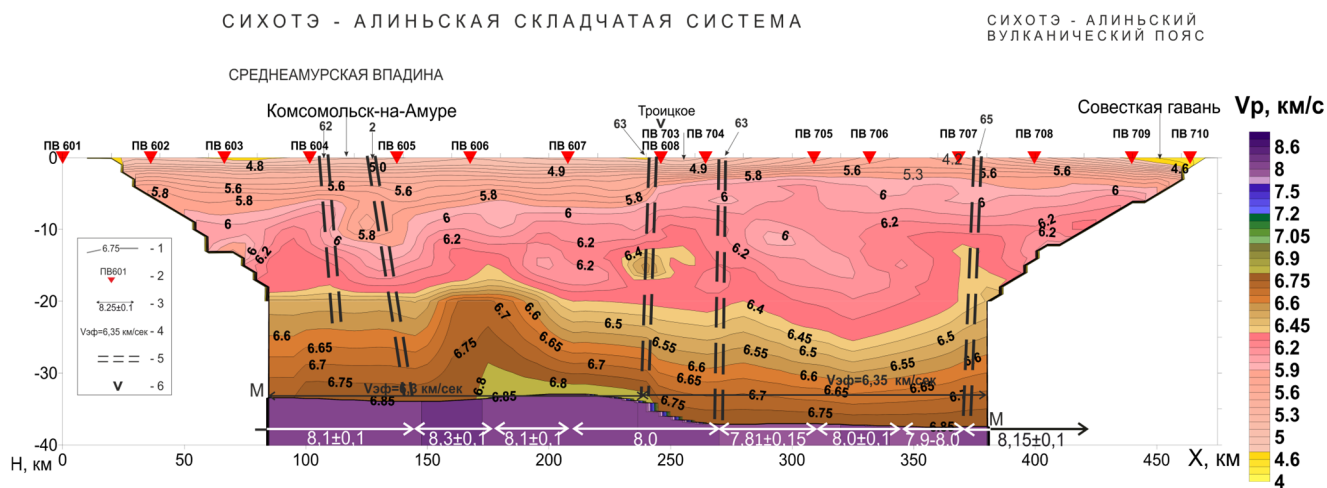


Рис. 3. Глубинный сейсмический разрез по данным продольных волн на Сихотэ-Алиньском фрагменте профиля 8-ДВ.

1 – изолинии скорости в км/с; 2 – источники возбуждения на расстановках 6 и 7; 3, 4 – граничная и средняя скорости соответственно; 5 – разломы (62, 63, 65 – соответственно Амурский, Центральный Сихотэ-Алиньский, Верхнеануйский по [3], 2 - Итунь-Илан по [5]); 6 – линия состыковки расстановок 6 и 7)



### Обсуждение результатов

В структурно-тектоническом плане Сихотэ-Алиньский фрагмент профиля 8-ДВ находится в пределах крупнейшего Тихоокеанского тектонического пояса; в качестве его крупных структурных единиц в створе Сихотэ-Алиньского фрагмента профиля выделяются Сихотэ-Алиньский орогенный пояс с наложенной Среднеамурской впадиной в западной части (рис. 4А) и Восточно-Сихотэ-Алиньский вулканоген (рис. 3) [3, 6]. Особенности геологического строения Сихотэ-Алиньской складчатой области находят свое отражение в структурных и скоростных характеристиках сейсмического разреза по Сихотэ-Алиньскому фрагменту профиля 8-ДВ. Так в створе профиля по глубинному Центральному Сихотэ-Алиньскому разлому обособляется мощная низкоскоростная осадочная Среднеамурская впадина ( $X=20-240$  км на рис. 3).

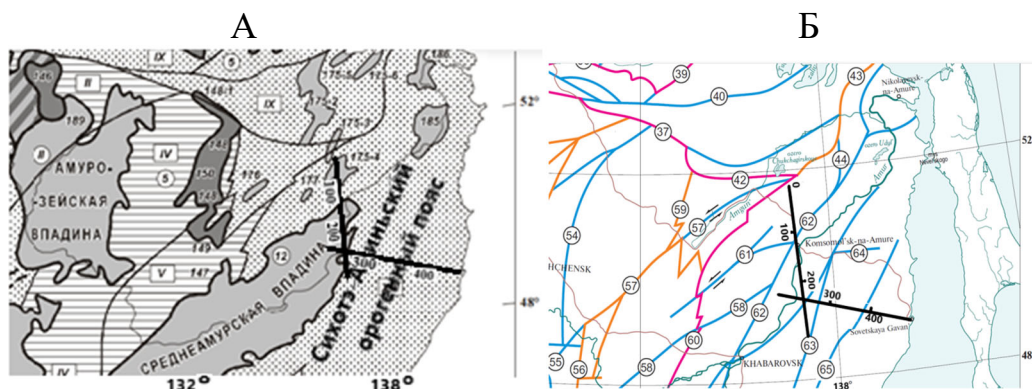


Рис. 4. Фрагмент тектонического районирования осадочных структур (А) и региональных разломов (Б) по [3] в створе профиля

