



## SEISMIC INHOMOGENEITIES IN THE UPPER CRUST OF THE ALDAN-STANOVY SHIELD AND IN ITS TOTAL CRUST (PROFILE 3-DV)

V.D. Suvorov , E.A. Melnik ✉, E.V. Pavlov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

**ABSTRACT.** In accordance with the detailed first-arrival data, the near-surface part of the Earth's crust consists of three layers. The upper discontinuous layer is represented by the Mesocenozoic deposits in local basins. The two inhomogeneous layers decrease in thickness towards the north from 1.5 km to total thinning in the Stanovoy block and from 4 km in the Chulman basin to 1 km in the Aldan. It is implied that the nature of thinning lies in weathering and disintegration of crystalline rocks. Their underlying boundary at a depth of 1–4 km with a longitudinal wave velocity of 6.0–6.2 km/s can be assigned to the unchanged Early Precambrian basement surface.

The deep seismic sounding data show that the two-layer crust thickness of the Stanovoy block reaches 40 km, and the three-layer crust in the Aldan block is as thick as 50 km. These blocks are separated by the vertical zone beneath the Stanovoy ridge with contrast inhomogeneities in the crust and step-like increase in the Moho depth beneath the Chulman basin.

There was discovered an isostatic imbalance of the lithosphere, correlated with seismicity of the Chulman basin.

**KEYWORDS:** Earth's crust; inhomogeneity; seismic wave velocity; ray tracing method; junction of the Aldan and Stanovoy blocks; Chulman basin; isostasy

**FUNDING:** BR project FWZZ-2022-0021 "Regional structural features of the Earth's crust and upper mantle in the platform and folded areas of Siberia, their stress-strain state from the seismological, gravimetrical and geomechanical data".



### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Elena A. Melnik, [MelnikEA@ipgg.sbras.ru](mailto:MelnikEA@ipgg.sbras.ru)

Received: February 18, 2022

Revised: August 26, 2022

Accepted: September 10, 2022

**FOR CITATION:** Suvorov V.D., Melnik E.A., Pavlov E.V., 2023. Seismic Inhomogeneities in the Upper Crust of the Aldan-Stanovoy Shield and in Its Total Crust (Profile 3-DV). *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (1), 0682. doi:10.5800/GT-2023-14-1-0682

## СЕЙСМИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЕРХНЕЙ И ВСЕЙ КОРЫ АЛДАНО-СТАНОВОГО ЩИТА (ПРОФИЛЬ 3-ДВ)

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

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Приповерхностная часть земной коры по детальным сейсмическим данным метода первых вступлений охарактеризована тремя слоями. Прерывистый верхний представлен мезокайнозойскими осадочными отложениями в локальных впадинах. В двух неоднородных слоях мощность уменьшается в северном направлении от 1.5 км до полного выклинивания в Становом блоке и от 4 км в Чульманской впадине до 1 км в Алданском. Предполагается, что природа слоистости обусловлена корой выветривания и дезинтеграции кристаллических пород. Подстилающая их граница на глубине 1–4 км со скоростью продольных волн 6.0–6.2 км/с может быть отнесена к неизменной поверхности раннедокембрийского фундамента.

Показано, что мощность двухслойной земной коры Станового блока по данным глубинного сейсмического зондирования достигает 40 км, а в трехслойной земной коры Алданского блока – 50 км. Вертикальная зона под Становым хребтом с контрастными неоднородностями в коре и ступенчатым увеличением глубины Мохо под Чульманской впадиной разделяет эти блоки.

Обнаружена изостатическая неуравновешенность литосферы, коррелируемая с сейсмичностью Чульманской впадины.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** земная кора; неоднородность; скорость сейсмических волн; метод лучевого трассирования; сочленение Алданского и Станового блоков; Чульманская впадина; изостазия

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Проект ФНИ № FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».

### 1. ВВЕДЕНИЕ

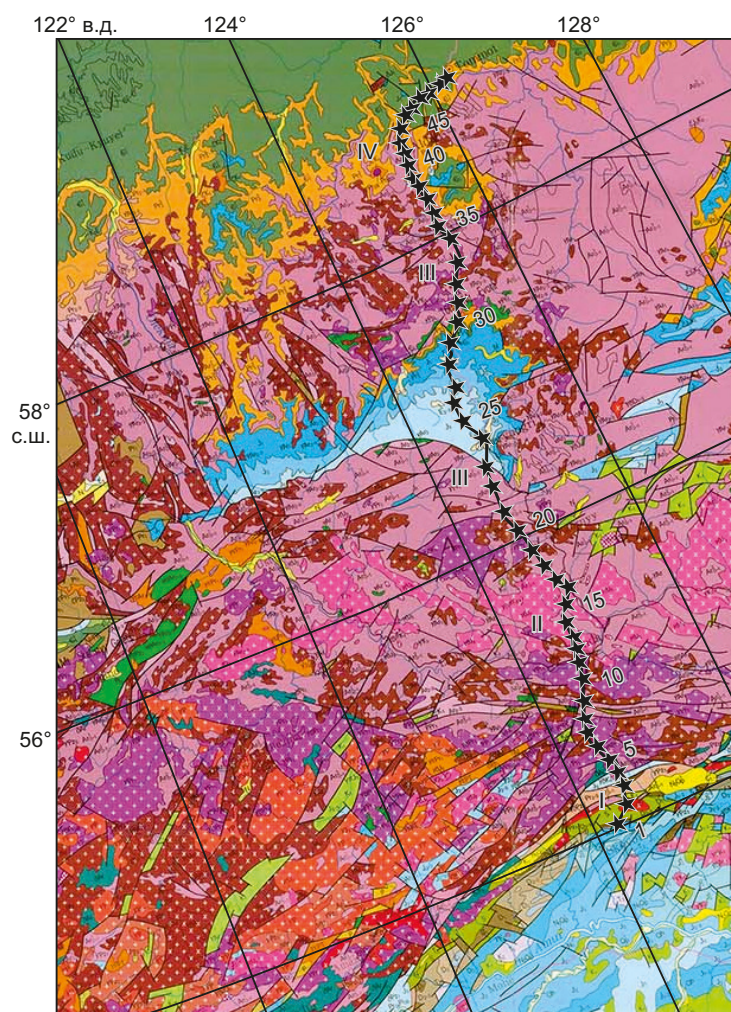
Представленная работа дополняет и уточняет в развернутой форме опубликованные данные [Suvorov et al., 2016, 2021, 2022a, 2022b]. Кроме того, следует также отметить, что интерпретация сейсмических данных, полученных в этой части профиля по данным общей глубинной точки, проведена в ряде работ [Didenko et al., 2013; Roudnitskaya et al., 2013; Goshko et al., 2014; Khe-raskova et al., 2018]. В данных работах предложены различные комплексные геологические модели исключительно детальных структур земной коры и рельефа Мохо, основанные на данных общей глубинной точки (ОГТ), без анализа характера распределения неоднородностей, связанных с изменениями скорости по глубине и латерали. Различие в размерах неоднородностей, выделяемых по данным ОГТ и метода первых вступлений (МПВ), вместе с глубинным сейсмическим зондированием (ГСЗ) представляет исключительно трудную для комплексного анализа результатов задачу.

### 2. ДАННЫЕ МПВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ КОРЫ

Система наблюдений МПВ на южной части профиля 3-ДВ, пересекающего Алданский щит, характеризуется шагом между пунктами вибрационного возбуждения 10–20 км (ПВ) при расстояниях между сейсмоприемниками 50 м и длине профиля 25–38 км (ООО «НПП СПЕЦГЕОФИЗИКА»). Применялось группирование

четырёх 30-тонных вибраторов СВ-30-1506 «Русич» (группирование на базе 40–50 м, количество вибровоздействий 10–16, линейный свип длиной 30 с в полосе частот 10–36 Гц). Главная особенность системы наблюдений заключается в кривизне линии профиля вдоль автомобильной трассы. Разрез построен вдоль ломаной линии длиной 622 км (длина профиля 700 км), последовательно соединяющей 49 ПВ (рис. 1).

Предварительные сведения о свойствах блоковой структуры верхней коры содержатся в изменениях формы наблюдаемых годографов волн в первых вступлениях (рис. 2). На их системе уверенно выделяются участки разной протяженности и с различной величиной кажущейся скорости. Это отчетливо выражается в редуцированных значениях времен пробега и в наклонах годографов. Увеличение наклонов соответствует повышению скорости. Так, наиболее контрастно пониженная скорость (при увеличении редуцированных времен пробега) наблюдается на участках профиля 50–200 и 275–475 км. Значительное уменьшение редуцированных времен пробега (повышение кажущейся скорости) наблюдается на участках профиля 225–275 и 450–620 км. Наибольшее контрастное увеличение времен характерно для сейсмоактивной Чульманской впадины (275–475 км профиля) вместе с признаками повышенной мощности осадочных отложений с пониженной кажущейся скоростью. В пределах этих участков наблюдаются локальные вариации значений редуцированных времен



**Рис. 1.** Фрагмент геологической карты [Tingdong et al., 2008] с расположением южной части профиля 3-ДВ (черная линия с номерами пунктов возбуждения МПВ (звездочки)).

