

А. В. РЫБАЛКА (ОАО «Баженовская геофиз. эксп.»),  
 Г. А. ПЕТРОВ (ОАО «Уральская геологосъем. эксп.»), Т. В. КАШУБИНА (ВСЕГЕИ),  
 В. А. КУЛИКОВ (ООО «Северо-Запад»), А. В. ЕГОРКИН (ГФУП «ВНИИГеофизика»),  
 В. А. ДУШИН (ГОУ ВПО «Уральский госуд. горн. ун-т»), С. Н. КАШУБИН (ВСЕГЕИ)

## ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ УРАЛА ПО ДАННЫМ ПОЛЯРНО-УРАЛЬСКОГО ТРАНСЕКТА

Отработанный в 2006–2008 гг. Полярно-Уральский трансект длиной 300 км – это третий опорный геолого-геофизический профиль нового поколения, пересекающий Уральский ороген. Комплекс полевых наблюдений включал профилирование методом глубинного МОВ-ОГТ, наблюдения ГСЗ, МОВЗ, МТЗ, геологические исследования в открытой части Урала. Выполнена цифровая обработка гравиметрических, магнитометрических, геологических карт в 50-километровой полосе вдоль трансекта. Выявлено деление земной коры региона на три части с запада на восток: достаточно высокоотражательная и высокопроводящая складчато-надвиговая окраина Восточно-Европейского палеоконтинента, сейсмически почти прозрачный и электрически низкопроводящий Войкарский палеоостроводужный террейн; высокоотражательный и хорошо проводящий (особенно в средней коре) Восточно-Уральский гетерогенный микроконтинент, укрытый осадками Западно-Сибирского бассейна. В целом Полярный Урал имеет бивергентный облик с практически прозрачной (на разрезах МОВ-ОГТ) нижней корой. Граница Мохо выделяется только по данным ГСЗ и аномальна по отношению к другим сегментам Урала. Большинство главных структур Полярного Урала находится в аллохтонном залегании.

Ключевые слова: *опорный профиль, глубинные сейсмические исследования, магнитотеллурическое зондирование, аллохтоны, аномальная переходная зона кора–мантия, Янгиюганская параметрическая скважина.*

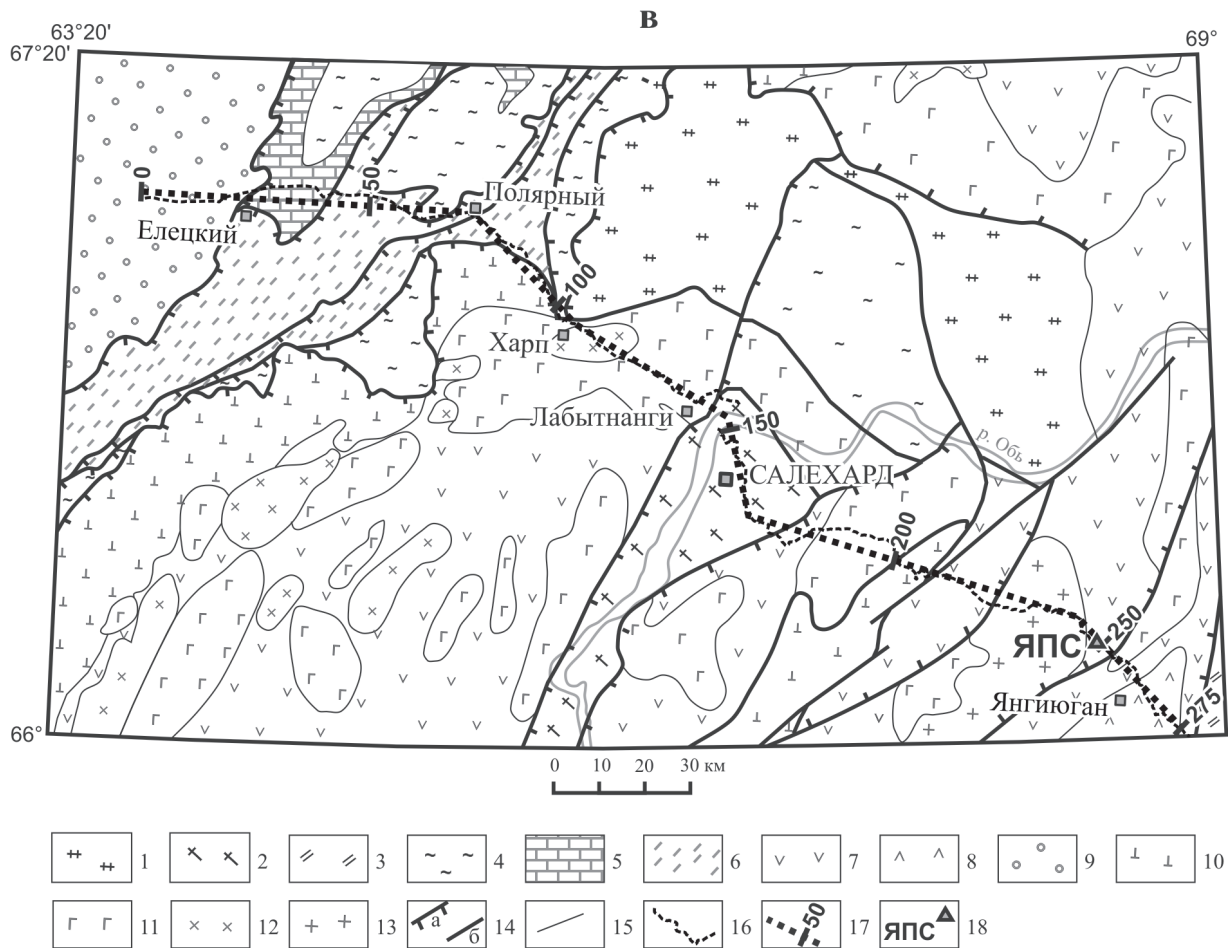
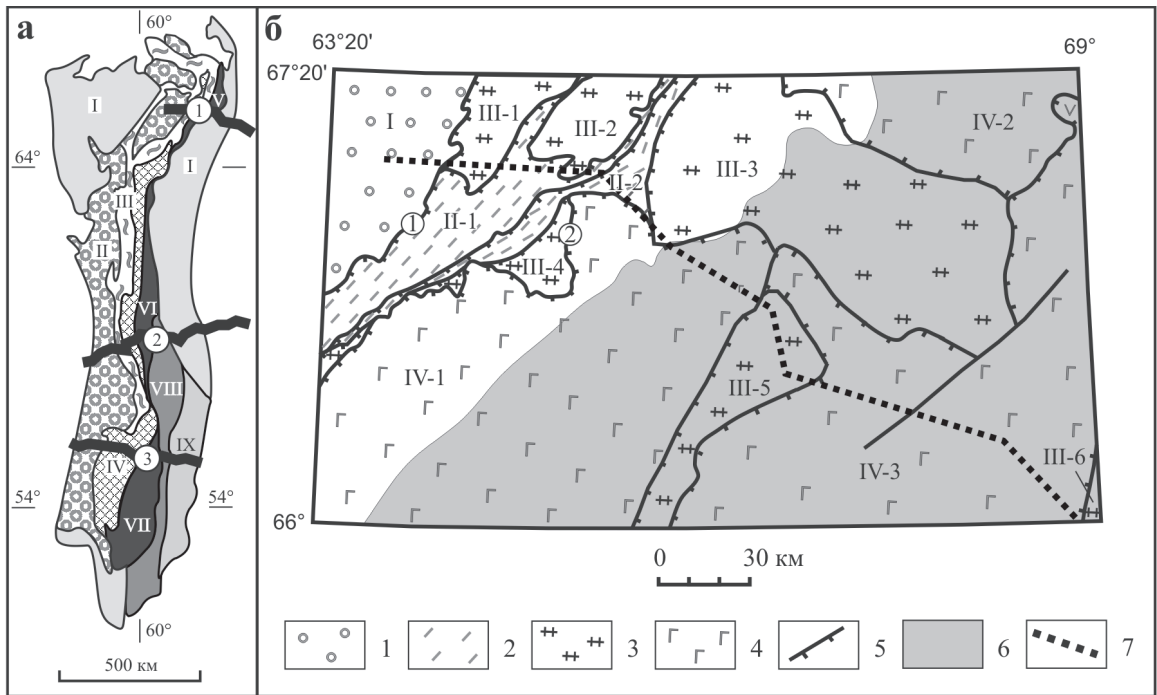
The 300-km long Polar-Urals transect, the third deep transect of the new generation across the Uralian orogenic belt, was acquired in 2006–2008. The field studies included: 45-fold nearvertical CMP reflection seismic profiling, wide-angle seismic studies, receiver functions studies, magneto-telluric sounding, geological observations in the exposed part. Processing of gravity, magnetic and geological maps in the 50-km wide band along the transect was also fulfilled. Investigations show distinct division of the crust into three domains from west to east in the upper- and mid-crustal levels: rather seismically reflective and electrically conductive folded and thrust eastern margin of the East-European paleocontinent; nearly transparent and non-conductive Voykar paleoisland arc terrain; and high reflective and conductive (especially in the middle crust) East-Uralian heterogeneous microcontinent, hidden under sediments of the West-Siberian basin. In general, the Polar Urals demonstrates bivergent structure and practically transparent lower crust in the field of near-vertical reflections.

