

## **СЕЙСМОГРАВИТАЦИОННАЯ СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА (ОПОРНЫЙ ПРОФИЛЬ 3-ДВ)**

### ***Владимир Дмитриевич Суворов***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, тел. +7 (383) 330-60-18, e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

### ***Евгений Владимирович Павлов***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, тел. +7 (383) 330-41-22, e-mail: PavlovEV@ipgg.sbras.ru

### ***Елена Александровна Мельник***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга 3, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией глубинных геофизических исследований и региональной сейсмичности, тел. +7 (383) 330-60-18, e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Рассматриваемые данные являются частью комплекса геофизических исследований вдоль профиля 3-ДВ, входящего в систему опорных региональных профилей Российской Федерации. Рассматриваются сейсмические и гравитационные наблюдения, характеризующие структуру земной коры вдоль отрезка профиля 3-ДВ длиной около 600 км, пересекающего восточную окраину архейского Сибирского кратона, граничащего с мезозойской Верхояно-Колымской складчатой системой.

**Ключевые слова:** земная кора, сейсмические данные МПВ, ГСЗ, метод лучевого трассирования, скорость продольных волн, гравиметрия, коллизийная зона, Сибирь

## **SEISMOGRAVITY STRUCTURE OF THE CRUST OF THE EASTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON (3-DV PROFILE)**

### ***Vladimir D. Suvorov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, DSc, Principal Scientist, tel. +7 (383) 330-60-18, e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

### ***Evgeny V. Pavlov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Researcher, tel. +7 (383) 330-41-22, e-mail: PavlovEV@ipgg.sbras.ru

### ***Elena A. Melnik***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademika Koptyuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, PhD, Head of laboratory, tel. +7 (383) 330-60-18, e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru

The data are part of a complex of geophysical studies along the 3-DV profile, which is part of the system of regional profiles of the Russian Federation. Seismic and gravity observations characterizing the structure of the Earth's crust along an about 600-km-long section of the 3-DV profile crossing the eastern margin of the Archean Siberian Craton, which borders the Mesozoic Verkhoyansk-Kolyma fold system, are considered.

**Keywords:** Earth's crust, refracted and reflected P-waves, travel times, forward ray tracing, collision zone, craton, gravimetry, folded system, Siberia

Вдоль опорного профиля 3-ДВ получены исключительно детальные для региональных исследований данные о строении земной коры и верхов мантии мало изученной геофизикой северо-восточной части Сибири [1]. Нами рассмотрен участок профиля, пересекающий восточную часть Сибирской платформы и ее пассивную континентальную окраину [3, 4]. Прикладная часть заключается в прослеживании корней тектонических блоков, выделенных, в основном, по данным приповерхностной геологии и региональной геофизики, связанных с генезисом и размещением месторождений полезных ископаемых [1].



Рис. 1. Положение участка профиля 3-ДВ на структурной схеме [3].

Наблюдения вдоль зимней автотрассы показаны жирной линией с номерами пунктов возбуждения МПВ (треугольники) и ГСЗ (серые кружки).

Приведены названия пересеченных профилем тектонических структур:

СД – Сетте-Дабанская тектоническая зона, О – Окраинный,

В – Восточно-Сетте-Дабанский разломы, Э – Эбейке-Хаятинский,

М – Минорский

*Данные о структуре верхней коры.* Предварительные сведения об основных региональных особенностях строения верхней коры (данные МПВ) по глубине и латерали хорошо распознаются на системе наблюденных годографов первых и последующих вступлений волн (рис. 2), в виде блочно-слоистой структуры коры и ожидаемого характера изменения скорости с глубиной, что определяет априорную модель. Наиболее контрастно различаются повышенные времена пробега волн первых вступлений в пределах Сибирской платформы в сравнении с складчатой областью, где скорость в верхней коре значительно выше (времена

пробега меньше). Важно отметить и наблюдаемые в последующих вступлениях годографы отраженных волн, свидетельствующие о слоистости разреза платформенного чехла. Подчеркнем плотность системы наблюдений МПВ с шагом между пунктами возбуждения (вибраторы) 7-9 км в зависимости от кривизны линии наблюдения, вдоль которой величина расстояния была 10 км и при соответствующем укорочении реальной длины годографов до 32-39 км (при фактической длине линии наблюдения 40 км).