Римскими цифрами обозначены пересекаемые профилем крупные области, представленные породами различного возраста и разной природы: I – песчаники, алевролиты, прослои и линзы аргиллитов, конгломератов, гравелитов (доломиты, известняки, мергели, прослои сланцев); II – граниты и гранодиориты протерозойско-фанерозойского возраста; III – архейские граниты и гранодиориты; IV – архейские сиениты, граносиениты.

**Fig. 1.** Fragment of the geological map [Tingdong et al., 2008] with the location of the southern part of the 3-DV profile (black line with numbers of sources (asterisks) for study of the upper crust).

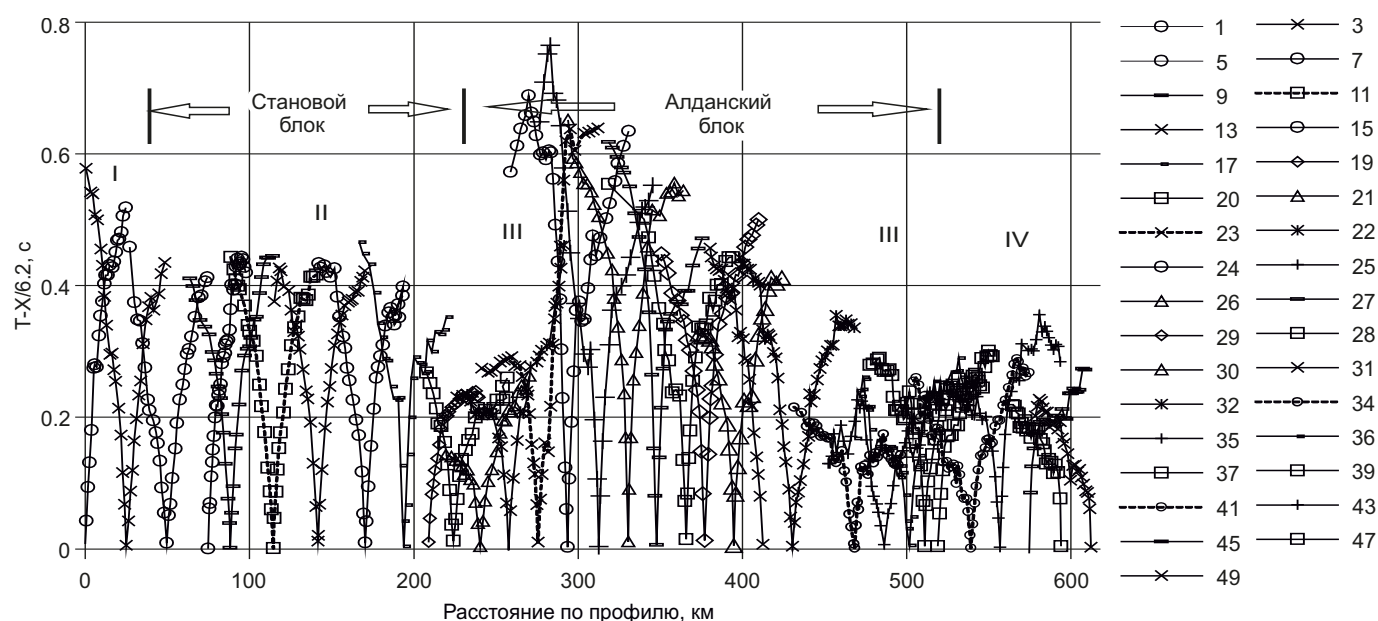
Roman numerals indicate large profile-intersected areas represented by heterogeneous rocks of different nature: I – sandstones, siltstones, interlayers and lenses of mudstones, conglomerates, gravelstones (dolomites, limestones, marls, shales); II – granites and granodiorites of the Proterozoic-Phanerozoic age; III – Archean granites and granodiorites; IV – Archean syenites, granosyenites.

пробега и наклонов годографов в зависимости от изменений скорости с глубиной и по латерали. В целом, вдоль профиля районирование Станового и Алданского блоков по геологическим приповерхностным данным коррелируется с изменениями времен пробега волн.

Система годографов фактически определяет характер априорной структуры, параметры которой являются предметом моделирования. Так, например, в дополнение к блочной структуре на годографах можно выделить признаки слоистости и латеральной неоднородности в верхней коре. Особенно хорошо это видно по трехзвенной форме годографов в виде скачкообразных изменений их наклона (кажущейся скорости), на участках профиля (225–275 и 450–525 км) кажущаяся

скорость характеризуется повышенными значениями, а в районе Чульманской впадины (275–400 км) – пониженными. Видно также, что районирование участков с резкими изменениями редуцированных времен пробега волн в первых вступлениях коррелируется с областями распространения магматических пород разной природы и возраста, показанными номерами на рис. 1. Основная задача при построении разреза верхней коры заключается в прослеживании приповерхностных неоднородностей на глубину по характеру латеральных изменений скорости распространения продольных волн.

Двумерное лучевое моделирование слоисто-неоднородной модели выполняется по программе SeisWide



**Рис. 2.** Система редуцированных наблюдаемых годографов первых вступлений вдоль профиля (плотность их положения уменьшена вдвое в сравнении с общим количеством).

Скорость редукции 6.2 км/с, X – расстояние источник – приемник. Римские цифры соответствуют номерам блоков, отмеченным на рис. 1. В легенде представлены номера ПВ и условные обозначения для соответствующих годографов.

**Fig. 2.** Refraction traveltime curves of the first arrivals along the profile (their density is halved as compared to the total amount). The reduction velocity is 6.2 km/s, X stands for offsets. Roman numerals correspond to the block numbers in Fig. 1. The legend contains numbers of excitation points and symbols for corresponding travel times curve.

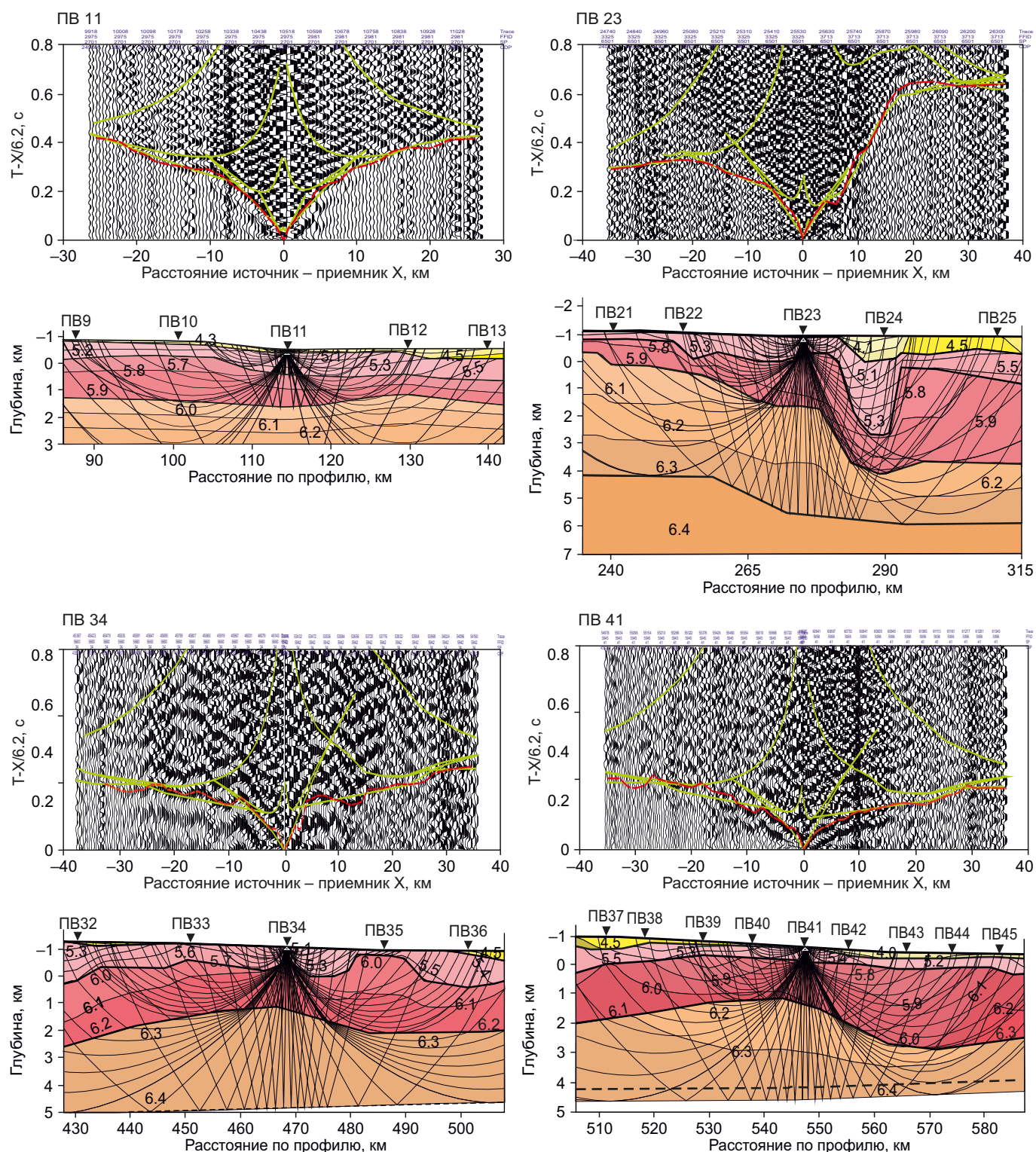
[Zelt, Smith, 1992]. Отдельные примеры полученных результатов вместе с коррелограммами при минимальном количестве лучевых траекторий распространения преломленно-рефрагированных и отраженных волн, характеризующих присутствие в разрезе сейсмических границ, приведены на рис. 3. Можно отметить, что различия между наблюдаемыми и теоретическими временами пробега волн, как правило, не превышают фазы регистрируемых колебаний в интервале  $\pm 0.03$ – $0.06$  с. Вместе с тем на участках значительного затухания интенсивности колебаний волн в окрестности первых вступлений, характерных для наибольших удалений от источника, надежность построения годографов и определения параметров разреза снижается.