В верхней части разреза впадины отмечены пониженные значения скорости продольных волн в 4.0-5.0 км/с. Практически горизонтальное положение изолиний скорости в 5.0-5.6 км/с, отражающее горизонтальное расположение осадочных слоев, отмечается до глубин ~ в 3-4 км. Согласно геологическим и сейсмостратиграфическим исследованиям [3, 6, 7] они могут отвечать кайнозойским отложениям с меловым комплексом. Ниже отмечается неоднородно-блоковое строение высокоскоростных слоев в 5.7-5.9 км до глубин 7-13 км, представляющих, по-видимому, дислоцированные структуры среднепалеозойского геосинклинального комплекса [6] (рис. 3). Наиболее мощная толща этих пород до глубин 13 км отмечается на участке  $X=105-145$  км. Северная часть зоны прогиба этой толщи совпадает с глубинным Амурским разломом (рис. 3, рис. 4Б); южная часть прогиба совпадает с разломом Итунь-Илан [5] (рис. 3). Кристаллические протерозойские породы со скоростями 6.0-6.3 км/с под Среднеамурской впадиной находятся на глубинах 7-8 км на участках  $X=30-110$  км  $X=150-240$  км и 14-15 км – на участке  $X=110-150$  км (рис. 3). Более высокоскоростные породы со скоростями в 6.4-6.6 (до 6.8) км/с под Среднеамурской впадиной начинают прослеживаться на глубинах 17-18 километров.

Сихотэ-Алиньский орогенный пояс в створе профиля представлен антиклинорием с воздыманием в центральной части ( $X=325-375$  км, рис. 3) предположительно палеозойских вулканогенно-кремнисто-терригенных пород [6]. Амплитуда смещений палеозойских отложений по Центральному Сихотэ-Алиньскому разлому (левой его ветви на рис. 4Б) на участке сочленения с Среднеамурской впадиной ( $X=235-250$ ) составляет 4-5 километров (рис. 3). Кристаллические породы предположительно протерозойского возраста по [7] со скоростями 6.0-6.2 км/с под центральной частью Сихотэ-Алинского орогенного комплекса прослеживаются с глубин 4-5 км до глубин 18-20 км (рис. 3). В восточной и западной частях орогенного комплекса в глубинном трассировании Центрального Сихотэ-Алиньского и Верхнеанюйского разломов (рис. 4Б) с глубин  $\sim 12-13$  км выделяются высокоскоростные (в 6.4-6.6 км/с) породы, которые можно отнести к интрузивным магматическим очагам.

Глубинное строение Сихотэ-Алиньского вулканоплутонического пояса освещено менее детально. В восточном его окончании в верхней части разреза залегают низкоскоростные мезозойские осадочные отложения (4.0-5.0 км/с, рис. 3). Нижележащий палеозойский комплекс со скоростями 5.6-5.9 км/с на глубинах  $\sim 5$  км сменяется толщей кристаллических пород со скоростями 6.0-6.2 км/с, предположительно протерозойского возраста [6].

Мощность земной коры в целом по Сихотэ-Алиньскому фрагменту профиля 8-ДВ составляет 32-34 км. Повышенные значения мощности в 34 км установлены в центральной и восточной части фрагмента, а наиболее низкие значения мощности земной коры в 32-33 км отмечены в его северной части.

Граничная скорость продольных волн по поверхности Мохоровичича на большей части Сихотэ-Алиньского фрагмента имеет нормальные значения в  $8.1 \pm 0.1$  км/с (рис. 3). Повышенные значения граничной скорости в  $8.3 \pm 0.1$  км/с отмечены под центральной частью Среднеамурской впадины ( $X=145-170$  км). Пониженные значения граничной скорости в  $7.8 \pm 0.1$  км/с и 7.9-8.0 км/с отмечены в центральной и восточной частях Сихотэ-Алиньского орогенного пояса на участках ( $X=270-310$  км) и ( $X=335-360$  км) соответственно (рис. 3). Зоны пониженной скорости по границе М коррелируют с глубинным трассированием региональных разломов, главным образом Центрального Сихотэ-Алиньского и Верхнеанюйского (рис. 3). Локальное понижение граничной скорости продольных волн до 8.0 км/с отмечается также на участке  $X=110-140$  км в зоне Амурского глубинного разлома.