Key words: *geotransect, deep seismic studies, magneto-telluric sounding, allochthons, anomalous crust–mantle transition zone, Yangiyugan parametric borehole.*

История геологического исследования и освоения Урала насчитывает более трех веков, но несмотря на это в понимании глубинного строения Уральского подвижного пояса важнейшую роль сыграли сейсмические исследования, начатые во второй половине XX в. Качественно новый уровень работ, значительно повысивший их информативность, отмечается с 1995 г., когда глубинные сейсмические исследования методом отражённых волн в модификации способа общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) и методом глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) совместно с геоэлектрическими и геологическими работами стали основой комплексных геолого-геофизических исследований.

Полярно-Уральский трансект, работы на котором проведены в 2006–2008 гг. [5, 13], наряду с отработанными ранее профилями «Уралсейс» в 1995 г. [1, 10] и «Среднеуральский трансект» в 1993–2004 гг. [8, 9, 11], – составили серию субширотных пересечений Уральского складчатого пояса глубинными

профилями нового поколения (рис. 1). Современные пересечения Урала выполнены в соответствии с федеральной программой «Создание государственной сети опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин». Отличительной чертой опорных геолого-геофизических профилей нового поколения стало использование глубинных исследований методом отражённых волн по технологии ОГТ. На Полярно-Уральском трансекте [13] выполнены МОВ-ОГТ, глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ) на преломленных и закритических отражённых Р- и S-волнах, исследования методом обменных волн землетрясений (МОВЗ), геоэлектрические исследования методом магнитотеллурических зондирований (МТЗ) [5], полевые геологические маршруты, лабораторные геохимические и изотопно-геохронологические работы, комплексный анализ геолого-геофизических материалов с привлечением данных о потенциальных полях. В этой статье основное



**Рис. 1. Геологические схемы и карты района Полярно-Уральского трансекта**

*a* – схема структурно-формационного районирования Урала. I – мезозойско-кайнозойские отложения (осадочный чехол эпипротерозойских и эпипалеозойских платформ), II – Предуральский передовой прогиб верхнепалеозойского Уральского орогена, III – шельфовые и батальные толщи палеозойской окраины Восточно-Европейской платформы (Западно-Уральская мегазона), IV – блоки допалеозойского основания уралид (Центрально-Уральская мегазона), V–VII – палеостроводужные мегазоны: V – Войкаро-Шучьинская, VI – Тагильская, VII – Магнитогорская; VIII, IX – коллаж гетерогенных террейнов, сложенных комплексами Восточно-Уральской (VIII) и Зауральской (IX) мегазон. Цифры в кружках – геофизические трансекты: 1 – Полярно-Уральский, 2 – Среднеуральский, 3 – Южно-Уральский (Уралсейс);

внимание уделено анализу информации о глубинном строении, полученной по результатам исследований МОВ-ОГТ, ГСЗ, МОВЗ, МТЗ.

#### **Краткий очерк геологического строения Урала.**

Уральский складчатый пояс — горное сооружение протяженностью более 2000 км, маркирующее границу Европы и Азии. Современный Уральский горный пояс наследует положение и простирается западной части пермско-раннемезозойского коллизионного орогена, во многом определяющего его геологическое строение. В геологическом строении Урала выделяется несколько крупных структур, прослеживающихся вдоль всего орогена: Предуральский передовой (форландовый) прогиб; структуры тектонически переработанной окраины Восточно-Европейского палеоматерика — Западно-Уральская и Центрально-Уральская мегазоны; аккрецированные к континентальной окраине палеостроводужные террейны, входящие в состав Войкаро-Щучинской, Тагильской и Магнитогорской мегазон; коллаж гетерогенных террейнов с субконтинентальными и островодужными типами коры, составляющих Восточно-Уральскую и Зауральскую мегазоны (рис. 1). Вместе с тем, существуют и определенные различия в геологическом строении разных сегментов Уральского горного пояса. По особенностям геологического строения и набору полезных ископаемых Урал можно разделить на несколько фрагментов: Южноуральский, Среднеуральский (включающий и Северный Урал), Приполярноуральский и Полярноуральский.

Южноуральский фрагмент наиболее хорошо изучен, его особенностью являются доступность для прямого изучения всех структурно-формационных мегазон и четкая локализация Урала между Казахстанской эпикаледонской плитой и Восточно-Европейской платформой. В этом районе распространены комплексы Предуральского прогиба, Западно-Уральской и Центрально-Уральской мегазон, представляющих собой фрагменты тектонически переработанных блоков окраины Восточно-Европейской платформы; преимущественно девонских вулканитов Магнитогорской мегазоны и сложного коллажа допалеозойских микроконтинентов и перекрывающих их аллохтонных пластин, сложенных пестрыми в фациальном отношении палеозойскими морскими отложениями и вулканитами (Восточно-Уральская и Зауральская мегазо-

ны). На Южном Урале пройден опорный глубинный геолого-геофизический профиль «Уралсейс», в полосе которого выполнялись разнообразные геофизические, геологические и геохимические исследования рядом производственных и научных отечественных и зарубежных организаций в рамках международного проекта «Европроба». Получена богатая информация о глубинном строении Южного Урала, что нашло отражение во многих публикациях [1 и др.].

Средний и Северный Урал при наличии определенного сходства с Южным имеет и ряд отличий, главное из которых — присутствие крупной ордовикско-девонской Тагильской палеостроводужной системы (Тагильской мегазоны). В состав Тагильской мегазоны входит цепочка крупных, часто концентрически-зональных дунит-клинопироксенит-габбровых массивов Платиноносного пояса Урала. Другая особенность — значительная степень перекрытия Восточно-Уральской и Зауральской мегазон мощным чехлом мезозойско-кайнозойских осадков, что затрудняет их изучение. Восточное ограничение уральских структур здесь проводится не столь однозначно, поскольку вместо единой Казахстанской плиты на широте Среднего и Северного Урала находится коллаж менее крупных блокомикроконтинентов. Глубинное строение Среднего Урала наиболее полно изучено по Среднеуральскому трансекту [9, 11].