Коррелограмма из ПВ 11 (рис. 3) характеризуется наилучшим качеством с уверенной корреляцией первых фаз колебаний во встречном направлении, где наблюдаются признаки их возможной аппроксимации годографом с признаками трехслойной модели. В первом слое, где скорость продольных волн 4.3 км/с, мощность изменяется в интервале 100–200 м, во втором – скорость скачком увеличена до 5.1–5.3 км/с при мощности 0.5–0.7 км. Третий слой характеризуется скоростью 5.7–5.8 км/с и мощностью до 2.0 км. Его подошва на абсолютной глубине ограничена рассчитанным годографом докритической отраженной волны, регистрирующейся в последующих вступлениях, который совпадает с интенсивной осью синфазности. С удалением от источника на расстоянии, превышающем положение критической точки, присутствует

преломленно-рефрагированная волна, распространяющаяся в третьем слое, где скорость увеличивается до 5.9–6.2 км/с. В подстилающем условном четвертом слое скорость распространяющейся в нем рефрагированной волны оценивается величиной 6.3 км/с.

В прямом направлении в разрезе обнаруживаются латеральные изменения скорости и мощности выделенных слоев. Так, до 0.5–0.7 км увеличена мощность первого слоя при скорости 4.5 км/с. Во втором слое скорость с глубиной скачком увеличивается до 5.5 км/с при мощности до 1 км. При этом сокращается мощность третьего слоя без изменения скорости, но с увеличением ее градиента. Отдельно заметим, что наблюдающиеся параметры разреза получены по совокупности данных из пяти ПВ.

Качество данных из ПВ 23 (рис. 3), расположенного в окрестности южного борта Чульманской впадины, менее выразительно в сравнении с наблюдениями из ПВ 11, поэтому уверенность построения разреза, размеры аномалий скорости и глубины залеганий границ удастся обеспечить системой наблюдений из пяти источников. Во встречном направлении от источника наблюдается двух-, трехкратное уменьшение мощности второго и третьего слоя со скоростью 5.1–5.4 и 5.7–5.9 км/с. Подстилающая толща пород по данным рефрагированной волны может быть охарактеризована скоростью 6.1–6.3 км/с и предположительной (судя по рассчитанному годографу отраженной волны, близкой к малоинтенсивной оси синфазности) мощностью до 4 км.



**Рис. 3.** Коррелограммы и результаты моделирования для характерных участков профиля, соответствующих главным особенностям в системе годографов для ПВ 11, 23, 34 и 41 (на рис. 2 выделены жирными линиями).

Красные линии соответствуют наблюдаемым годографам (в редуцированном масштабе времени ( $X$  – расстояние источник – приемник), зеленые – рассчитанным. На разрезах толстыми линиями (штриховыми – неуверенно) показаны границы со скачком скорости (км/с) или без него, разделяющие слои с различными градиентами скорости, тонкими – ее изолинии и лучевые траектории.

**Fig. 3.** Correlograms and results of modeling for the profile parts corresponding to the main features in the travel time curves for PV 11, 23, 34, and 41 (shown in bold lines in Fig. 2).

The red lines correspond to the observed traveltime curves on a reduced time scale ( $X$  is an offset), the green lines – to the calculated. On the cross-sections, thick lines show (dashed lines unsure) boundaries with or without a velocity jump (km/s), but separating the layers with different velocity gradients, thin lines are its isolines and ray paths.

Значительные изменения времен пробега волн в первых вступлениях наблюдаются в прямом направлении от источника, в окрестности южного борта Чульманской впадины (рис. 3, ПВ 23). В разрезе обнаружен резко выраженный в форме сейсмических границ локальный прогиб мощностью до 4 км, заполненный породами со скоростью 5.1–5.3 км/с, перекрытыми мезозойским чехлом мощностью до 1 км и скоростью непосредственно над прогибом 4.1 км/с. Севернее скорость в этом чехле увеличивается до 4.5 км/с, а ниже мощность третьего слоя со скоростью 5.8–5.9 км/с увеличивается от 1 км на участке профиля 240–250 км до 3.0–3.5 км. Граница на глубине 4–6 км со скоростью 6.3 км/с показана условно, так как уверенные ее признаки в волновом поле отсутствуют не только в первых вступлениях, но и, судя по рассчитанному годографу отраженной волны, в последующих. Полученный здесь разрез в районе Чульманской впадины отличается от рассмотренного в работе [Suvorov et al., 2016] в некоторых деталях, которые обусловлены дополнительным использованием отраженных волн, регистрирующихся в критической и закритической областях.

Волновое поле на отрезке профиля 430–510 км (ПВ 34) характеризуется локальными изгибами осей синфазности с горизонтальными размерами до 4–8 км. При расстоянии между ПВ до 15–20 км на этом участке профиля пространственная разрешающая способность системы наблюдений не позволяет уверенно моделировать аномалии такого размера. Это хорошо видно по локальным различиям между наблюдаемыми и более сглаженными рассчитанными годографами, достигающими  $\pm 0.03$ – $0.06$  с. Волновое поле на коррелограмме прямого направления из этого ПВ значительно более сложное, и затухание колебаний на интервале удалений от источника 13–23 км соответствует существенному уменьшению плотности сейсмических лучей в локальном блоке с повышенной скоростью до 6.0 км/с на фоне 5.3–5.5 км/с. Вместе с тем признаки двухслойного разреза достаточно отчетливые.

При более плотном расположении девяти ПВ на участке профиля 500–590 км пологое увеличение времен пробега в прямом направлении от ПВ 41 уверенно аппроксимируется трехзвенными годографами. Встречное направление более неоднородное, с локальными аномалиями кривизны осей синфазности, которые сглаживаются рассчитанными годографами. Определенное влияние на обоснование результатов моделирования оказывают и рассчитанные годографы отраженных волн в критической и закритической областях, соответствующие осям синфазности в последующих и видимых первых вступлениях, как и в рассмотренных выше примерах. К сожалению, таких примеров немного, и представительность последовательного в порядке расположения ПВ выделения и корреляции отраженных волн вдоль профиля оказывается практически невозможной.