Средняя скорость продольных волн в земной коре Сихотэ-Алиньского фрагмента в целом увеличивается от  $6.3 \pm 0.1$  км/с в северной его части (под Среднеамурской впадиной) до 6.35 км/с в восточной части (центральная часть Сихотэ-Алиньского орогенного комплекса) (рис. 3). В низах земной коры скорость продольных волн составляет 6.75 - 6.8 км/с (рис. 3).

Полученные данные о глубинном строении по ряду позиций, например мощность земной коры и ее тип, коррелируют с ранее имеющимися сведениями по региону [3, 8]; в части детального строения верхней коры и распределения значений граничной скорости по поверхности Мохоровичича получены новые

ценные сведения, чрезвычайно важные для построения моделей геодинамического развития активного Сихотэ-Алиньского орогенного пояса.

### **Выводы**

Установлены особенности глубинного сейсмического строения земной коры и верхней мантии крупных тектонических структур Тихоокеанского тектонического пояса (Среднеамурской впадины, Сихотэ-Алиньского орогенного комплекса и Сихотэ-Алиньского вулcano-плутонического пояса) в створе Сихотэ-Алиньского фрагмента опорного геофизического профиля 8-ДВ.

Сихотэ-Алиньский орогенный пояс в створе профиля представлен антиклинорием с воздыманием в центральной части предположительно палеозойских вулканогенно-кремнисто-терригенных пород со скоростью продольных волн 5.5-5.6 км/с; в пределах Среднеамурской впадины установлено сложно дислоцированное строение мощного палеозойского осадочного комплекса с крупными грабеноподобными погружениями до глубин в 13 километров. Кристаллические породы со скоростью продольных волн в 6.0-6.2 км/с залегают на глубинах от 8 до 13 км на разных участках Среднеамурской впадины и 4-6 км в пределах Сихотэ-Алиньского орогенного комплекса и Сихотэ-Алиньского вулcano-плутонического пояса.

Поверхность Мохоровичича расположена на глубинах 32-33 км в северной части фрагмента и 34-35 км в центральной и восточной частях Сихотэ-Алиньского фрагмента профиля 8-ДВ. По границе Мохоровичича скорость продольных волн в целом составляет 8.1-8.3 км/с, выделен ряд участков с пониженными значениями  $V_p$  до 7.8-8.0 км/с в зонах сочленения крупных блоков земной коры.

Значительные сейсмические неоднородности в земной коре и мантии коррелируют с крупными региональными разломами территории – Центральным-Сихотэ-Алиньским, Амурским, Верхнеануйским, Итунь-Илан.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) 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».

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д. и др. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии // Региональная геология и металлогения. – 2018. – № 76. – С. 9-21.
2. Пузырев Н.Н., Крылов С.В., Мишенькин Б.П. Методика рекогносцировочных глубинных сейсмических исследований. – Новосибирск: Наука. – 1975. – 158 с.
3. Тектоника, глубинное строение, металлогения области сочленения Центрально-азиатского и Тихоокеанского поясов. Объяснительная записка к Тектонической карте масштаба 1:1500000. – Владивосток; Хабаровск: ДВО РАН, 2005. – 264 с.
4. 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, геофизика и минеральное сырье Сибири: Т. 4. – Новосибирск : СНИИГГиМС, 2014. – №4. – С. 74-86.

5. Забродин В.Ю. Тектоника и эволюция северо-восточного окончания восточно-Азиатского рифтового пояса // Тихоокеанская геология. – 2017. – Т. 36. – №3. – С. 3-11.
6. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Объяснительная записка. Санкт-Петербург, 2008.
7. Кириллова Г.Л., Лю Чжаоцзюнь, Ван Сымин. Стратиграфическая корреляция верхне-мезозойских-кайнозойских разрезов Среднеамурского (Саньцзянского) осадочного бассейна // Тихоокеанская геология. – 1996. – №6. – С. 81-102.
8. Малышев Ю.Ф. Типы земной коры Восточной Азии и их геологическая интерпретация // Тихоокеанская геология. – 2001. – Т. 20. – №6. – С. 3-17.

© В. М. Соловьев, А. С. Сальников, В. С. Селезнев, Т. В. Кашубина, Н. А. Галёва, 2022