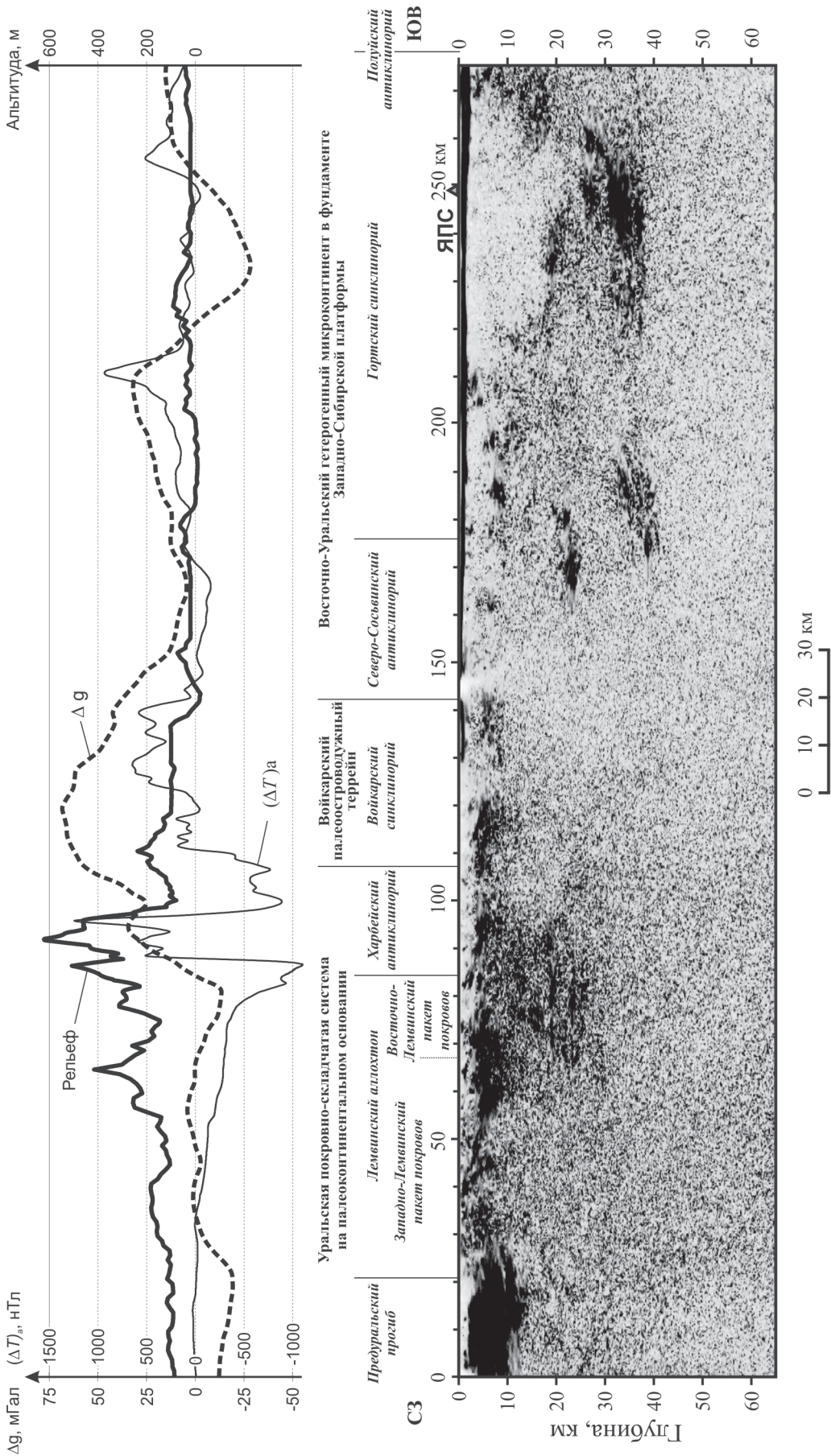
Приполярный Урал отличается наиболее расчлененным рельефом. В этом районе широко распространены осадочные комплексы Предуральского прогиба, Елецкой и Лемвинской зон Западно-Уральской мегазоны, а также крупные антиклинорные структуры (Кожымская, Хобеизская и др.) с дорифейскими амфиболит-гнейсовыми ядрами, обрамленными рифейскими осадочными и вулканогенными толщами. Комплексы северного продолжения Тагильской мегазоны развиты фрагментарно и в значительной степени перекрыты чехлом мезозойско-кайнозойских осадков; их залегание сильно тектонически нарушено.

Полярно-Уральский сегмент характеризуется сложным мозаичным геологическим строением. «Общеуральский» субмеридиональный структурный план здесь нарушен системой поперечных поднятий и опусканий, наблюдается срезание древних тиманских структур северо-западного простираения уральскими меридиональными и северо-во-

---

*б* — схема структурного районирования района Полярно-Уральского трансекта. 1 — Предуральский прогиб; 2 — Лемвинский аллохтон, сложенный преимущественно тонкотерригенными батиальными осадками Зилаиро-Лемвинской СФЗ Западно-Уральской мегазоны (пакеты покровов: П-1 — Западно-Лемвинский, П-2 — Восточно-Лемвинский); 3 — выступы допалеозойского основания и метаморфических комплексов: П-1 — Енганэ-Пэ, П-2 — Манита-Нырл, П-3 — Харбейский, П-4 — Хараматолоуский, П-5 — Северо-Сосьвинский, П-6 — Полуйский; 4 — интрузивно-вулканогенные палеостроводужные блоки: IV-1 — Войкарский, IV-2 — Щучинский, IV-3 — Гортский; 5 — главные разломы (1 — Главный Западно-Уральский надвиг, 2 — Главный Уральский разлом); 6 — область распространения мезозойско-кайнозойских отложений; 7 — интерпретационная линия Полярно-Уральского трансекта;

*в* — геологическая схема района Полярно-Уральского трансекта (по материалам М. А. Шишкина и Н. В. Григорьева). 1–3 — гнейсы, амфиболиты и мигматиты выступов дорифейского фундамента: 1 — Харбейского, 2 — Северо-Сосьвинского, 3 — Полуйского; 4 — позднепротерозойские (рифейские и вендские) вулканогенные и осадочные образования; 5–9 — палеозойские и раннемезозойские осадочные и вулканогенные образования: 5 — мелководные терригенно-карбонатные, 6 — глубоководные карбонатно-терригенно-кремнистые, 7 — вулканогенные и осадочные ордовикско-раннедевонские, 8 — вулканогенные и осадочные девонско-каменноугольные, 9 — пермские и раннемезозойские отложения Предуральского прогиба; 10–13 — плутонические образования: 10 — дунит-гарцбургитовые комплексы; 11 — габброиды, 12 — гранитоиды девонской диорит-гранодиоритовой формации, 13 — позднепалеозойские граниты; 14 — разрывные нарушения: *a* — надвиги и взбросы, *б* — с неустановленной или сложной кинематикой; 15 — геологические границы; 16 — линия наблюдений МОВ-ОГТ на Полярно-Уральском трансекте; 17 — интерпретационная линия Полярно-Уральского трансекта с пикетажем в км; 18 — положение Янгиюганской параметрической скважины



ЯПС ▲ место бурения Янгиоганской параметрической скважины с проектной глубиной 4000 м

Рис. 2. Глубинный сейсмический разрез МОВ-ОГТ с графиками рельефа дневной поверхности, гравитационного и аномального магнитного полей вдоль Полярно-Уральского трансекта

сточными, на которые вновь накладываются структуры северо-западного и субширотного простирания мезозойской и кайнозойской активизации [2]. Присутствуют разнообразные по составу и размеру блоки допалеозойских пород – Енгане-Пэ, Манита-Нырл, Оченырл, Харбейский, Хараматолоуский, в состав которых входят островодужные и океанические рифейские образования и дорифейские метаморфические комплексы. Характерно наличие крупных альпинотипных габбро-ультрамафитовых массивов Сыум-Кеу, Рай-Из, Войкаро-Сынинской. Широко распространены палеозойские осадочные последовательности, сформированные в условиях шельфа, континентального склона, субокеанического бассейна и островных дуг. Разрезы тектонических фрагментированы, значительная часть пород находится в аллохтонном залегании (рис. 2).

**Географическое положение Полярно-Уральского трансекта и методы исследований.** Полярно-Уральский трансект длиной 300 пог. км расположен на территории Республики Коми и Ямало-Ненецкого автономного округа в субширотном направлении вдоль линии ж. д. ст. Сейда – пос. Елецкий – пос. Полярный – г. Лабытнанги – г. Салехард – и далее на восток-юго-восток до меридиана  $69^\circ$  в. д. (до окрестностей заброшенного пос. Янгиюган). Профиль отработывался вдоль существующих полевых дорог, что придало его траектории значительную криволинейность. Длина итогового разреза по трансекту составила 275 км за счет проектирования данных различных методов на единую обобщённую интерпретационную линию.