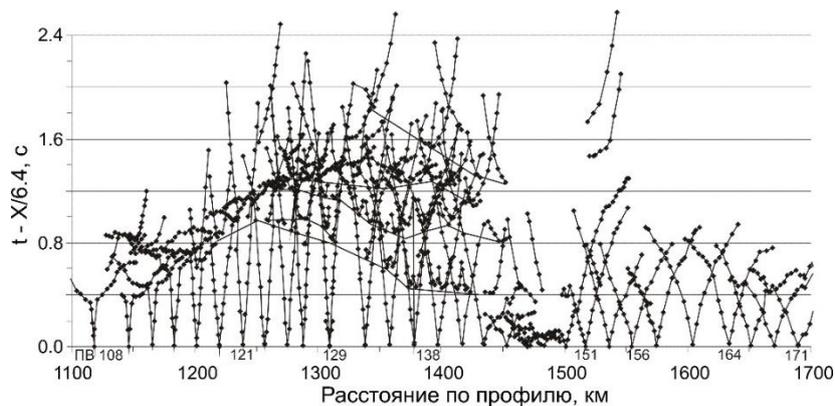


Рис. 2. Прореженные редуцированные годографы первых вступлений и отраженных волн (гиперболической формы) в последующих (30 годографов из 63 фактических). Черными сплошными линиями показаны огибающие минимумов годографов отраженных волн, подчеркивающие слоистость толщи осадочных отложений.  
L-расстояние источник-приемник

*Обработка данных ГСЗ.* Система наблюдений ГСЗ характеризуется средним расстоянием между пунктами возбуждения 15-30 км (только на двух участках профиля такой промежуток увеличен до 60 и 90 км) в виде рассредоточенных взрывов 4-5 т в неглубоких водоемах и применением телеметрических четырехканальных (с шагом 300 м) станций «Роса-А», распределенных по профилю через 3-6 км при расстояниях источник-приемник до 400-450 км.

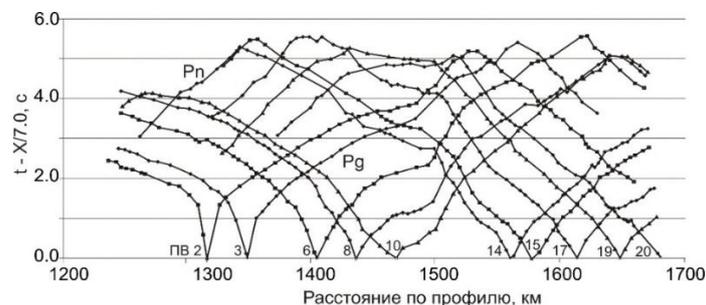


Рис. 3. Система наблюденных редуцированных (при скорости 7.0 км/с) годографов волн в первых вступлениях по данным ГСЗ (Pg – распространяющаяся в земной коре, Pn – преломленная на Мохо) с номерами ПВ. L-расстояние источник-приемник

Контрастность локальных увеличений кажущейся скорости волны  $P_g$  на прямых и встречных годографах указывает на присутствие приповерхностной неоднородности в виде аномального блока (1430-1500 км профиля, рис. 3). Годографы в западной части профиля, характеризуются монотонным увеличением кажущейся скорости, тогда как в восточной, они практически прямолинейны вплоть до выхода в первые вступления волны  $P_n$ . Резкие изменения наклона годографов с переходом от кажущейся скорости 6.6 -7.0 км/с до 7.9-8.0 км/с маркируют выход в первые вступления волны  $P_n$ .

Выявляемые свойства наблюдаемых годографов ГСЗ фактически определяют стартовую модель земной коры, параметры которой являются целью численного моделирования. Конечно, на ее выбор может оказывать влияние не всегда уверенная фазовая корреляции волн, однако размеры и контрастность рассматриваемых неоднородностей значительны, чтобы отнести их к достаточно обоснованным и пригодным для локализации. Здесь особую значимость приобретает расчет годографов первых вступлений, используемых в качестве первого приближения и анализ их соответствия наблюдаемому волновому полю. Это имеет непосредственное отношение и к обнаружению отраженной волны от Мохо ( $P_mP$ ) на сейсмограммах и определение ее годографов, являющихся в платформенных условиях, как правило, опорными. В складчатой области ее корреляция в виде протяженных годографов гиперболической формы затруднена из-за значительной неоднородности коры. Поэтому для волны  $P_mP$ , в качестве первого приближения, полезно использовать расчетные годографы, в некоторой окрестности которых можно пытаться обнаружить хотя бы фрагменты ее осей синфазности и при обоснованной необходимости корректировать параметры нижней коры, не противоречащие годографам волны  $P_n$ . Моделирование структуры земной коры производилось итеративным методом прямого лучевого трассирования [5, 6] с учетом свойств ее верхней части, полученных по наблюдениям МПВ. Примеры виброграмм, сейсмограмм и результаты лучевого моделирования подробно рассмотрены в [3].

