

Структура верхней части и всей толщи земной коры Алдано-Станового щита по сейсмическим данным (южная часть профиля 3-ДВ)

В. Д. Суворов^{1}, Е. А. Мельник¹, Е. В. Павлов¹*

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Выявлены существенные различия в слоисто-блочном строении земной коры и верхней мантии, выраженные в распределении локализованных сейсмических неоднородностей Алданского и Станового блоков и зоны их сочленения. Установлена латерально неоднородная приповерхностная двухслойная структура со скоростями 3.8-4.5 и 5.0-5.9 км/с при мощности 0.3-1.0 и до 2-4 км, которая перекрывает раннедокембрийский фундамент щита со скоростью 6,0-6,3 км/с. Земная кора в Становом блоке и прилегающем Централно-Алданском складчатом поясе представлена двухслойной, а в Алданском блоке – трехслойной моделями. Разделяющая их зона Станового хребта характеризуется исключительно контрастными скоростными неоднородностями, которые коррелируют со ступенчатым увеличением глубины Мохо с 40 до 50 км.

Ключевые слова: земная кора, скорость преломленно-рефрагированных и отраженных продольных волн, метод лучевого трассирования, зона сочленения Алданского и Станового блоков

The crust structure of the Aldano-Stanovoy shield according to the wide-angle seismic data (southern part of profile 3-DV)

V. D. Suvorov^{1}, E. A. Melnik¹, E. V Pavlov¹*

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation
* e-mail: SuvorovVD@ipgg.sbras.ru

Abstract. Significant differences in the layered-block structure of the earth's crust and the upper mantle, expressed in the distribution of localized seismic inhomogeneities of the Aldan and Stanovoi blocks and the zone of their junction, are revealed. A laterally inhomogeneous near-surface two-layer structure with a velocity of 3.8-4.5 and 5.0-5.9 km/s at thicknesses of 0.3-1.0 and up to 2-4 km has been established, which overlaps the Early Precambrian basement of the shield with a velocity of 6.0-6.3 km/s. The crust in the Stanovoi block and the adjacent Central Aldan folded belt is represented by a two-layer, and in the Aldan block by a three-layer models. The zone of the Stanovoi Ridge separating them is characterized by exceptionally contrasting velocity inhomogeneities, which correlate with a step-like increase in the depth of the Moho from 40 to 50 km.

Keywords: Earth's crust, velocity of refraction and reflection longitudinal waves, ray tracing method, junction zone of the Aldan and Stanovoy blocks

Введение

Полученные детальные сейсмические данные по опорному профилю, пересекающему Алдано-Становой щит, представляют значительный интерес в связи с непосредственным изучением обнаженной структуры докембрийской толщи

пород на южном ограничении Сибирского кратона. Неоднородности в коре необходимы для выявления их связи с тектоникой и сейсмичностью. Остается мало изученной природа формирования сейсмоактивной мезозойской Чульманской впадины, расположенной в центре рассматриваемой части профиля 3ДВ. Немаловажным является и проблема поиска в сейсмическом разрезе верхней коры (в характере слоистости и вариациях скорости) структурно-тектонических признаков, контролирующих размещение месторождений полезных ископаемых.

Интерпретация сейсмических данных, полученных в этой части профиля рассмотрены в ряде работ [1, 2, 3, 4]. В них предложены различные комплексные геологические интерпретации структуры всей толщи земной коры и рельефа Мохо, основанные на данных ОГТ, без учета неоднородностей, связанных с слоистостью, скорости по глубине и латерали.

Моделирование структуры верхней части коры

Система наблюдений МПВ (метод первых вступлений) на южной части профиля 3ДВ, пересекающего Алданский щит, характеризуется шагом между пунктами вибрационного возбуждения 10-20 км (ПВ), при расстояниях между сейсмоприемниками 50 м и длине наблюдений 25-38 км (ООО «НПП СПЕЦГЕО-ФИЗИКА») (рис. 1).