Профилирование МОВ-ОГТ (работы ОАО «Баженовская геофизическая экспедиция») выполнено с использованием отечественной телеметрической сейсмостанции СТС-24Р и импульсных невзрывных источников «Енисей» КЭМ-4 с кратностью ОГТ-45, интервалом пунктов возбуждения 100 м и пунктов приёма 50 м, длиной сейсмической записи 30 с, шагом квантования 2 мс. При работах ГСЗ (ГФУП «ВНИИГеофизика») применялись сейсмические цифровые регистраторы «Дельта-Геон» с трехкомпонентными сейсмоприёмниками с шагом около 3 км, возбуждение сигнала с 6 пунктов взрыва (два выносных) с мощностью заряда до 4 т и интервалом порядка 50 км, максимальное удаление взрыв-прибора до 400 км, длина сейсмической записи не менее 120 с. Наблюдения МОВЗ (ГФУП «ВНИИГеофизика») выполнены только на западной части трансекта с той же сейсморегистрирующей аппаратурой, что и на ГСЗ. При магнитотеллурических зондированиях (ООО «Северо-Запад») использовалась аппаратура производства «Phoenix Geophysics» с шагом наблюдений 1 км для малых и средних глубин исследования (АМТЗ и МТЗ) и шагом 15–20 км для глубинных исследований (ГМТЗ). Полевые геологические исследования проводились сотрудниками Уральского государственного горного университета в полосе шириной 50 км вдоль трансекта. Комплексная обработка и анализ всей совокупности геолого-геофизической информации, полученной на трансекте, выполнены в Баженовской геофизической экспедиции.

**Глубинная геолого-геофизическая модель Полярно-Уральского трансекта.** Полярно-Уральский трансект демонстрирует глубинное строение всех

главных структур Урала (рис. 2–4). На западе профиль начинается в пределах Предуральского прогиба, далее на восток он пересекает пакеты пластин Лемвинского аллохтона, Харбейский антиклинорий, Войкарский синклинорий и гетерогенный Восточно-Уральский микроконтинент, перекрытый чехлом мезозойско-кайнозойских осадков Западно-Сибирской платформы. На разрезах по материалам МОВ-ОГТ и МТЗ (рис. 3) прослеживаются отдельные структурные элементы в земной коре до глубины порядка 40 км, глубже интерпретация геологического строения производилась в основном по данным методов ГСЗ и ГМТЗ. При создании плотностной модели трансекта первоначальные оценки плотностей в различных блоках земной коры сделаны путём пересчета скоростей  $V_p$  и  $V_s$ , полученных по данным ГСЗ, с использованием двупараметрической зависимости плотности от скоростей упругих волн [6]. Далее плотности были откорректированы методом подбора по аномалиям силы тяжести, полученным по материалам оцифровки изданных и фондовых гравиметрических карт.

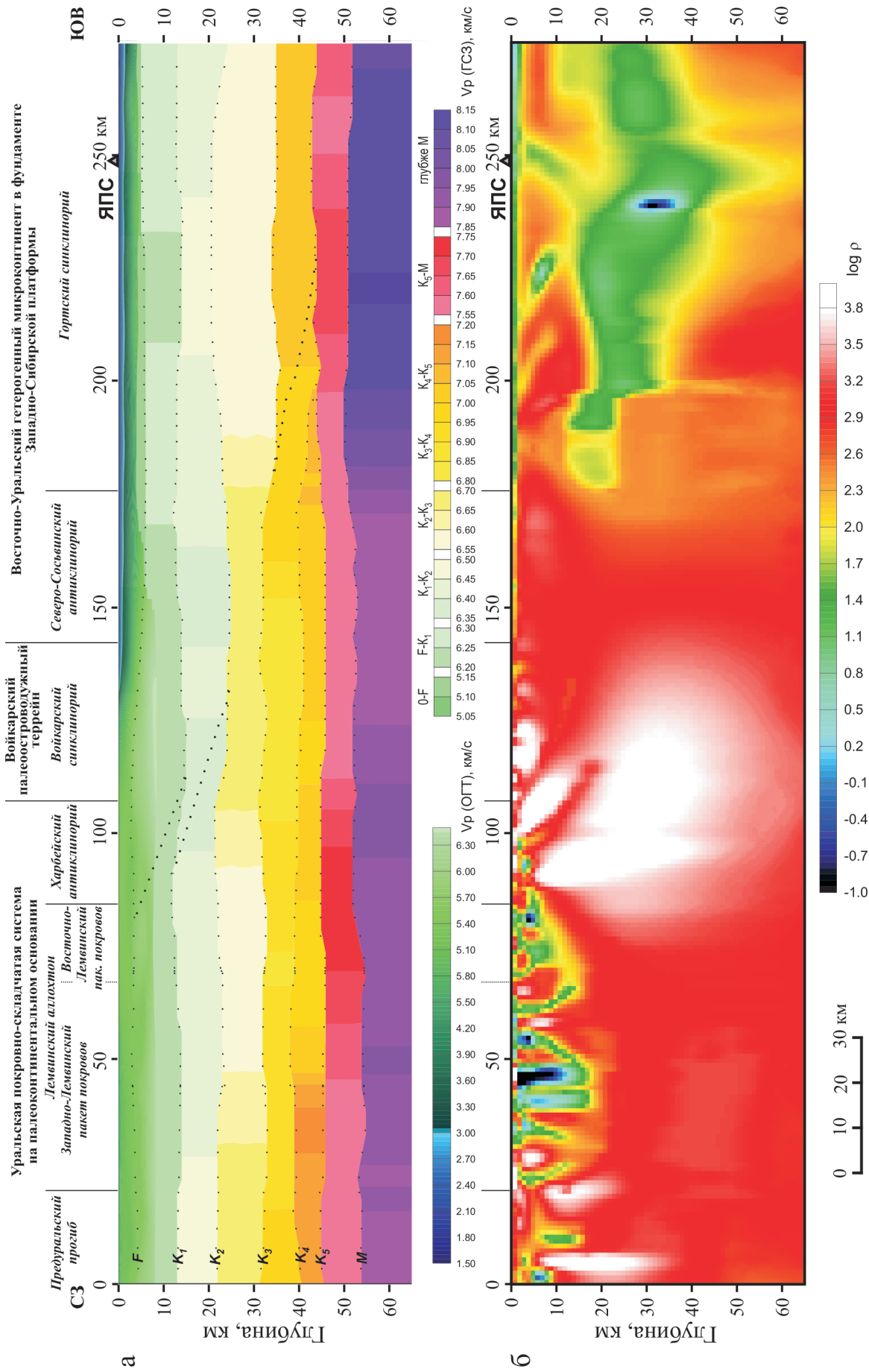
При описании геолого-геофизической модели вдоль Полярно-Уральского трансекта можно условно выделить четыре уровня, внутри которых структурное районирование имеет значимые различия: верхнекоровый (до 10–13 км), средне-нижнекоровый (10–40 км), переходный от коры к мантии или нижнекорово-верхнемантийный (40–52 км), верхнемантийный (глубже 52 км).

**Верхнекоровый уровень (глубины 0–10 км)** интерпретируется наиболее уверенно, поскольку район расположения профиля неплохо изучен на поверхности (за исключением восточной части, полностью перекрытой мезозойско-кайнозойскими осадками), и поверхностные структуры, как правило, достаточно хорошо экстраполируются на глубины до 10 км по комплексу геофизических данных.

В частности, на разрезе МОВ-ОГТ наиболее выразительно проявляется слоистый осадочный чехол, а также наклонные отражатели в пределах открытого Урала. Как и на других пересечениях Урала, именно до глубин 10–15 км, как правило, прослеживаются локальные зоны протяжённых интенсивных границ, отождествляемых с тектоническими нарушениями. Очевидно, что такой предел в глубине прослеживания локальных интенсивных наклонных отражателей связан со сменой реологических свойств среды и переходом от преимущественно хрупких к хрупкопластичным деформациям [4].

В верхней части геоэлектрического разреза выделяется ряд узких зон низкого сопротивления преимущественно с западной вергентностью. Все эти аномальные зоны приурочены к крупным уральским разрывным нарушениям – Западно-уральскому надвику, Главному Уральскому разлому и др. Сопротивление пород в пределах аномальных зон составляет единицы Ом · м. Природа аномальной проводимости этих зон может быть связана с присутствием флюидизированных пород в зонах смятия.

*Западная часть трансекта (пикеты геолого-геофизического разреза 0–20 км)* пересекает фрагмент Предуральского прогиба, выполненного отложениями пермского возраста. Мощность пермских терригенных толщ увеличивается на восток по направлению к Уральскому орогену и составляет 3–6 км.