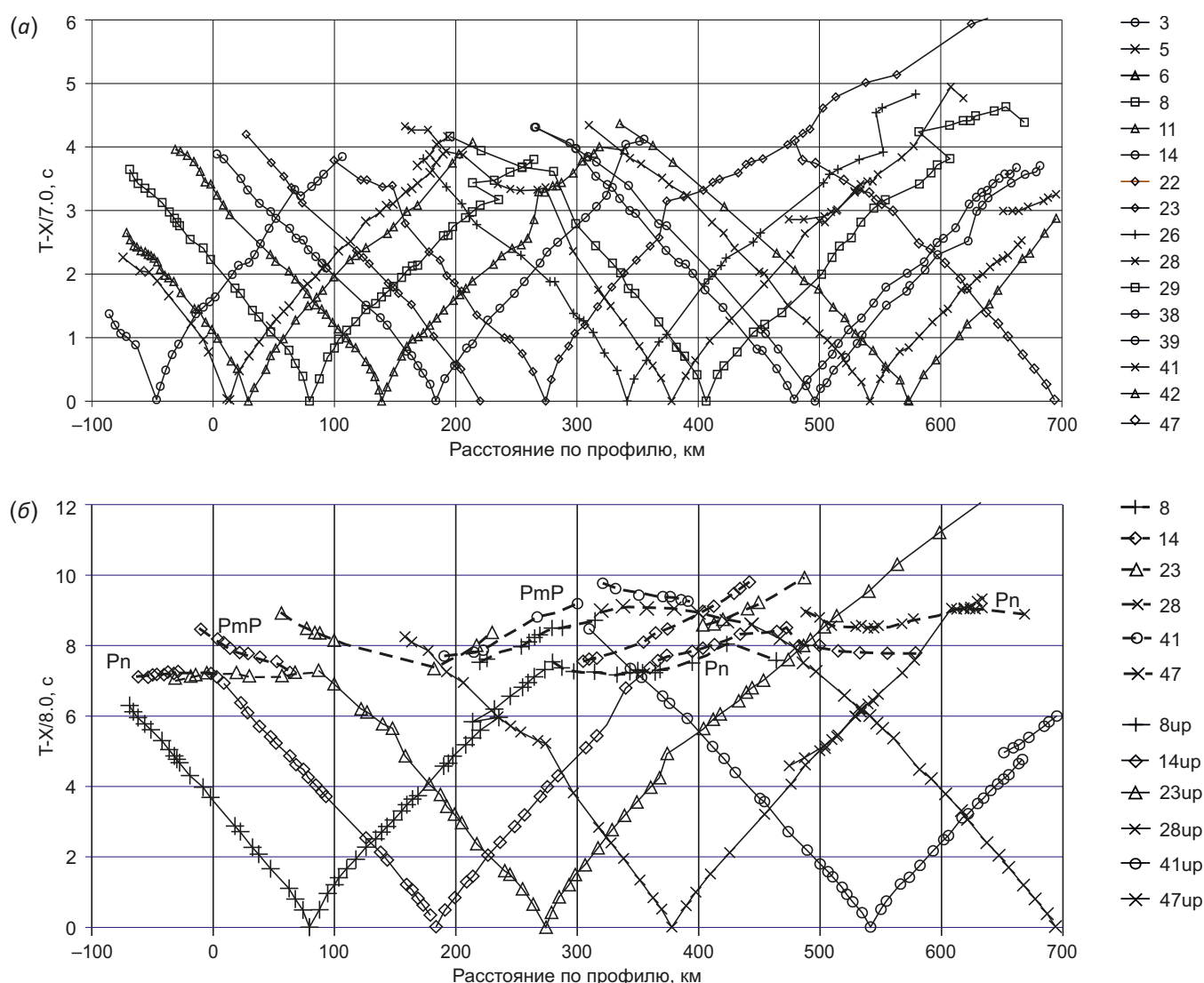
### 3. ДАННЫЕ ГСЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Система наблюдений методом ГСЗ характеризуется средним расстоянием между пунктами возбуждения 15–30 км (только на двух участках профиля такой промежуток увеличен до 60 и 90 км). Используются рассредоточенные взрывы 4–5 т в неглубоких водоемах и их регистрация телеметрическими четырехканальными (с шагом 300 м) станциями «Роса-А», распределенными по профилю через 3–6 км при расстояниях источник – приемник до 400–450 км.

Корреляция первых вступлений и построение годографов являются обычной процедурой в МПВ и ГСЗ, которая вместе с тем контролируется результатами моделирования, поскольку наблюдается весьма сложная волновая картина. Примеры этого были рассмотрены выше при параметризации маломасштабных, в сравнении с ГСЗ, неоднородностей в верхней части разреза. В данном случае предметом служит выявление крупномасштабных латеральных неоднородностей земной коры и верхов мантии, коррелируемых с приповерхностными аномальными характеристиками. В частности, представляет интерес обнаружение глубинных неоднородностей под мезозойской Чульманской впадиной.

В системе наиболее удаленных от ПВ частей редуцированных годографов волны Pg, распространяющейся в земной коре (рис. 4, а), наблюдается ряд локальных особенностей, выраженных в значительных изменениях времен пробега и их формы (кажущейся скорости), характерных для центральной и северной части профиля. Наиболее отчетливо проявлены скачкообразные увеличения времени пробега и кажущейся скорости в центральной и северной части профиля. Также существуют особенности прослеживания волны Pn при сложной форме годографов, характерных для центральной части профиля, в зависимости от положения ПВ (рис. 4, б). Так, из ПВ 23 в прямом направлении, а из ПВ 28 – во встречном волна Pn не выделена, тогда как она наблюдается в обратных направлениях распространения волн от этих же источников. При этом время ее пробега в прямом направлении на 1 с больше, чем на встречном, при близких значениях кажущейся скорости 8.0–8.2 км/с. В центральной части профиля кажущаяся скорость Pn волны, распространяющейся в прямом направлении, в зависимости от расстояния до ПВ 8, 14 изменяется в широких пределах – от 7.8 до 8.2 км/с.

Природа таких аномалий времен пробега определяется путем моделирования скоростной структуры земной коры (рис. 5). Предварительно можно заметить, что моделирование по данным ГСЗ выполнено с учетом структуры верхней коры (до глубины 2–5 км), полученной по данным МПВ. Значимых противоречий (кроме графического представления ее в значительно более сглаженном масштабе) между этими данными не обнаружено. Вместе с тем различие между наблюдаемыми и рассчитанными годографами ГСЗ на



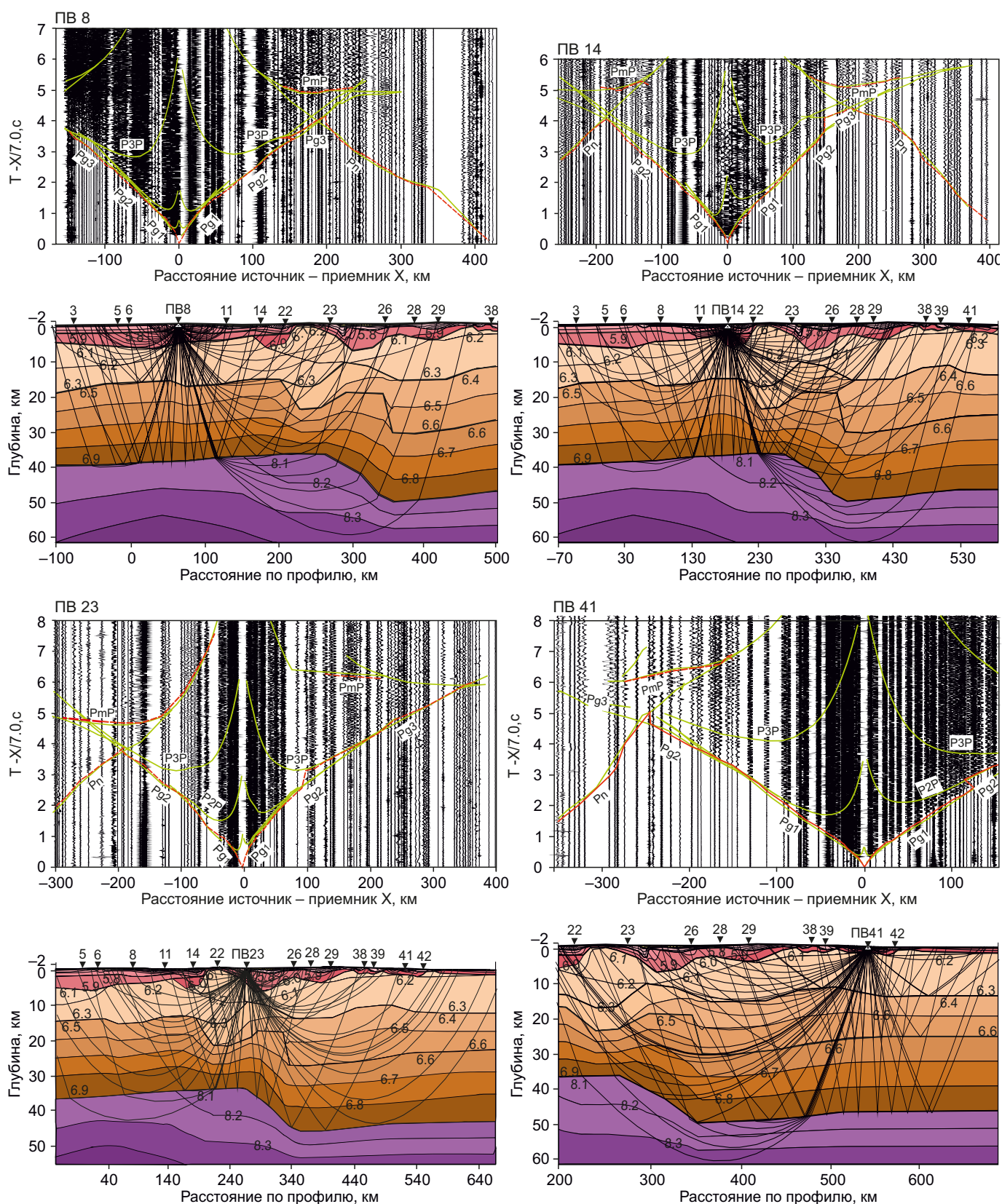
**Рис. 4.** Редуцированные годографы первых вступлений волн, распространяющихся в земной коре (Pg) при скорости редукиции 7.0 км/с (а), и основные характеристики годографов (показаны разреженной системой) волны, преломленной на Мохо (Pn), совместно с отраженной (PmP, штриховые линии) при скорости редукиции 8.0 км/с (б). В легенде представлены номера ПВ и условные обозначения годографов.