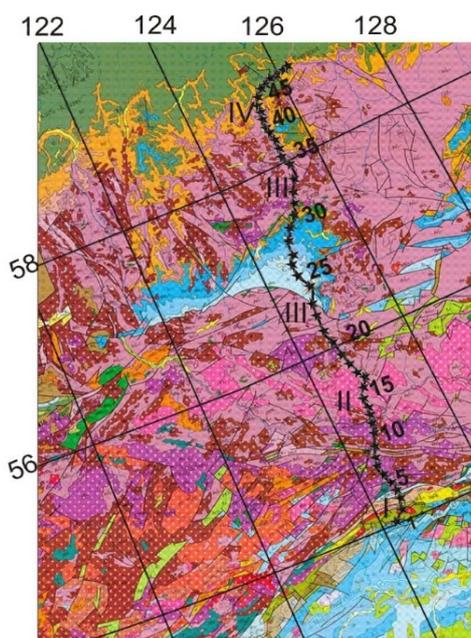


Рис. 1. Фрагмент геологической карты [5] с расположением южной части профиля 3ДВ (черная линия с номерами пунктов возбуждения МПВ). Римскими цифрами обозначены крупные области, пересекаемые профилем и выделенные цветом с близкими петрологическими свойствами пород различного возраста:

I – песчаники, алевролиты, прослои и линзы аргиллитов, конгломератов, гравели-
тов; (доломиты, известняки, мергели, прослойки сланцев); II – граниты и граноди-
ориты протерозойско-фанерозойского возраста; III – архейские граниты и граноди-
ориты; IV – архейские сиениты, граносиениты

Применялось группирование четырех 30 тонных вибраторов СВ-30-150б «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 ОГТ 700 км), последовательно соединяющей 49 пунктов возбуждения. Кривизна профиля наблюдений аппроксимируется при этом ломаной линией, соединяющей ПВ с осреднением пространственных локальных неоднородностей не коррелирующихся с аномалиями времен пробега на прямых и встречных годографах.

Двумерное лучевое моделирование слоисто неоднородной модели выполняется по программе SeisWide [6]. Отдельные примеры полученных результатов вместе с коррелограммами при минимальном количестве лучевых траекторий распространения преломленно-рефрагированных и отраженных волн, характеризующих латерально неоднородные слои показаны на рис. 2. Заметим также, что различие 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 и локальных искривлений фаз колебаний, надежность построения годографов и определения параметров снижаются.