**Рис. 3. Скоростная и геоэлектрическая модели Полярно-Уральского трансекта**

*а* – комбинационная сейсмическая модель скоростей продольных волн по данным МОВ-ОГТ в верхней части и по данным ГСЗ – в глубинной части разреза; *б* – геоэлектрическая модель по данным МГЗ

Залегающие ниже ордовикско-каменноугольные карбонатно-терригенные отложения шельфа палеозойского Восточно-Европейского палеоматерика имеют общую мощность 5–6 км. В основании палеозойского разреза можно предположить наличие грабена, выполненного грубообломочными позднекембрийско-раннеордовикскими образованиями мощностью до 1,5–2 км. Палеозойский разрез подстилается неопротерозойскими (рифейскими и вендскими) вулканогенными и осадочными толщами, коррелируемыми с бедамельской серией и енганэпэйской свитой, доступными для наблюдения севернее линии профиля, на хребтах Енганэ-Пэ и Манита-Ныр. Сейсмические отражатели в западной части профиля фиксируют главным образом залежание слоистости, реже сбросовые и взбросовые сместители.

*Интервал пикетов 20–70 км* соответствует субгоризонтальному Лемвинскому шарьяжному пакету пластин, который прослеживается, по геофизическим данным, до глубины 2–3 км. Поверхность подошвы аллохтонного комплекса во многих местах залегает на допалеозойских комплексах. Граница Лемвинского пакета пластин с Предуральским прогибом проходит по надвигу и крупному взбрососдвиговому (?) сместителю. Пластины слагаются палеозойскими толщами шельфа и континентального склона Восточно-Европейского палеоматерика, смятыми в асимметричные складки с осевыми поверхностями, субпараллельными главным сместителям. Глубже 2–3 км залегают неопротерозойские вулканогенные и терригенные образования, верхняя часть разреза которых соответствует вендской енганэпэйской свите и позднерифейской бедамельской серии. Предполагаемая подошва рифейского разреза постепенно поднимается в восточном направлении до 8 км. Сейсмические отражатели подчеркивают в основном надвиговые сместители главной фазы деформаций, в меньшей степени слоистость в осадках и поздние листрические разломы. Предполагается гетерогенность рифейско-вендского разреза, обусловленная, по видимому, преобладанием вулканических или осадочных пород, что выражается варьированием плотности отдельных блоков от 2,71 до 2,82 г/см<sup>3</sup>.

*Интервал пикетов 70–85 км* сложен на поверхности тонкотерригенными осадками ордовикско-каменноугольного возраста. Палеозойские осадки слагают тектонический клин, погружающийся на восток до глубины 9 км.

В *интервале пикетов 85–105 км* Полярно-Уральский трансект пересекает метаморфические образования Харбейского антиклинория – зеленые и углеродистые сланцы няровейской свиты RF<sub>2</sub>, гнейсы и амфиболиты ханмейхойской свиты PR<sub>1</sub> с интрузиями гранитов. Метаморфический комплекс перекрыт субгоризонтальным тектоническим покровом матаалевролитов орангской свиты ордовика и серпентинитовым меланжем. По геофизическим данным, Харбейский «антиклинорий» представляет собой выдвинутый с востока блок кристаллических пород среднекорových метаморфических комплексов.

В *интервале пикетов 105–145 км* трансект проходит через Войкарский террейн, представленный в изучаемом районе глубинными магматическими и мантийными комплексами основания палеозойской островодужной системы – ордовикскими (позднепротерозойскими?) ультрамафитами райиз-

войкарского и габброидами кэршорского комплексов, раннедевонскими гранитами собского комплекса. Террейн представляет собой синформную структуру мощностью до 9 км, ограниченную разрывными нарушениями восточного и западного падения. Восточная часть террейна перекрыта сплошным чехлом юрско-меловых осадков, в основании которого располагается грабен, выполненный угленосными триасовыми отложениями мощностью до 200 м. Далее на восток распространены мезозойско-кайнозойские морские и континентальные осадки чехла Западно-Сибирской плиты, в фундаменте которой прослеживаются структуры Восточно-Уральского гетерогенного террейна (микроконтинента). Мощность осадочного чехла от нескольких десятков метров в западной части площади его распространения до 1,5–2 км у восточной границы трансекта.

Восточная часть Полярно-Уральского трансекта пересекает несколько геологических структур в фундаменте Западно-Сибирской плиты.

В *интервале пикетов 145–175 км* предполагаются метаморфические образования (возможно, амфиболиты с небольшим количеством гнейсов) Северо-Сосьвинского антиклинория. Западная граница метаморфического блока имеет западное падение, восточная часть его перекрыта офиолитовым аллохтоном.

*Интервал пикетов 175–275 км* слагается перекрытыми чехлом мезозойско-кайнозойских отложений вулканитами, вулканогенно-осадочными породами, ультрамафитами, габбро и гранитами, входящими в состав Гортского синклинория (Ангальско-Березовская СФЗ) и Восточно-Салехардской структурно-формационной зоны. Западная часть Гортского синклинория представлена аллохтонным покровом, сложенным альпинотипными ультрамафитами, габбро и вулканитами предположительно раннепалеозойского возраста. В центральной его части располагается крупный гранитоидный массив, хорошо фиксируемый минимумом гравитационного поля. Восточная часть этого фрагмента разреза вмещает небольшой габбровый массив и предположительно девонские вулканогенно-осадочные образования. В нижней части Гортской синформы по рисунку отражающих площадок предполагается наличие шовной структуры (корневой зоны аллохтона?), полого погружающейся на запад.

*Средне-нижнекоровый уровень (глубины 10–40 км)* слагается предположительно гнейсово-амфиболитовыми и габбро-гранулитовыми комплексами, входящими в состав нескольких мегаблоков – Восточно-Европейского, Северо-Сосьвинского и Полульского.

В разрезе МОВ-ОГТ под Предуральским прогибом и под открытым Уралом средняя кора маловыразительна. Повышенный фон отражений проявился на интервале пикетов 55–100 и глубинах до 30 км, а в пределах фундамента Западно-Сибирской платформы на пикетах 160–260 и глубинах 10–40 км выделился крупный амплитудно-выразительный объект с несколькими яркими элементами и отчетливой нижней кромкой. Нижняя кора в разрезе МОВ-ОГТ практически не проявилась и отрисована по границам ГСЗ.

По данным МТЗ, в пределах Полярно-Уральского трансекта в средней коре выделяются две области аномально высокой электропроводности: на

интервале пикетов 20–100 и глубинах 0–18 км (т. е. с охватом и верхней коры) и на интервале от пикета 175 км до восточной рамки разреза на глубинах 12–40 км. Каждая из этих областей в той или иной мере совпадает с областями повышенной насыщенности отражающими элементами (зоны «повышенной отражательности», или зоны «рефлективности») на разрезе МОВ-ОГТ. Первая из этих областей соответствует Лемвинскому аллохтону и залегающим под ним неопротерозойским образованиям, вторая – Гортской синформе и метаморфическому комплексу, залегающему под офиолитовым аллохтоном. Возможно, аномально высокая отражательность и электропроводность вызваны повышенной трещиноватостью и флюидонасыщенностью горных пород в этих областях разреза. Под осевой частью Уральского хребта, напротив, земная кора и мантия характеризуются монолитностью и низкой проводимостью.

В пределах *Восточно-Европейского* палеоконтинентального мегаблока постепенно увеличивается мощность гнейсово-амфиболитового комплекса от 7–8 км возле западной рамки разреза до 25–30 км под Харбейским антиклинорием, вероятно, связанное с тектоническим скупиванием. Далее на восток вновь происходит его утонение вплоть до выклинивания вблизи пикета 180 км на глубине 27 км. Часть структурно переработанных и диафторированных в палеозойское время горных пород гнейсово-амфиболитового комплекса Восточно-Европейского мегаблока выходит на поверхность в пределах Харбейского антиклинория, представляющего собой выступ дорифейского фундамента, ограниченный взбросовыми разрывными нарушениями. Кристаллическое основание окраины Восточно-Европейского палеоматерика погружается на восток под Войкарский островодужный и Северо-Сосьвинский метаморфический террейны, где срезается разрывным нарушением западного падения на глубине 27 км. Предполагается гетерогенное строение гнейсово-амфиболитового комплекса, выраженное в переменном соотношении в разрезе меланократовых и лейкократовых пород; расчетная плотность комплекса в разных блоках от 2,80 до 2,86 г/см<sup>3</sup>. Нижнекоревый «гранулит-базитовый слой» с плотностью 2,90 г/см<sup>3</sup> имеет мощность 11–15 км и залегает на глубинах 25–42 км. *Северо-Сосьвинский* мегаблок (террейн) имеет в разрезе линзовидную форму, максимальную протяженность на глубинах 10–20 км в интервале пикетов 135–230 км и, вероятно, слагается гнейсово-амфиболитовым комплексом со средней плотностью 2,79–2,81 г/см<sup>3</sup>. Восточная часть метаморфического террейна перекрыта шарьяжем офиолитов и вулканитов. С запада Северо-Сосьвинский мегаблок ограничен Войкарским террейном и сместителями Главного Уральского разлома, имеющими восточное падение; с востока – соответственно системами разрывных нарушений с восточным и западным падением, отделяющими его от Гортской синформы. *Полуйский* мегаблок (террейн) имеет среднюю плотность «гнейсово-амфиболитового» слоя 2,80 г/см<sup>3</sup>, клиновидную форму с увеличением мощности на восток, где за пределами полосы Полярно-Уральского трансекта картируется его выход на поверхность доюрского фундамента. В нижней части коры на глубинах 35–44 км предполагается наличие гранулит-базитового комплек-