**Fig. 4.** Reduced traveltime curves for first arrivals of waves propagating in the crust (Pg) at the a 7.0 km/s reduction velocity (a) and the main characteristics of the traveltimes (shown by a sparse system) for the wave refracted on the Moho (Pn) together with the reflected (PmP, dashed lines) at a reduction velocity is 8.0 km/s (b). The legend contains the numbers of the excitation points and the symbols of the hodographs.

отдельных сейсмических трассах достигает  $\pm 0.2$ – $0.3$  с, что заметно превышает фазовые задержки с частотой 4–7 Гц.

На сейсмограмме из ПВ 8 наблюдается существенно повышенная интенсивность волнового поля во встречном направлении от источника по сравнению с прямым (рис. 5). Область достаточно интенсивных колебаний волн Pg1 и Pg2 в первых вступлениях в прямом направлении от источника ограничена на расстоянии 150 км от ПВ и совпадает на 230–270 км профиля со Становым хребтом (см. рис. 2). Судя по результатам моделирования, в этом блоке выделено три преломляющих (Pg) и отражающих границы в коре (PiP) и на ее подошве (PmP) волны и четыре – в Алданском.

Наиболее простыми являются годографы волн Pg1 и Pg2, прослеживаемые на интервале расстояний от источника 0–30 и 30–150 км. Необычной является регистрация в последующих вступлениях отраженной волны (P3P) от кровли слоя нижней коры в области критической точки и в видимых первых вступлениях рефрагированной волны Pg3, проникающей на глубину до 18–30 км, где она скачком (на третьей границе) увеличивается до обычных для нижней коры значений 6.5–6.8 км/с. Наиболее отчетливо волна P3P наблюдается на встречном годографе из ПВ 8 в последующих вступлениях (на интервале расстояний) при малой интенсивности волны Pg3. При этом отчетливо прослеживаемая волна Pg2 (распространяется в слое 2)



**Рис. 5.** Монтаж сейсмограмм в редуцированном масштабе времен и годографов с соответствующими скоростными моделями земной коры и лучевыми траекториями распространения преломленно-рефрагированных и отраженных волн в земной коре.

Наблюдаемые и рассчитанные годографы показаны красными штриховыми и желто-зелеными сплошными линиями соответственно (скорость редукции 7.0 км/с). На сейсмограммах отмечены участки регистрации осей синфазности преломленно-рефрагированных волн в слоях Pgi (i=1, 2, 3, 4), Pn и отраженных PmP от их подошвы и Мохо (PmP) с соответствующими траекториями их распространения. Границы со скачком скорости показаны толстыми линиями, тонкие соответствуют

значениям скорости в км/с и лучевым траекториям. Показано положение всех ПВ, данные которых использованы при моделировании на соответствующем участке (см. рис. 4, а).

**Fig. 5.** Seismograms with traveltime curves and the corresponding velocity models of the crust and ray paths of refraction and reflection waves.

Red dashes and yellow-green solid lines show the observed and calculated traveltimes, respectively (the reduction velocity is 7.0 km/s). The ray paths of refraction waves in Pgi ( $i=1, 2, 3, 4$ ) and Pn layers and PiP reflections from their bottoms and from Moho (PmP) are shown in accordance with wave propagation trajectories. Thick lines show velocity-jump boundaries, thin lines are velocity isolines in km/s and ray paths. There are shown the positions of all shots, the data of which were used at the modeling in the corresponding section (see Fig. 4, a).

с пониженной кажущейся скоростью и регистрируется в последующих вступлениях (рис. 5, ПВ 8).

В прямом направлении из ПВ 8 область прослеживания волны Pg3 характеризуется осью синфазности, регистрирующейся в видимых первых вступлениях и прослеживаемой от критической точки до пересечения ее на удалении 200 км от ПВ с годографом преломленной волны Pn. Далее, в последующих вступлениях рассчитанный годограф волны Pg3 соответствует малоинтенсивной фазе колебаний, совпадающей и с годографом волны Pg2. Как видно из результатов моделирования, это определяется временами пробега последней в области локального утолщения слоя пород с пониженной до 6.2–6.3 км/с скоростью при таких же временах пробега волн Pg3, проникающих в нижнюю кору.

Пониженная интенсивность свойственна и волне Pn, корреляция которой также вызывает значительные трудности, преодолеваемые только с учетом согласования с данными из других ПВ. В данном случае сложная форма годографа определяется структурой земной коры и скачкообразным увеличением глубины Мохо при постоянной скорости в мантии 8.1–8.2 км/с. Волновое поле в окрестности закритических отражений от Мохо (PmP) в целом характеризуется повышенной интенсивностью без отчетливо выраженной фазы, которая может быть определена только условно, маркируя начальную часть области интенсивных колебаний.

Сейсмограмма из ПВ 14 (рис. 5) характеризуется в целом пониженной интенсивностью волнового поля, в котором фазы малоинтенсивных колебаний с преобладающей частотой 7–12 Гц, по которым определены времена пробега волн в первых вступлениях, можно обнаружить только в увеличенном масштабе изображения. Исключением является область в окрестности этого источника на интервале (–100) – (+100) км. Главные кинематические особенности прослеживания опорных волн практически не отличаются от рассмотренных выше для ПВ 8. Отметить можно только излом годографа волны Pn, распространяющейся в прямом направлении от источника, обусловленного как присутствием нового слоя в интервале глубин 27–33 км со скоростью продольных волн 6.4–6.6 км/с, так и ступенчатым увеличением глубины залегания Мохо от 38 до 50 км, где в покрывающей толще коры скорость продольных волн 6.6–6.9 км/с. Отраженная волна от Мохо

из этого ПВ 14 представлена интенсивными колебаниями только на отдельных сейсмических трассах, соответствующих теоретическому годографу.

Существенной особенностью волнового поля на сейсмограмме ПВ 23 является отсутствие фазы колебаний, которую можно было бы отнести к волне Pn (рис. 5, ПВ 23). Как видно из лучевых траекторий, это обусловлено резким погружением подошвы коры, ограничивающим формирование лучевых траекторий выхода на поверхность волны Pn. Кроме того, значительно увеличилась мощность третьего слоя (нижней коры) за счет фактически непрерывного увеличения скорости распространения продольных волн от 6.3 до 6.8 км/с в интервале глубины 15–50 км и увеличения на 3 км мощности приповерхностного слоя коры со скоростью 6.2–6.3 км/с. Также теоретическому годографу волны Pg3, распространяющейся во встречном направлении, можно найти соответствующую, правда, тоже малоинтенсивную ось синфазности в последующих вступлениях на расстоянии от ПВ 23 более 200 км.

Характерной особенностью волновой картины из ПВ 41 является ее повышенная интенсивность в прямом направлении от источника, подобная зарегистрированной из ПВ 8 в обратном направлении. В целом, пониженную интенсивность волнового поля в центральной части профиля можно объяснить повышенным рассеянием волн в зоне сочленения Алданского и Станового блоков, вероятно, вследствие присутствия маломасштабных неоднородностей в земной коре и верхах мантии на участке погружения Мохо.