*Верхняя кора по данным системы наблюдений МПВ.* К наиболее крупным структурам верхней коры относятся Приверхоянский передовой и Тыловой прогибы, разделенные блоком с аномально повышенной до 6.5-6.6 км/с скоростью (рис. 4). Протяженность передового прогиба достигает 120-180 км, а локального Тылового только до 30 км. Приверхоянский передовой прогиб условно можно представить тремя этажами, разделяющимися по структуре и значениям скорости (рис. 4). В целом, структурные и скоростные характеристики передового и расположенного восточнее Сетте-Дабанского блока, локального Тылового прогибов и далее уже в пределах складчатой области оказываются структурно подобными, но с значительными различиями в изменениях скорости.

*Структура всей толщи коры* характеризуется более отчетливым картированием передового Приверхоянского, локального Тылового, совместно с прилегающей к нему частью складчатой области прогибов со скоростью 4.9-5.9 км/с и увеличенной до 10-12 км мощностью в сравнении с 6-7 км по данным МПВ (рис. 4). В платформенной части профиля кровля слоя нижней коры со

скоростью 6.7-6.9 км/с и мощностью 10-15 км залегает на глубине 30-40 км. Под Сетте-Дабанской зоной скорость в нем уменьшается до 6.6-6.7 км/с, являющейся характерной для складчатой области. На востоке ее мощность увеличивается до 25 км за счет подъема его кровли до 20 км при мало изменяющейся глубине Мохо в интервале 42-45 км. Далее на восток Мохо монотонно погружается до 50 км под передовым прогибом при скачкообразном воздымании до 42 км уже под Тыловым. Эту ступень можно принять за положение нижней границы кратона вдоль вероятного разлома с углом падения около 15°. В области передового прогиба и тектонической зоны скорость под Мохо постепенно уменьшается от 8.3 км/с в платформенной части до 8.1 км/с и в складчатой области она оценивается величиной 7.9 км/с.

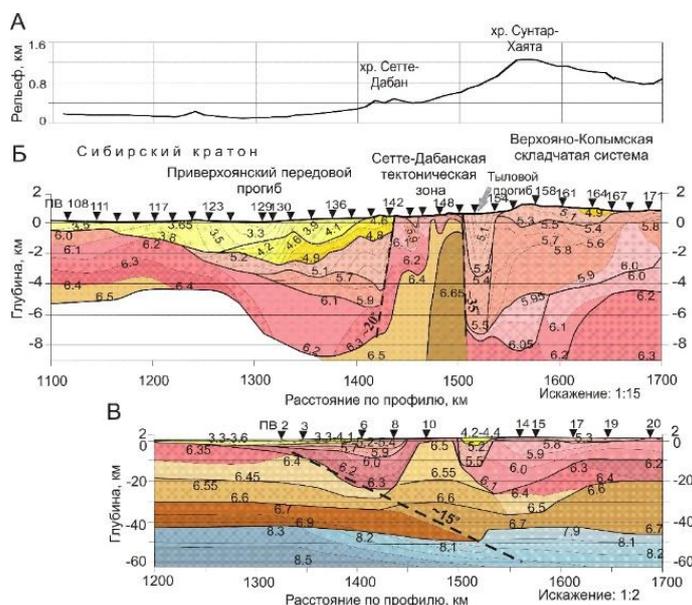


Рис. 4. Сейсмические разрезы верхней коры и всей ее толщи.

Вверху рельеф дневной поверхности. Толстые линии – сейсмические границы со скачком скорости или с изменениями ее градиента в слоях, тонкие – изолинии скорости с значениями в км/с.

Штриховой черной линией показана граница кратона, падающая на восток под углом около 15°. Черные треугольники с номерами – положение пунктов возбуждения

Дополнительную интерпретацию данных можно выполнить, используя сейсмоплотностной параметр  $Vp^2\rho$ , где плотность получена путем гравитационного моделирования сейсмической структуры (рис. 5). На кратоне близкие к 1 нормированные (на максимальную величину) значения этого параметра указывают на отсутствие латеральных неоднородностей в структуре коры. Аномальными являются только 3-5 слои верхней коры с неоднородностями амплитудой до 10% (слои 1, 2 представлены кайнозойскими осадками, 3, 4 присутствуют преимущественно только в Приверхоянском прогибе).