са мощностью 7–10 км с плотностью 2,92 г/см<sup>3</sup>. Метаморфические комплексы Северо-Сосьвинского и Полуйского террейнов разделяются Гортской синформой, сложенной палеозойскими океаническими и островодужными образованиями, прорванными интрузией орогенных позднепалеозойских гранитов. По рисунку сейсмических отражающих площадок можно предположить пологое западное падение шовной зоны мощностью около 10 км, разделяющей метаморфические террейны, и присутствие в ней метаморфизованных вулканитов Ангальско-Березовской структурно-формационной зоны. В нижней коре эта шовная зона делит гранулит-базитовые комплексы Восточно-Европейского и Полуйского мегаблоков; при этом верхняя граница «гранулит-базитового» слоя на границе перечисленных мегаблоков резко погружается на восток от 30–32 до 35–36 км.

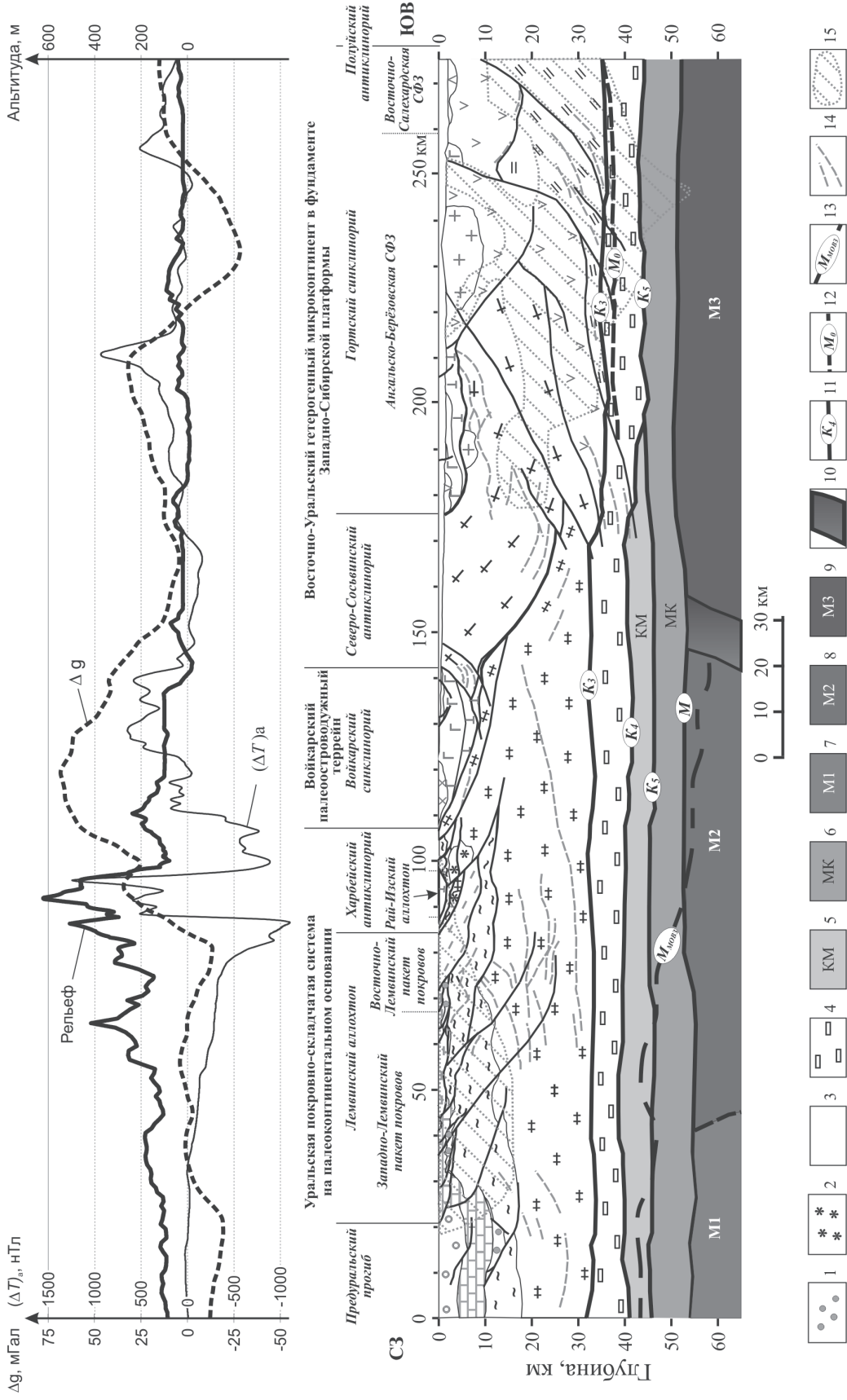
*Переходный корово-мантийный уровень (глубины 40–54 км)* предположительно слагается комплексами переработанной нижней коры и верхней мантии. Глубже 40 км сейсмические отражающие площадки на разрезе МОВ-ОГТ практически не прослеживаются, и геолого-геофизические границы проведены по данным ГСЗ.

В составе области перехода от коры к мантии выделяются два «слоя», обозначенные на разрезе (рис. 4) индексами КМ и МК. Первый из них ограничен преломляющими границами К<sub>4</sub> и К<sub>5</sub>, имеет мощность 5–7 км, линзовидную форму и тянется от западной рамки разреза до пикета 195 км, где выклинивается у шовной (корневой) зоны Гортской синформы. Предполагаемая плотность горных пород от 3,01 г/см<sup>3</sup> на западе до 2,99 г/см<sup>3</sup> на востоке. Можно предположить широкое развитие парагенезисов высоких ступеней амфиболитовой и гранулитовой или эклогитовой фаций (граната, пироксена и других минералов) в пределах «слоя» КМ, что привело к увеличению плотности нижнекоревых пород. Другой вариант интерпретации – широкое развитие базит-ультрабазитовых интрузий в нижней коре. Не исключено также, что этот «слой» представляет собой сильно переработанный, флюидизированный фрагмент верхней мантии.

«Слой» МК располагается глубже, между границами К<sub>5</sub> и М, и имеет мощность 6–8 км. В районе пикета 75 км на фоне общего субгоризонтального залегания фиксируется небольшая флексура с амплитудой около 1,5 км. Расчетная плотность горных пород «слоя» МК варьирует довольно существенно, составляет 3,16 г/см<sup>3</sup> в основании Полуйского террейна и 3,13–3,18 г/см<sup>3</sup> под Восточно-Европейским мегаблоком. Между Восточно-Европейским и Полуйским мегаблоками возможно наличие переходной зоны плотностью 3,10 г/см<sup>3</sup>. Можно предположить, что «слой» МК сложен диафторированными мантийными породами.