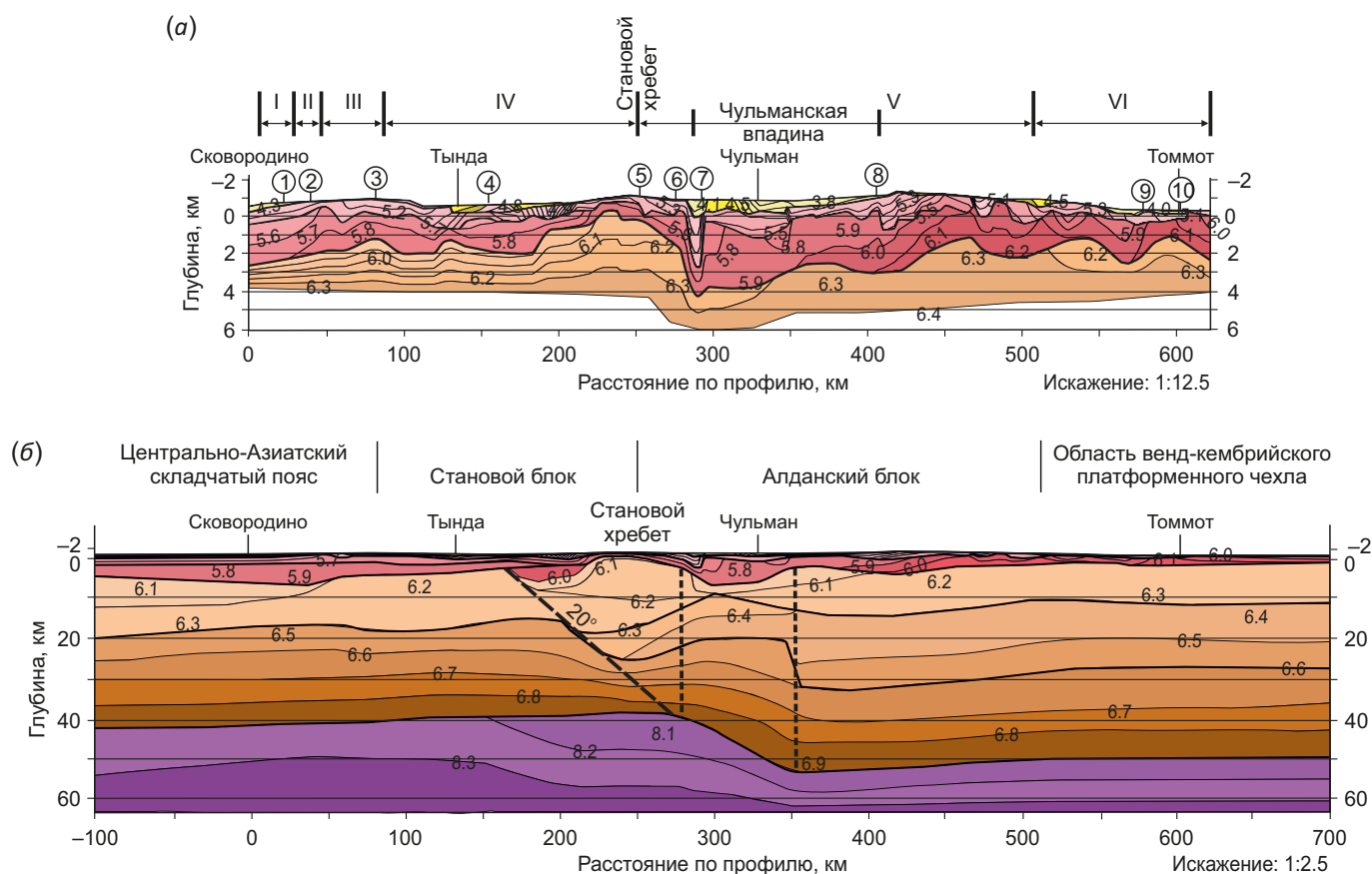
#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования структуры земной коры представлены на рис. 6 в виде относительно детального разреза приповерхностной части коры по данным более плотной системы наблюдений МПВ (см. рис. 2, 49 ПВ) и по разреженным данным ГСЗ (см. рис. 4, а, 16 ПВ) для всей коры. При этом длина этих моделей коры различается за счет удлинения системы наблюдений ГСЗ на юге и севере профиля.

В целом наблюдается уверенная корреляция блочной тектоники по геологическим представлениям (см. рис. 1) вместе с разломами [Didenko et al., 2013]. Большинство из последних находят отражение в приповерхностной структуре коры в виде зон выклинивания слоев с различной скоростью (разломы 1, 4, 7, 9,

10) или ограничений локальных скоростных неоднородностей, выраженных в изменениях скорости и/или в рельефе границ со скачком скорости в приповерхностных слоях, прослеживаемых на глубину (разломы 2, 5, 6, 8). Имеются аналогичные ограничения региональных неоднородностей в виде крупных блоков зонами разломов (северный край Монголо-Охотского раннемезозойского орогенного пояса II (разлом 2), сочлененного с Селенга-Становым каледонским орогенным поясом III разломом 3). Вместе с тем представляется возможным перенести разлом 3 севернее, на участок уменьшения высоты рельефа (100 км профиля). Это приводит к более отчетливой южной границе

Становой гранит-зеленокаменной области (IV), выраженной и в понижении рельефа дневной поверхности, ограниченного на севере разломом 5, который так же отчетливо проявляется и в рельефе подошвы слоя, характеризующегося скоростью продольных волн 5.3–5.4 км/с, располагаясь вблизи южного ограничения Чульманской впадины (разлом 6). Наиболее отчетливо прослеживается глубинная (до 4 км) зона разлома 7, ограничивающего с севера участок, где скорость продольных волн понижена до 4.1 км/с. На глубине 3 км в зоне разлома скорость продольных волн увеличивается до 5.5 км/с на фоне 5.9 км/с. Следы разлома прослеживаются до глубины 4 км, выражаясь в рельефе



**Рис. 6.** Сейсмические модели верхней коры (а) и всей толщи коры (б). Показано положение разломов по [Didenko et al., 2013] и крупных блоков (см. рис. 1).

I – Аргуно-Мамынский микроконтинент с наложенными мезозойскими молассовыми прогибами, II – Монголо-Охотский раннемезозойский орогенный пояс, III – Селенга-Становой каледонский орогенный пояс, IV – Становая гранит-зеленокаменная область, V – Алданская гранулит-гнейсовая область, VI – венд-кембрийский платформенный чехол. Цифры в кружках – разломы: 1 – Южно-Тукурингский, 2 – Северо-Тукурингский, 3 – Джелтулакский, 4 – Гилуйский, 5 – Становой, 6 – коровый, 7 – Южно-Якутский, 8 – коровый, 9 – Эльконский, 10 – Русский. Наклонной штриховой линией показана ось вероятной зоны разлома с углом падения около  $20^\circ$ , вертикальными линиями оконтурена область аномальных неоднородностей, прослеживаемых в земной коре и верхах мантии.

**Fig. 6.** Seismic models of the upper crust (a) and the entire crustal unit (b). There are shown the position of faults after [Didenko et al., 2013] and the large blocks (see Fig. 1).

I – Argun-Mamyn microcontinent with superimposed Mesozoic molasses troughs, II, III – Early Mesozoic Mongol-Okhotsk and Selenga-Stanovoy Caledonian orogenic belts, IV – Stanovaya granite-greenstone area, V – Aldan granulite-gneiss area, VI – Vendian-Cambrian platform cover. Numbers in circles are faults: 1 – South Tukuringrsky, 2 – North Tukuringrsky, 3 – Dzheltulaksky, 4 – Gilyuisky, 5 – Stanovoy, 6 – crustal, 7 – South Yakutian, 8 – crustal, 9 – Elkonsky, 10 – Russian. The inclined dashed line shows the axis of the probable inferred fault zone with an angle of incidence of about  $20^\circ$ , the vertical lines show the area of abnormal inhomogeneities traced in the crust and upper mantle.

границы со скоростью 5.9 км/с. Чульманская впадина на севере ограничена выклиниванием слоя мезозойских пород со скоростью 3.8–4.5 км/с разломом 8, который на глубине проявлен резким утолщением слоя, где скорость продольных волн увеличена до 5.3–5.5 км/с. Не отмечена по геологическим данным локальная зона резкого уменьшения скорости на 0.4 км/с, прослеженная на глубину около 1 км в виде разломной зоны шириной около 10 км. В северной части профиля уверенно проявляется в структуре верхней коры и область расположения венд-кембрийского платформенного чехла, которая характеризуется локальными горизонтальными неоднородностями, в которых скорость продольных волн изменяется от 4.0 до 5.3 км/с.

Структура приповерхностной части коры представлена тремя существенно латерально неоднородными слоями как по мощности, так и по скорости (рис. 6). Первый, прерывистый, слой представлен приповерхностными локальными впадинами мощностью 50–100 м, заполненными осадочными породами, где скорость продольных волн 4.0–4.5 км/с. В южной прибортовой части Чульманской впадины мощность таких отложений достигает 500 м, а в выклинивающейся северной части скорость уменьшается до 3.8 км/с.