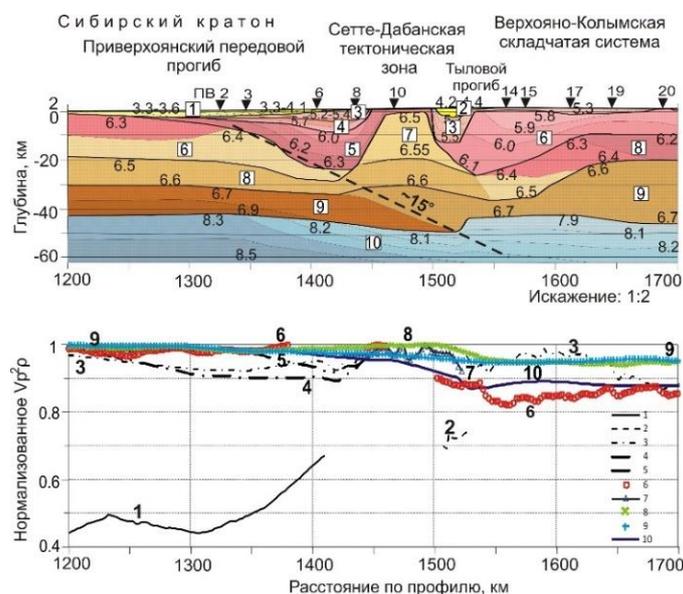


Рис. 5. Сейсмоплотностная характеристика коры

В складчатой области значения параметра в слоях (3, 6, 7, 10) существенно изменяются при согласном поведении слоев нижней коры (8, 9), но с 5% отличием от их кратонной части. Наиболее пониженные его значения характерны для слоя 6 (до 20%) и верхам мантии (до 10%). Природа таких аномалий может определяться вещественными (магматическими) и геомеханическими свойствами горных пород, измененными в процессе складчатости.

*Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0006 «Структуры и напряженно-деформированное состояние земной коры платформенных и складчатых областей Центральной Азии на основе совместного решения обратных задач сейсмологии и гравиметрии».*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кашубин С.Н., Мильштейн Е.Д., Винокуров И.Ю., Эринчек Ю.М., Сержантов Р.Б., Татаринцов В.Ю. Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин – основа глубинного 3D картографирования территории Российской Федерации и ее континентального шельфа // Региональная геология и металлогения. – 2016. – № 67. – С. 43–48.
2. Суворов В.Д., Мельник Е.А. Сейсмическая структура земной коры в коллизионной зоне Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой системы (профиль 3-ДВ) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XV Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 24-26 апреля 2019 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 9 т.. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 180- 186.
3. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под редакцией Л.М. Парфенова и член-корреспондента РАН М.И.Кузьмина. – М. МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 571 с.

4. Parfenov L.M. Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoides in the context of plate tectonics // *Tectonophysics*. – 1991. – № 199. – P. 319-342.
5. Zelt C.A., Smith R.B., Seismic travelttime inversion for 2-D crustal velocity structure // *Geophysical Journal International*. – 1992. – № 108 (1) – P.16–34.
6. Zelt C. A., Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic travelttime data // *Geophysical Journal International*. – 1999. – № 139. – P. 183–204.

## REFERENCES

1. Kashubin S.N., Mil'shtejn E.D., Vinokurov I.YU., EHrinchek YU.M., Serzhantov R.B., Tatarinov V.YU. Gosudarstvennaya set' opornykh geologo-geofizicheskikh profilej, parametriceskikh i sverhglubokih skvazhin – osnova glubinnogo 3D kartografirovaniya territorii Rossijskoj Federacii i ee kontinental'nogo shel'fa // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. – 2016. – № 67. – S. 43–48.
2. Suvorov V.D. Mel'nik E.A. Seysmicheskaya struktura zemnoj kory v kollizionnoj zone Sibirskogo kratona i Verkhoyano-Kolymskoj skladchatoy sistemy (profil' 3-DV) // *Interehkspo GEO-Sibir': XV Mezhdunarodnyj nauchnyj kongress : Mezhdunar. nauch. konf. (g. Novosibirsk, 24-26 aprelya 2019 g.): Mezhdunar. nauch. konf. "Nedropol'zovaniye. Gornoye delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh. Ekonomika. Geookologiya"*: Sbornik materialov v 9 t.. – 2019. – T. 2. – № 2. – S. 180- 186.
3. Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Saha (Yakutiya) / Pod redakciej L.M. Parfenova i chlen-korrespondenta RAN M.I.Kuz'mina. – M. MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. – 571 s.
4. Parfenov L.M. Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoides in the context of plate tectonics // *Tectonophysics*. – 1991. – № 199. – P. 319-342.
5. Zelt C.A., Smith R.B., Seismic travelttime inversion for 2-D crustal velocity structure // *Geophysical Journal International*. – 1992. – № 108 (1) – P.16–34.
6. Zelt C. A., Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic travelttime data // *Geophysical Journal International*. – 1999. – № 139. – P. 183–204.

© В. Д. Суворов, Е. В. Павлов, Е. А. Мельник, 2021