*Верхнемантийный уровень (глубже 54 км)* проявился лишь на данных наблюдений ГСЗ и ГМТЗ. Анализ комплекса материалов позволяет предположить присутствие в верхней мантии трёх крупных блоков (доменов): западного – Восточноевропейского, центрального – Уральского и восточного – Западносибирского. Восточноевропейский домен (М1 на рис. 4) имеет пониженные скорости сейсмических волн (7,89 км/с) и низкую, но не минимальную электропроводность. Уральский домен (М2) неоднороден, скорости сейсмических волн в





**Рис. 4. Схематическая геолого-геофизическая модель Полярно-Уральского трансекта**

1 – субтерритенный раннелазеозойский рифтогенный комплекс; 2 – вендский габро-диорит-гранодиоритовый комплекс; 3 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской платформы; 4 – нижнекоревой габро-гранулитовый комплекс; 5 – «переходный корово-мантийный слой», предположительно амфиболитованные и серпентинизированные мантийные перидотиты; 6 – предположительно флюидизированные и метасоматически измененные мантийные перидотиты; 7 – верхняя мантия окраины Восточно-Европейской платформы; 8 – верхняя мантия Уральского орогена; 9 – верхняя мантия Западно-Сибирской платформы; 10 – переходная зона между мантийными блоками Уральского орогена и Западно-Сибирской платформы; 11 – предполагаемые нижнекоревые границы и граница Мохо, по данным ГСЗ (K<sub>3</sub>, K<sub>4</sub>, K<sub>5</sub>, M); 12 – нижняя граница интенсивных отражений, по данным МОВ-ОГТ; 13 – граница Мохо, по данным МОВЗ; 14 – глубинные отражающие границы элементы, по данным МОВ-ОГТ; 15 – предполагаемые флюидонасыщенные области, по данным МТЗ.

Усл. обозн. см. на рис. 1, 6

нём (7,92–7,94 км/с) близки к скоростям в Восточноевропейском домене, и он имеет самую низкую из всех доменов электропроводность. Западносибирский домен (М3) более однороден, он характеризуется высокими скоростями сейсмических волн (8,10 км/с) и повышенной электропроводностью. Между последними двумя доменами располагается переходная зона, предположительно имеющая крутое западное падение и мощность 20–25 км.

**Обсуждение природы и возраста глубинных сейсмических границ в земной коре.** Следует отметить, что сейсмические разрезы по профилю, полученные разными методами, во многом отличаются друг от друга. Разрез МОВ-ОГТ в основном показал тонкую структуру осадочного чехла, а также структуру верхней и средней консолидированной коры, разрез МОВЗ (западная часть трансекта) – обзорную структуру глубинных горизонтов земной коры и верхней мантии, а разрез ГСЗ – скоростную модель строения коры и верхней мантии.

Субгоризонтальные отражающие горизонты осадочного чехла и наклонные отражатели преимущественно тектонической природы в пределах открытого Урала, хорошо выраженные на разрезе МОВ-ОГТ, практически никак не отобразились на разрезах ГСЗ и МОВЗ. Более того, в складчато-надвиговой области Западного Урала все системы отражателей различного, в том числе крутого падения, и все объекты различной глубины залегания и возраста пересекаются на глубине 3–6 км практически горизонтальной границей F (рис. 3, а). Получается, что эта граница не имеет ничего общего со структурой верхней части разреза, а скорее всего отображает реакцию среды на изменение РТ условий с глубиной [4, 12]. Похожая картина складывается и на более значительных глубинах, в том числе на уровне границы  $K_1$ , обычно соответствующей положению внутрикорового отделителя на Урале. Хотя в средней и нижней коре, как правило, отсутствуют крутонаклонные отражающие границы, но и здесь в большинстве случаев субгоризонтальные границы ГСЗ секут пологонаклонные отражающие границы или области смены отражательности, фиксируемые на разрезе МОВ-ОГТ. Сопоставление материалов ГСЗ и МОВЗ тоже свидетельствует о том, что границы ГСЗ более пологие, чем границы МОВЗ, хотя отождествление, прослеживание, а тем более геологическая идентификация границ МОВЗ всегда бывает в большой мере гипотетической.

В восточной части разреза МОВ-ОГТ на пикетах 170–270 км в интервале глубин 20–35 км выделяется интенсивно отражающий объект с отчетливо прослеживаемой нижней кромкой, который сопоставляется с высокопроводящей областью, выделяющейся на геоэлектрическом разрезе. Можно ли нижнюю границу этого объекта ( $M_0$  на геолого-геофизическом разрезе) считать границей между корой и мантией, т. е. границей Мохоровичича? Анализ данных ГСЗ показывает, что граничная скорость по границе  $K_3$ , выделенной в непосредственной близости к отражающей границе  $M_0$ , равна 6,95 км/с, что является низким значением для граничной скорости по границе М (обычные величины 7,8–8,2 км/с), т. е. границу  $M_0$  нельзя интерпретировать как подошву коры. По отношению к другим границам, «отбиваемым» по данным ГСЗ, граница  $M_0$  находится по крайней мере на

10 км выше кровли переходной зоны кора–мантия (границы  $K_4$  и  $K_5$  со значениями граничных скоростей 6,99–7,13 км/с и 7,56–7,71 км/с) и на 15 км выше границы Мохоровичича (граница М на разрезе). Примечательно, что граница Мохо надёжно прослеживается по данным ГСЗ (хотя и имеет относительно низкую граничную скорость 7,89–7,94 км/с под Восточноевропейским и Уральским доменами), но не фиксируется по данным МОВ ОГТ.

Впрочем, говорить о глубине залегания или морфологии границы Мохоровичича сугубо по данным метода МОВ-ОГТ, как это делается многими отечественными и зарубежными исследователями, скорее всего неправомерно, так как, во-первых, этот метод не позволяет определять скорости (скачок скоростей) на таких глубинах, а ведь граница Мохо по классическому определению является именно скоростной. Во-вторых, границы МОВ, фиксируемые в нижней части коры в разных частях земного шара, часто не совпадают с границей Мохо, построенной по данным ГСЗ. Наличие таких границ в нижней коре на Полярном Урале (в частности, границы  $M_0$ ) позволяет расширить вывод, сделанный ранее для подошвы земной коры на Среднем Урале [9], о том, что, по-видимому, в таких динамически нестабильных областях, как Урал, докритические отражённые волны (метод МОВ-ОГТ) больше характеризуют стабильную, «стационарную» составляющую разреза, в то время как закритические отражённые и преломленные волны (метод ГСЗ) более чутко реагируют на динамические изменения строения и состояния среды.

В частности, сопоставление материалов глубинного МОВ-ОГТ и ГСЗ позволяет, по крайней мере на качественном уровне, оценить положение разновозрастных границ Мохо на Урале, развивая идею Н. И. Павленковой о возможности одновременного прослеживания как более «древней», так и более «молодой» границы Мохо в некоторых регионах планеты [7]. Мощная (до 15 км) переходная зона между корой и мантией с геофизическими параметрами, промежуточными между коровыми и мантийными, на Полярно-Уральском трансекте имеет как минимум двухслойное строение. С позиций идеи о разновозрастных границах Мохо можно предположить, что в границах  $K_4$ ,  $K_5$  «отпечаталось» положение границы Мохоровичича разных эпох геотектонической стабилизации. В этом случае отчётливая граница  $M_0$ , полученная по докритическим отражениям (и близкая к ней граница  $K_3$ , полученная по закритическим отражениям и преломленным волнам), может соответствовать ещё более древнему, чем для границ М,  $K_4$ ,  $K_5$ , положению границы Мохо.

Субгоризонтальное залегание границы Мохоровичича, по данным ГСЗ, на глубинах 52–55 км для Предуральского и Восточно-Уральского сегментов на Полярном Урале аномально по сравнению с Южным и Средним Уралом, где глубина Мохо составляет 40–45 км. Более того, отсутствует видимое погружение границы Мохоровичича под область как палеозойского, так и мезозойско-кайнозойского орогена, хотя на Южном и Среднем Урале амплитуда такого погружения достигает 10–15 км. Максимум такого погружения («корней гор») на Южном и Среднем Урале в плане тяготеет больше к границам палеозойского, чем кайнозойского орогена, а само погружение кровли мантии, возмож-

но, вызвано наличием не только гор, но и крупных тяжелых палеостроводужных блоков в коре.

Что касается границ на разрезе МОВЗ, то проявляется их закономерное погружение в подошве земной коры (в том числе границы  $M_{\text{МОВЗ}}$ , наиболее близкой к границе Мохо) от Предуральского прогиба к осевой части Урала (с 40 км до 58 км), что согласуется с поведением подобных границ на Среднем Урале на профиле МОВЗ Арти-Байкалово [3]. К сожалению, как уже отмечалось, наблюдения МОВЗ были проведены лишь на западной половине Полярно-Уральского трансекта, и, тем не менее, можно говорить, что максимального погружения границы МОВЗ на Полярном Урале (как и границы ГСЗ на Южном и Среднем Урале) достигают не под современными Уральским хребтом, а существенно восточнее него, тем самым отображая «корни гор» палеозойского орогена (включающего крупные блоки тяжелых мантийных и коровых островодужных и океанических пород).