Мощность второго слоя, представленного породами со скоростью продольных волн 5.0–5.5 км/с, изменяется от 0.1 до 1.5 км в основном за счет контрастных вариаций рельефа его подошвы. Локальное увеличение глубины ее залегания до 2.5–2.7 км определяет положение зоны разлома, ограничивающего южный борт Чульманской впадины. Значимые различия между параметрами второго слоя в Алданском (V) и Становом (IV) блоках практически отсутствуют (рис. 6, а). Можно только отметить повышенную мощность этого слоя в Чульманской впадине и в южной части профиля в пределах Аргуно-Мамынского микроконтинента (I), Монголо-Охотского (II) и Селенга-Станового (III) орогенных поясов, а также в южной части Станового блока (рис. 6).

Скорость продольных волн на кровле третьего слоя скачком увеличивается на 0.2–0.4 км/с по отношению к значениям на подошве второго. При этом мощность слоя 3 уменьшается в северном направлении от 2.0–2.5 км в начале профиля до 0.3–0.5 км в области сочленения Станового и Алданского блоков. Под южным ограничением Чульманской впадины его мощность резко увеличивается до 3.0–3.5 км и уменьшается до 1.0 км на северном окончании профиля. В целом, характер утонения слоя в первой и второй половине профиля является подобным, подчеркивая различие свойств верхней коры. Соотношение в изменениях мощности слоя 3 в этих областях профиля также различается. Если в пределах блока IV соотношение рельефов кровли и подошвы инверсионное, то в блоке V их залегание согласное. Вместе с тем породы блока IV характеризуются скоростью продольных волн, увеличивающейся с глубиной в интервале 5.5–5.8 км/с, а в блоке V – от 5.8 до 6.2 км/с.

Следует подчеркнуть, что граница подошвы слоя 3 показана условно. Наиболее отчетливо это наблюдается в блоке V с минимальным скачком скорости до 0.1 км/с практически в пределах точности и на значительной глубине – 2–4 км, учитывая короткие отрезки годографов (малоинтенсивных осей синфазности), наблюдаемых на наиболее удаленных от источников участках коррелограмм (см. рис. 3). Несколько увереннее положение этой границы получено в блоке IV, где глубина ее залегания уменьшена до 2 км при повышенном скачке скорости до 0.2 км/с. Дополнительное подтверждение о глубине залегания этой границы получено по данным ГСЗ, хотя и при пониженной детальности (рис. 6, б).

В пользу этого следует отметить практически равные значения скорости (6.1–6.2 км/с) на поверхности раннедокембрийского фундамента, залегающего на глубине 2–4 км в Становом и Алданском блоках (рис. 6), и архейского фундамента на Сибирском кратоне [Suvorov, Melnik, 2021]. Вследствие этого можно предполагать, что кровля слоя 3 маркирует положение раннедокембрийского фундамента [Smelov et al., 2001; Smelov, Timofeev, 2003]. При этом природа формирования покрывающих слоев 2 и 3, сложенных разнообразными породами, непонятна. Вероятно, второй слой представлен дезинтегрированными разновозрастными породами, а латеральные изменения мощности слоя 3 со скоростью 5.7–5.9 км/с могут быть связаны с магматогенными образованиями [Popova, Sobolev, 2014].

По данным ГСЗ земная кора под предполагаемой поверхностью архейского фундамента Станового блока представлена двухслойной и для Алданского – трехслойной моделью (рис. 6). В Становом блоке слой верхней коры мощностью около 10–15 км характеризуется практически постоянной скоростью 6.2 км/с вне зависимости от глубины с увеличением давления (6.1–6.3 км/с в Центрально-Азиатском складчатом поясе). В нижней коре мощностью около 20 км скорость изменяется с глубиной от 6.5 до 6.9 км/с.

Другой характер изменения скорости с глубиной наблюдается в трехслойной коре Алданского блока, где в верхнем слое коры мощностью до 10 км (глубина залегания подошвы 10–14 км) скорость увеличивается от 6.2 до 6.3 км/с (рис. 6). В среднем слое (отсутствует в Становом блоке) мощностью 15–20 км скорость возрастает с глубиной от 6.4 до 6.6 км/с, а в нижнем на интервале глубины 27–50 км скорость от 6.6 км/с увеличивается до 6.9 км/с при отсутствии ее скачка на подошве среднего слоя, но при различной величине градиентов.

## 5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

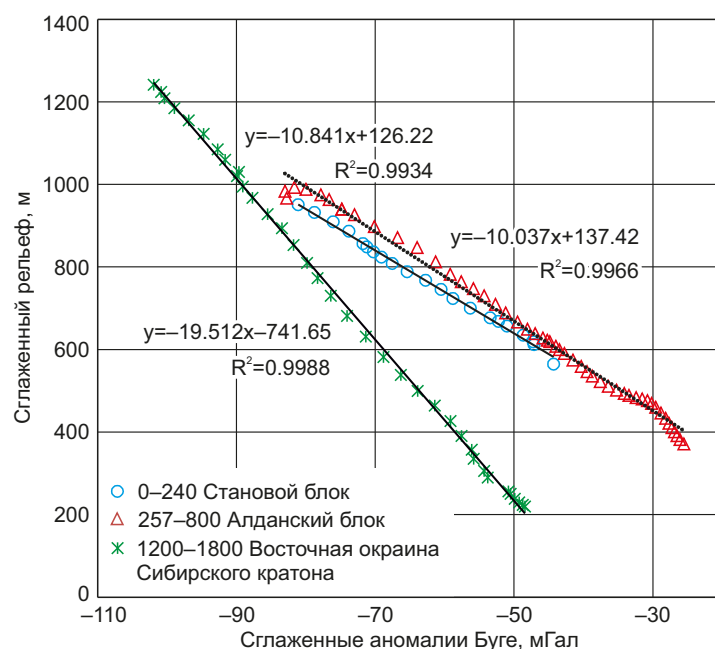
Рассмотрим отдельно интерпретационные особенности распределения сейсмических неоднородностей земной коры в области сочленения Алданского и Станового блоков, разделенных ступенчатым увеличением ее мощности от 40 до 50 км на участке профиля 275–350 км, расположенного под южной частью

сейсмоактивной Чульманской впадины [Imaev et al., 2005] с повышенной мощностью мезозойских отложений (рис. 6). В этой области можно выделить наклонную (угол  $20^\circ$ ) зону разлома, объединяющего ступень на Мохо, унаследованные погружения кровли нижнего слоя коры и рельефа преломляющей границы, маркирующей положение кровли предполагаемого раннедокембрийского кристаллического фундамента [Smelov et al., 2001; Smelov, Timofeev, 2003]. Признаки вертикальной области вещественного (магматического) преобразования горных пород прослеживаются по всей толще земной коры. Они выражены в коррелируемом изменении рельефа сейсмических границ, вариаций скорости, градиентов ее изменения и ступенью в рельефе Мохо с уменьшением скорости в верхах мантии от 8.2 до 8.1 км/с. В этой области Алданского блока наблюдается промежуточный слой средней коры со скоростью 6.4–6.6 км/с (отсутствует в Становом блоке), утоняется слой верхней коры и утолщается до 6–8 км приповерхностный слой Чульманской впадины, покрывающий раннедокембрийский фундамент. Утонение приповерхностного слоя с пониженной до 5.5–5.8 км/с скоростью на участке Станового хребта, возможно, обусловлено эрозией и переносом пород главным образом в близлежащую мезозойскую Чульманскую впадину. При этом возникает проблема образования самого хребта в пределах Алданского блока, связанная с неединственностью локализации зоны сочленения блоков в зависимости от природы его формирования. Это сочленение можно перенести к вертикальному южному

ограничению Чульманской впадины (275 км профиля), прослеживаемой в коре до южного ограничения ступени на Мохо, или, наоборот, перенести сочленение на 170 км профиля до выхода наклонной зоны разлома на поверхность раннедокембрийского фундамента. Во всех вариантах проблема сводится к природе формирования блока коры треугольной формы (выклинивается на подошве коры), ограниченного на юге наклонным разломом и на севере вертикальной зоной, маркирующей южный блок земной коры, коррелирующийся с положением Чульманской впадины.

Столь не типичная для Сибирского кратона структура земной коры Алдано-Станового щита выделяет его в отдельный объект для последующих исследований природы выявленных неоднородностей земной коры в связи с мантийной частью литосферы и сейсмичностью. В частности, к началу таких исследований можно отнести задачу изучения изостатического состояния литосферы в модели Эйри-Хейсканена (рис. 7). Это достигается оценкой корреляции между сглаженными значениями рельефа и гравитационных аномалий Буге. Используются сглаженные в круге радиусом 125 км цифровые данные рельефа DNSC08 и гравитационного поля WGM2012.