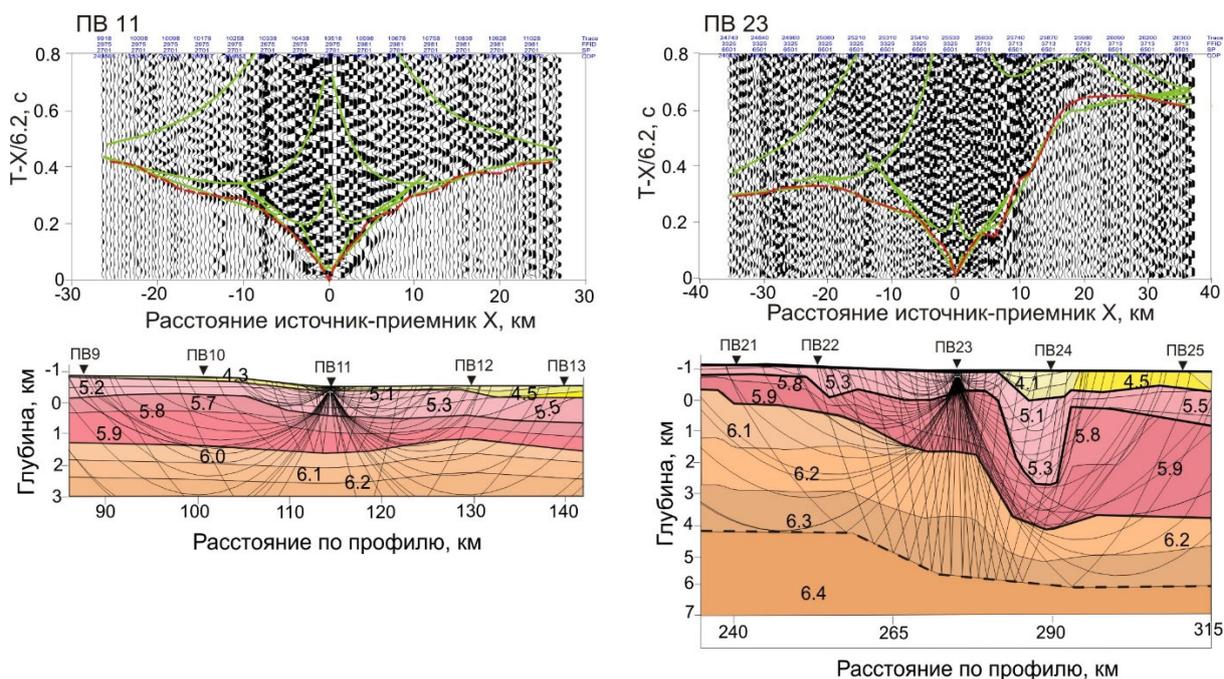


Рис. 2. Примеры коррелограмм и результатов моделирования для участков профиля, соответствующих главным особенностям в изменениях времен пробега волн для ПВ 11, 23. Красные линии соответствуют (в редуцированном масштабе времени, X-расстояние источник-приемник) наблюдаемым годографам, зеленые – рассчитанным. На разрезах толстыми линиями (штриховые не уверенно) показаны границы с скачком скорости в км/с или без него, разделяют слои с различными градиентами скорости, тонкими – ее изолинии и лучевые траектории.

Коррелограмма из ПВ 11 (рис. 2) характеризуется наилучшим качеством с уверенной корреляцией первых фаз колебаний во встречном направлении, где в годографах наблюдаются признаки трехслойной модели. В первом слое со скоростью 4.3 км/с мощность изменяется в интервале 100-200 м. Во втором она скачком увеличивается до 5.1-5.3 км/с при мощности 0.5-0.7 км, в третьем скорость 5.7-5.8 км/с при мощности до 2.0 км. Глубина его подошвы ограничивается рассчитанным годографом докритической отраженной волны, регистрирующейся в последующих вступлениях, который совпадает с интенсивной осью синфазности. За пределами критической точки отражений, преломленно-рефрагированная волна распространяется в третьем слое со скоростью 5.9-6.2 км/с.

В прямом направлении от источника мощность первого слоя увеличивается до 0.5-0.7 км при скорости 4.5 км/с, а во втором она достигает 5.1-5.5 км/с, при мощности до 1 км. При этом сокращается мощность третьего слоя без изменения скорости, но с увеличением ее градиента. Отдельно заметим, что параметры разреза получены по совокупности данных из 5 пунктов возбуждения.

Времена первых вступлений из ПВ 23 (рис. 2), расположенного в окрестности южного борта Чульманской впадины значительно увеличились. Здесь уверенность построения разреза, оценка размеров аномалий скорости и глубины залеганий границ обеспечивается системой наблюдений также из 5 источников. Во встречном направлении от источника наблюдается 2-3 кратное уменьшение мощностей второго и третьего слоев 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 мощностью до 4 км, судя по рассчитанному годографу отраженной волны, близкой к малоинтенсивной оси синфазности.

Данные ГСЗ и моделирование структуры земной коры

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). Использованы рассредоточенные взрывы 4–5 т в неглубоких водоемах и их регистрация обеспечена 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 является обычной процедурой в МПВ и ГСЗ, которая, вместе с тем контролируется результатами моделирования, поскольку наблюдается весьма сложная волновая картина. В данном случае, выявляются крупномасштабные (в сравнении с МПВ) латеральные неоднородности земной коры и верхов мантии, коррелируемые с осредненными приповерхностными аномальными характеристиками. Важно отметить, что интенсивность волн, пересекающих центральную часть профиля значительно понижена, что хорошо видно на сейсмограммах из ПВ 8 и 41 (Рис. 3) в прямом и встречном направлениях.