**Выводы.** Проведённые комплексные геолого-геофизические исследования показали существенные отличия глубинного строения земной коры в области Полярно-Уральского трансекта от подобных пересечений, выполненных ранее на Южном и Среднем Урале. Одним из объяснений этих отличий, на наш взгляд, может быть расположение Полярно-Уральского трансекта в пределах субширотной Собской зоны мезозойско-кайнозойской тектоно-магматической активизации. По-видимому, в пределах этой структуры происходят активные процессы мантийно-корового взаимодействия, что и фиксируется геофизическими методами: низкие скорости сейсмических волн в мантии, «расплывчатость» границы Мохо, наличие мощной многослойной переходной корово-мантийной зоны, отсутствие погружения преломляющей границы Мохо под ороген. Наиболее низкие значения скоростей сейсмических волн наблюдаются в области границы мантийных блоков основания Урала и Западно-Сибирской плиты. Можно интерпретировать эту структуру как зону повышенной проницаемости и миграции мантийных флюидов, что косвенно подтверждается присутствием над ней на глубинах 10–20 км зоны высокой электропроводности (по данным МТЗ), возможно, вызванной насыщенностью горных пород флюидами.

Рисунок отражающих площадок на геофизических разрезах подтверждает широкое развитие тектонических покровов. Главные структуры Уральской аккреционно-складчатой системы, включая террейновые ансамбли, находятся в аллохтонном залегании, т. е. представляют собой сорванные бескорневые структуры. В восточной части профиля под чехлом мезозойско-кайнозойских отложений идентифицируются фрагменты Восточно-Уральского гетерогенного микроконтинента (Восточно-Уральской мегазоны), представленные метаморфическими блоками (Северо-Сосьвинским и Полуйским), разделяемыми вулканитами Гортской синформы.

Подобно Среднему Уралу, на Полярно-Уральском трансекте проявляется срезание сместителей зоны Главного Уральского разлома шовной зоной западного падения. Граница мантийных блоков Западно-Сибирской плиты и Урала, вероятно, также имеет западное падение, но в отличие от Среднего Урала перехода ее в коровую шовную зону не

наблюдается, что можно объяснить субгоризонтальным смещением коровых блоков относительно мантии.

Впервые достаточно уверенно определено структурное положение Харбейского антиклинория. По комплексу геологических и геофизических данных, харбейские гнейсы и амфиболиты слагают блок среднекоровых метаморфических пород, надвинутый на глубокоководные палеозойские осадки Зилаиро-Лемвинской СФЗ (или лемвинские карбонатно-кремнисто-терригенные отложения под Харбейский блок?). Метаморфиты Харбейского антиклинория характеризуются повышенной плотностью (в среднем 2,86 г/см<sup>3</sup>), что отличает их от предположительно менее плотных пород фундамента Лемвинского аллохтона (2,80–2,81 г/см<sup>3</sup>).

Как и на других уральских трансектах [1, 9], земная кора на Полярном Урале имеет бивергентный облик, в западной части разреза преобладают разрывные нарушения с восточным падением, в восточной — с западным.

Впервые расшифрована тектоническая архитектура Северо-Сосьвинского антиклинория и Гортского синклиория, перекрытых чехлом мезозойско-кайнозойских отложений. Северо-Сосьвинский антиклинорий представляет собой блок-террейн, вероятно, сложенный метаморфическими породами и тектонически перекрываемый офиолитами Войкарской и Гортской синформ. С запада он ограничен Войкарским террейном и сместителями Главного Уральского разлома, с востока — корневой шовной зоной Гортского аллохтона. Гортский синклиорий, по-видимому, представляет собой тектонически фрагментированный реликт достаточно крупного палеобассейна, комплексы которого были надвинуты на соседние Северо-Сосьвинский и Полуйский террейны. Можно предположить, что вулканы Ангальско-Березовской СФЗ были сформированы над зоной субдукции с западным падением, унаследованным коллизионной шовной зоной.

По результатам исследований на Полярно-Уральском трансекте в 2010 г. на пикете трансекта 250 км (ПК МТЗ № 272) начато бурение Янгиюганской параметрической скважины. Проектная глубина скважины 4000 м. Основная задача — выяснение природы и флюидонасыщения зоны повышенной электропроводности, связанной с областью высокой отражательности и проводимости в средней коре.

1. Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект «Уралсейс») / Ред. А. Ф. Морозов. — Тверь: Изд-во ГЕРС, 2001. — 286 с.

2. Душин В. А. Геодинамика, магматизм и минерализация Уральского Севера // Геодинамика, магматизм, метаморфизм и рудообразование: Сб. науч. трудов. — Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. — С. 121–134.

3. Дружинин В. С., Каретин Ю. С., Дьяконова А. Г. и др. Комплексные геофизические исследования литосферы Среднего Урала по Артинскому профилю // Отечественная геология. 2003. № 1. — С. 65–73.

4. Иванов С. Н. О реологических моделях земной коры: критическое рассмотрение. — Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 1999. — 40 с.

5. Куликов В. А., Яковлев А. Г. Глубинная геоэлектрическая модель Полярного Урала // Электронное научное издание «ГЕОразрез» ISSN 2070-0768. 2008. № 2. — 20 с.

6. Кашубин С. Н. Методика анализа физических свойств горных пород при региональных сейсмических

исследованиях (на примере Тагильско-Магнитогорского прогиба) // Геофизические методы поисков и разведки рудных и нерудных месторождений. — Свердловск, 1984. — С. 83–91.

7. Павленкова Н. И. Развитие представлений о сейсмических моделях земной коры // Геофизика. 1996. № 4. — С. 11–19.

8. Рыбалка А. В., Петров Г. А., Кашубин С. Н., Юхлин К. Среднеуральский трансект ESRU // Строение и динамика литосферы Восточной Европы. — М.: ГЕОС, 2006. — С. 390–401.

9. Рыбалка А. В., Кашубина Т. В., Петров Г. А., Кашубин С. Н. Среднеуральский трансект: новые данные по глубинному строению Урала // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования: Материалы Междунар. науч.-практич. семинара. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. — С. 186–191.

10. Berzin R., Onken O., Knapp J. H. et al. Orogenic evolution of the Urals mountains: results from an integrated seismic experiment // Science. 1996. Vol. 274. — P. 220–221.

11. Kashubin S., Juhlin C., Friberg M. et al. Crustal structure of the Middle Urals based on reflection seismic data // Europ. Lithos. Dynamics / D. G. Gee, R. A. Stephenson (eds). Geological Society of London. Memoir. 2006. 32. — P. 427–442.

12. Petrov G., Rybalka A., Sviashina I. A. The present-day Urals mountains: do they result from an interaction of the European and Asian plates? // Joint meeting of URALIDES, GEORIFT, TESZ and SW-IBERIA Projects. Moscow, 2001. Abstracts. — P. 24.

13. Rybalka A., Petrov G., Kashubina T., Aniskin A. Crustal structure along the Polar-Urals transect, Russia, based on multidisciplinary deep seismic and integrated studies // 14th Intern. Symp. on Deep Seismic Profiling of the Continents and their Margins. Cairns. Geosci. Australia, 2011. — P. 103.

*Рыбалка Александр Викторович* — начальник партии, ОАО «Баженовская геофизическая экспедиция». <avg@bge.ru>.

*Петров Георг Аскольдович* — канд. г.-м. наук, начальник партии, ОАО «Уральская геологосъемочная экспедиция». <GPetrov@ugse.ru>.

*Кашубина Татьяна Викторовна* — вед. геофизик, Центр глубинной геофизики ВСЕГЕИ. <Tatiana\_Kashubina@vsegei.ru>.

*Куликов Виктор Александрович* — канд. ф.-м. наук, главный геофизик, ООО «Северо-Запад». <vic@nw-geo.ru>.

*Егоркин Анатолий Васильевич* — канд. ф.-м. наук, руководитель группы, ГСЗ ГФУП «ВНИИГеофизика».

*Душин Владимир Александрович* — доктор г.-м. наук, зав. кафедрой, ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет». <grmpri.dep@ursmu.ru>.

*Кашубин Сергей Николаевич* — доктор г.-м. наук, директор, Центр глубинной геофизики ВСЕГЕИ. <Sergey\_Kashubin@vsegei.ru>.