Литосфера Алданского и Станового блоков характеризуется различиями в изостатической уравниваемости, изменяющейся в зоне их сочленения, что является, по всей видимости, причиной сейсмичности в Чульманской впадине. Интересно, что литосфера восточной пассивной окраины Сибирского кратона [Suvorov



**Рис. 7.** Изостатическое состояние литосферы Алдано-Станового щита в сравнении с восточной окраиной Сибирского кратона по гравитационным данным (модель Эйри-Хейсканена) на отрезках профиля: 70–240 км для Станового блока, 255–800 км для Алданского и 1200–1800 км для восточной окраины Сибирского кратона.

**Fig. 7.** Isostasy of the Aldan-Stanovoy shield lithosphere in comparison with the eastern margin of the Siberian Craton according to the gravitational data (the Airy-Heiskanen model) on the profile segments: 70–240 km for the Stanovoy block, 255–800 km for the Aldan, and 1200–1800 km for the Siberian craton.

et al., 2021; Suvorov, Melnik, 2021] является также изостатически уравновешенной, но с существенно другим корреляционным соотношением. Наблюдающиеся вариации корреляционных параметров свидетельствуют о латеральных неоднородностях литосферы южной и восточной окраины Сибирского кратона.

## 7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность чл.-корр. РАН А.Н. Диденко и анонимным рецензентам за полезные и конструктивные замечания, способствующие улучшению изложения материалов.

## 8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

## 9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

## 10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Didenko A.N., Efimov A.S., Nelyubov P.A., Sal'nikov A.S., Staroseltsev V.S., Shevchenko B.F., Goroshko M.V., Gur'yakov 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>.

Goshko E.Yu., Efimov A.S., Sal'nikov A.S., 2014. The Recent Structure and the Assumed History of Formation of the Crust in the South-Eastern Segment of the North Asian Craton along Reference Profile 3-DV. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (3), 785–798 (in Russian) [Гошко Е.Ю., Ефимов А.С., Сальников А.С. Современная структура и предполагаемая история формирования земной коры юго-востока Северо-Азиатского кратона вдоль опорного профиля 3-ДВ // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 3. С. 785–798]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0155>.

Imaev V.S., Imaeva L.P., Kozmin B.M., 2005. Seismotectonics of Olekmo-Stanovaya Seismic Zone (South Yakutia). *Lithosphere* 2, 21–40 (in Russian) [Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктура Олекмо-Становой сейсмической зоны (Южная Якутия) // Литосфера. 2005. № 2. С. 21–40].

Kheraskova T.N., Yakovlev D.V., Pimanova N.N., Berezhner O.S., 2018. Conjugation with the Central Asian Foldbelt: Interpretation of the 3DV and Tynda-Amurzet Transects. *Geotectonics* 52, 1–21. <https://doi.org/10.1134/S0016852118010089>.

Popova M.V., Sobolev P.N., 2014. Atlas of Rocks of the Northeast Russia within 3-DV Reference Geophysical Profile (the Town of Skovorodino – the Settlement of Khandyga). Book 1. SNIGGIMS, Novosibirsk, 197 p. (in Russian) [Попова М.В., Соболев П.Н. Атлас горных пород северо-востока России в полосе опорного геофизического профиля 3-ДВ (г. Сковородино – пос. Хандыга). Новосибирск: СНИИГГиМС, 2014. Кн. 1. 197 с.].

Roudnitskaya D.E., Staroseltsev V.S., Salnikov A.S., 2013. The Construction of the Earth's Crust Macromodel Applying the Reapak-Technology along the 3-DV Geotraverse (East Siberia). *Geophysics* 1, 19–26 (in Russian) [Рудницкая Д.Е., Старосельцев В.С., Сальников А.С. Построение макромоделей земной коры с применением Реапак-технологии по геотраверсу 3-ДВ (Восточная Сибирь) // Геофизика. 2013. № 1. С. 19–26].

Smelov A.P., Timofeev V.F., 2003. Terrane Analysis and the Geodynamic Model of the Formation of the North Asian Craton in the Early Precambrian. *Pacific Geology* 22 (6), 42–54 (in Russian) [Смелов А.П., Тимофеев В.Ф. Террейновый анализ и геодинамическая модель формирования Северо-Азиатского кратона в раннем докембрии // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. С. 42–54].

Smelov A.P., Zedgenizov A.N., Timofeev V.F., 2001. The Aldan-Statovoy Shield. In: L.M. Parfenov, M.I. Kuzmin (Eds), *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. MAIK Nauka/Interperiodika, Moscow, p. 81–104 (in Russian) [Смелов А.П., Зедгенизов А.Н., Тимофеев В.Ф. Алдано-Становой щит // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 81–104].

Suvorov V.D., Melnik E.A., 2021. Transition Zone from the Siberian Craton to the Verkhoyansk-Kolyma Folded System According to Seismic Data (Reference 3-DV Profile). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 57 (6), 864–877. <https://doi.org/10.1134/S1069351321060100>.

Suvorov V.D., Melnik E.A., Mishenkina Z.R., Salnikov A.S., 2016. Velocity Model of the Chulman Depression (Aldan Shield) According to the First Arrivals Data. *Technologies of Seismic Prospecting* 2, 109–117 (in Russian) [Суворов В.Д., Мельник Е.А., Мишенькина З.Р., Сальников А.С. Скоростная модель глубинного строения Чульманской впадины (Алданский щит) по данным первых вступлений // Технологии сейсморазведки. 2016. № 2. С. 109–117]. <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2016-2-109-117>.

Suvorov V.D., Melnik E.A., Pavlov E.V., 2022a. Structural-Tectonic Zoning of the Earth's Crust in the Eastern and Southern Margins of the Siberian Craton from the Seismic Density Data (3-DV Profile). *Dobretsov's Readings: Science First Hand: Proceedings of the First All-Russian Scientific Conference in Memory of Nikolay Leontyevich Dobretsov, Academician of RAS, an Outstanding Scientist and an Organizer of Science (August 1–5, 2022)*. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 315–318 (in Russian) [Суворов В.Д., Мельник Е.А., Павлов Е.В. Структурно-тектоническое районирование земной коры восточной и южной окраин Сибирского кратона по сейсмоплотностным данным

(профиль 3-ДВ) // Добрецовские чтения: Наука из первых рук: Материалы Первой всероссийской научной конференции, посвященной памяти выдающегося ученого и организатора науки академика РАН Николая Леонтьевича Добрецова (1–5 августа 2022 г.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. С. 315–318].

Suvorov V.D., Melnik E.A., Pavlov E.V., 2022b. Upper-Crustal Structure of the Aldan-Stanovoy Shield and Its Total Crust Structure from the Seismic Data (Southern Part of 3-DV Profile). Proceedings of the XVIII International Scientific Conference (May 18–20, 2022). Vol. 2. Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, p. 121–128 (in Russian) [Суворов В.Д., Мельник Е.А., Павлов Е.В. Структура верхней части и всей толщи земной коры Алдано-Станового щита по сейсмическим данным (южная часть профиля 3-ДВ) // Материалы XVIII международной научной конференции (18–20 мая 2022 г.). Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2022. Т. 2. С. 121–128].

Suvorov V.D., Pavlov E.V., Melnik E.A., 2021. Seismic Density Inhomogeneities and Isostasy of the Crust of the Eastern Margin of the Siberian Craton (3-DV Reference Profile). In:

Faulting in the Lithosphere and Associated Processes. Tectonophysical Analysis. Abstracts of the All-Russian Meeting Dedicated to the Memory of Professor S.I. Sherman (April 26–30, 2021). ISU Publishing House, Irkutsk, p. 51–52 (in Russian) [Суворов В.Д., Павлов Е.В., Мельник Е.А. Сейсмодетальные неоднородности и изостазия земной коры восточной окраины Сибирского кратона (опорный профиль 3-ДВ) // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С.И. Шермана (26–30 апреля 2021 г.). Иркутск: Изд-во ИГУ, 2021. С. 51–52]. DOI:10.26516/978-5-9624-1919-0.2021.1-233.

Tingdong Li, Daukeev S.Z., Kim B.C., Tomurtogoo O., Petrov O.V. (Eds), 2008. Atlas of Geological Maps of Central Asia and Adjacent Areas. Scale 1:2500000. Geological Publishing House, Beijing.

Zelt C.A., Smith R.B., 1992. Seismic Traveltime Inversion for 2-D Crustal Velocity Structure. *Geophysical Journal International* 108 (1), 16–34. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb00836.x>.