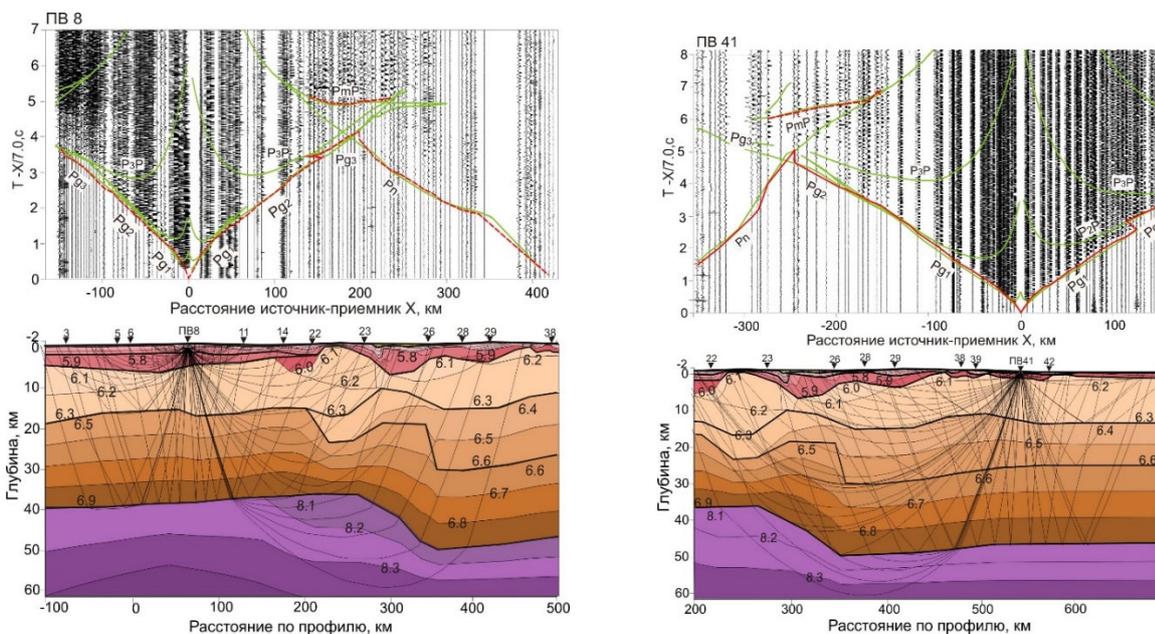


Рис. 3. Примеры сейсмограмм в редуцированном масштабе времен и годографов с соответствующими моделями земной коры и лучевыми траекториями распространения преломленно-рефрагированных волн в слоях P_{gi} ($i=1,2,3,4$, в мантии P_n) и отраженных от границ в коре (P_iP) и от Мохо (P_mP). Наблюденные и рассчитанные годографы показаны красными штриховыми и желто-зелеными линиями соответственно (скорость редукции 7.0 км/с). 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.

Колебания регистрирующихся волн (рис. 3) характеризуются преобладающей частотой 7-12 Гц, а времена вступления первых волн можно определить только в увеличенном масштабе изображения. Повышенная интенсивность поля характерна для области в окрестности ПВ 8 на интервале (-100) – (+150) км. Главное отличие в прослеживании волны P_n из ПВ 8 заключается в том, что ее выход в первые вступления, наблюдается на удалениях около 190 км, тогда как из ПВ 41 это происходит на расстоянии около 250 км, что обусловлено увеличением глубины Мохо до 50 км и присутствием нового слоя в интервале глубин 15-27 км со скоростью 6.4-6.6 км/с. Отраженная волна от Мохо из ПВ 41 представлена интенсивными колебаниями только на отдельных сейсмических трассах, соответствующих теоретическому годографу. Различия между наблюдаемыми и расчетными временами пробега соответствуют величине фаз колебаний и достигают в среднем 0.1-0.15 с [7].

Результаты

Структура приповерхностной части коры представлена тремя латерально неоднородными слоями как по мощности, так и скорости (рис. 4). Первый, прерывистый слой, представлен мелкими локальными мезо-кайнозойскими впади-

нами, заполненными породами со скоростью 4.0-4.5 км/с. В южной прибортовой части Чульманской впадины их мощность достигает 500 м. Во втором слое скорость 5.0-5.5 км/с при мощности 0.1-1.5 км, изменяющейся из-за вариаций рельефа его подошвы. Увеличение ее глубины до 2.5-2.7 км определяет положение южного борта Чульманской впадины. Скорость в третьем слое 5.5-5.9 км/с при мощности уменьшающейся 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. Если в пределах Станового блока (IV) соотношение рельефов кровли и подошвы слоя 3 является инверсионным, то в Алданском блоке (V) их залегание согласное. В блоке IV скорость увеличивается с глубиной в интервале 5.5-5.8 км/с, а в пределах блока V от 5.8 до 6.2 км/с. Подошву третьего слоя со скоростью 6.1-6.2 км/с можно отнести к поверхности раннедокембрийского фундамента [6], залегающего на глубине 2-4 км в IV и V блоках (рис. 4) по аналогии с кровлей архейского фундамента на Сибирском кратоне [7].

Земная кора по данным ГСЗ под предполагаемой поверхностью раннедокембрийского фундамента Станового блока представлена двухслойной и для Алданского трехслойной моделями (рис. 4). В Становом блоке слой верхней коры мощностью около 10-15 км характеризуется практически постоянной скоростью 6.2-6.3 км/с. В нижней коре мощностью около 20 км скорость изменяется с глубиной от 6.5 до 6.9 км/с.

Другое распределение скорости с глубиной наблюдается в трехслойной коре Алданского блока, где в верхнем ее слое мощностью до 10 км (глубина ее подошвы на 10-14 км) скорость увеличивается от 6.2 до 6.3 км/с (рис. 4). В среднем слое (отсутствует в Становом блоке) мощностью 15-27 км скорость возрастает с глубиной от 6.4 до 6.6 км/с, а в нижнем на интервале глубины 27-50 км от 6.6 км/с до 6.9 км/с. На подошве третьего слоя отсутствует скачок скорости отсутствует при различной величине градиента.

Интерпретация результатов

Алданский и Становой блоки разделены ступенчатым увеличением мощности коры от 40 до 50 км на участке профиля 275-350 км, расположенного под южной частью сейсмоактивной Чульманской впадины с повышенной мощностью мезозойских отложений (рис. 4). В этой области можно выделить наклонную (под углом 20°) зону разлома объединяющая ступень на Мохо с унаследованными погружениями кровли нижнего слоя коры и рельефа преломляющей границы, маркирующей положение кровли раннедокембрийского кристаллического фундамента [8].

Здесь же формируется промежуточный слой средней коры со скоростью 6.4-6.6 км/с (отсутствует в Становом блоке) и утолщается до 6-8 км приповерхностный слой в Чульманской впадине, покрывающий раннедокембрийский фундамент. Утонение приповерхностного слоя с пониженной до 5.5-5.8 км/с скоростью под Становым хребтом, возможно, обусловлено эрозией и переносом пород, главным образом, в близлежащую Чульманскую впадину.

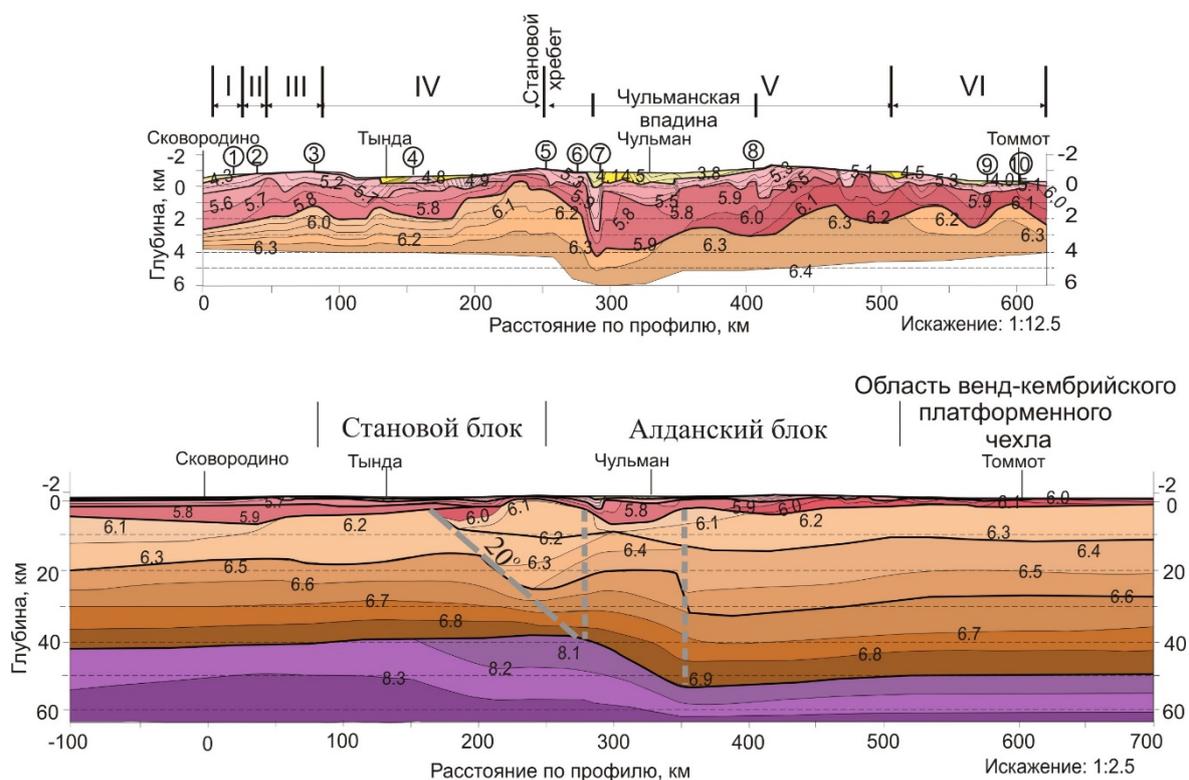


Рис. 4. Сейсмические модели верхней коры (вверху) и всей ее толщи (внизу). Показаны тектонические области по [1]:

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-Тукурингрский, 2 - Северо-Тукурингрский, 3 - Желтулакский, 4 - Гилнойский, 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° , вертикальными линиями оконтурена область аномальных неоднородностей, прослеживаемых в земной коре и верхах мантии.

При этом возникает проблема образования самого хребта в пределах Алданского блока, связанная с не единственностью локализации зоны сочленения блоков в зависимости от природы его формирования. Проблема сводится к блоку коры треугольной формы (выклинивается на подошве коры), ограниченного на юге наклонным разломом и на севере вертикальной зоной, ограничивающей южный борт Чульманской впадины.

Столь не типичная для Сибирского кратона [7] структура земной коры Алдано-Станового щита выделяет его в отдельный объект для изучения природы выявленных неоднородностей в связи с мантийной частью литосферы и сейсмичностью Чульманской впадины. В частности, например, существует достаточно уверенная корреляционная связь между сглаженным рельефом и гравитационным полем (в круге радиусом 125 км) свидетельствующая об изостатическом состоянии литосферы (модель Эйри-Хейсканена). Получено, что для Алданского

блока корреляция (h -рельеф в м, g -аномалии Буге в мГал) представлена уравнением $h=10.841g+128.2$, при $R^2=0.9934$, для Станового $h=10.037g+137.42$, $R^2=0.9968$ и для восточной пассивной окраины Сибирского кратона $h=19.51g-741.65$ при $R^2=0.9988$. Существующие различия указывают на латеральные неоднородности литосферы и соответственно на ее геодинамические характеристики.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта 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”.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Didenko A.N., Efimov A.S., Nelyubov P.A., Salnikov A.S., Staroseltsev V.S., Shevchenko B.F., Goroshko M.V., Guryanov V.A., Zamozhnyaya N.G. Structure and evolution of the crust in the area of articulation of the Central Asian belt and the Siberian platform: profile of Skovorodino-Tommot // *Geology and Geophysics*. – 2013. – Vol. 54. – № 10. – P. 1583-1599.
2. Goshko E.Yu., Efimov A.S., Sal'nikov A.S. The recent structure and the assumed formation history of the crust for the southeastern segment of the North Asian craton along Reference Profile 3-DV// *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2017. – 5(3). – P. 785–798. doi:10.5800/GT-2014-5-3-015.
3. Rudnitskaya D.I., Staroseltsev V.S., Salnikov A.S. Construction of the crust macromodel from Reapak technology along geotraverse 3-DV (Eastern Siberia) // *Geophysics*. – 2013. – № 1. – P. 19-26.
4. Kheraskova T.N., Yakovlev D.V., Pimanova N.N., Berezner O.S. The structure of the Aldan shield and its junction zone with the Central Asian folded belt according to geophysical data interpretation of transects "3DV" and "Tynda-Amurzet // *Geotectonics*. – 2018. – № 1. – P. 3-27.
5. Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent territories, scale: 1:25000000//2008. Compiled under the editorship: Daukeev S.Z., Kim B.C., Li Tingdong, Petrov O.V., Tomurtogoo O.: Geological Publishing House.
6. Zelt C.A., Smith R.B. Seismic travelttime inversion for 2-D crustal velocity structure // *Geophys. J.* – 1992. – V.108. – P. 16 – 34.
7. Suvorov V.D., Melnik E.A. 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*. – 2021. – Vol. 57 (6). – P. 864–877. doi: 10.1134/S1069351321060100
8. Smelov A.P., Zedgenizov A.N., Timofeev V.F. Aldano-Stanovoy shield // *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)*. -М.: МАИК "Science/Interpereodika", 2001. P. 81-104.

© В. Д. Суворов, Е. А. Мельник, Е. В. Павлов, 2022