

Научная статья

УДК 551.24:528(470+26)

doi:10.52349/0869-7892_2024_100_36-58

**Комплект карт глубинного строения
территории Российской Федерации
и ее континентального шельфа****Е. Д. Мильштейн, Е. А. Андросов,
С. Н. Кашубин, И. В. Кудрявцев**✉

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия,
Ivan_Kudryavtsev@karpinskyinstitute.ru✉

Ключевые слова: земная кора, консолидированная земная кора, кристаллическая земная кора, акустический фундамент, осадочный чехол, промежуточный структурный этаж

Для цитирования: Комплект карт глубинного строения территории Российской Федерации и ее континентального шельфа / Е. Д. Мильштейн [и др.] // Региональная геология и металлогения. 2024. Т. 31, № 4. С. 36–58. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2024_100_36-58

Original article

UDC 551.24:528(470+26)

doi:10.52349/0869-7892_2024_100_36-58

Keywords: Earth's crust, consolidated Earth's crust, crystalline Earth's crust, acoustic basement, sedimentary cover, metasedimentary complex

For citation: Deep structure maps of the Russian Federation and its continental shelf / E. D. Milshteyn [et al.]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2024;31 (4):36–58. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2024_100_36-58



© Е. Д. Мильштейн, Е. А. Андросов,
С. Н. Кашубин, И. В. Кудрявцев, 2024

Аннотация. В статье приводятся результаты обобщения глубинных геофизических исследований земной коры территории России и ее континентального шельфа в виде цифрового комплекта карт, содержащего карты мощности земной коры, мощности осадочного чехла, а также рельефа разновозрастного фундамента и его районирования на основе комплексного анализа аномальных потенциальных полей. Показаны возможности использования карт глубинного строения для геотектонических построений на примере Сибирского кратона и его складчатого обрамления. Представленный комплект карт оформлен как цифровой информационный ресурс (ГИС-проект), размещен на сайте ФГБУ «Институт Карпинского» и может служить основой для создания новых мелкомасштабных карт геологического содержания в рамках сводного и обзорного картографирования территории России и ее континентального шельфа.

**Deep structure maps of the Russian Federation
and its continental shelf****E. D. Milshteyn, E. A. Androsov,
S. N. Kashubin, I. V. Kudryavtsev**✉

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia, Ivan_Kudryavtsev@karpinskyinstitute.ru✉

Abstract. The paper summarizes the Earth's crust deep geophysical studies within the Russian territory and its continental shelf; the findings include a digital maps set containing the Earth's crust thickness map, sediments thickness map, as well as diachronous basement topographic map and basement area map by anomalous potential fields datasets. Deep structure maps are applicable for creating geotectonic maps, with the Siberian Craton and adjacent folded areas exemplified. The Karpinsky Institute's website locates the maps set designed as a digital information resource (GIS project); it can support the creation of new small-scale geological maps within the integrated and review mapping of the Russian Federation territory and its continental shelf.

ВВЕДЕНИЕ

Геолого-геофизические исследования земной коры на всю ее мощность по протяженным профилям-геотранверсам выполняются во всем мире и являются основным общепризнанным источником информации о глубинном строении недр. Результаты этих наблюдений формируют современные представления о связи глубинных и поверхностных геологических структур и непосредственно влияют на развитие фундаментальных представлений об эволюции земной коры [1; 2]. В России эти исследования носят системный характер. Первые наблюдения по отдельным профилям по методике глубинных сейсмических зондирований (далее — ГСЗ) были начаты на территории бывшего СССР в 1950–1960 гг. В период с 1972 по 1994 г. эти исследования выполнялись в том числе с регистрацией мирных ядерных взрывов и охватили почти всю страну по профилям общей протяженностью более 70 тыс. пог. км [3]. С 1995 г. работы по созданию Государственной сети опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин носят комплексный характер (наблюдения на профилях включают сейсмические методы ГСЗ, метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки (далее — МОБ-ОГТ) и магнитотеллурические зондирования) и выполняются в первую очередь

в районах, не охваченных ранее глубинными исследованиями: на Северо-Востоке России и прилегающих акваториях [4; 5] (рис. 1).

По мере расширения сети профилей ГСЗ стали предприниматься попытки создания на их основе карт, отражающих особенности глубинного строения территории страны. Первые карты рельефа поверхности Мохоровичича, мощности осадочного чехла и различных структурных и скоростных характеристик земной коры были построены в 1980–1990 гг. [6–8]. За последние десятилетия, как при создании Государственной сети опорных геолого-геофизических профилей, так и при создании комплектов карт ГК-1000/3, был накоплен большой объем данных по мощности земной коры и строению осадочного чехла [9], были составлены цифровые карты потенциальных полей для всей территории страны. Комплекты карт глубинного строения, включающие карты мощности земной коры, мощности осадочного чехла и типов земной коры, создавались также в рамках международных проектов на Циркумполярную Арктику, Северо-Восточную и Центральную Азию [10–12]. Однако по территории России, включая акватории в рамках внешних границ исключительных экономических зон, единый комплект карт глубинного строения до последнего времени не был составлен, в том числе из-за разного понимания одних и тех же терминов,

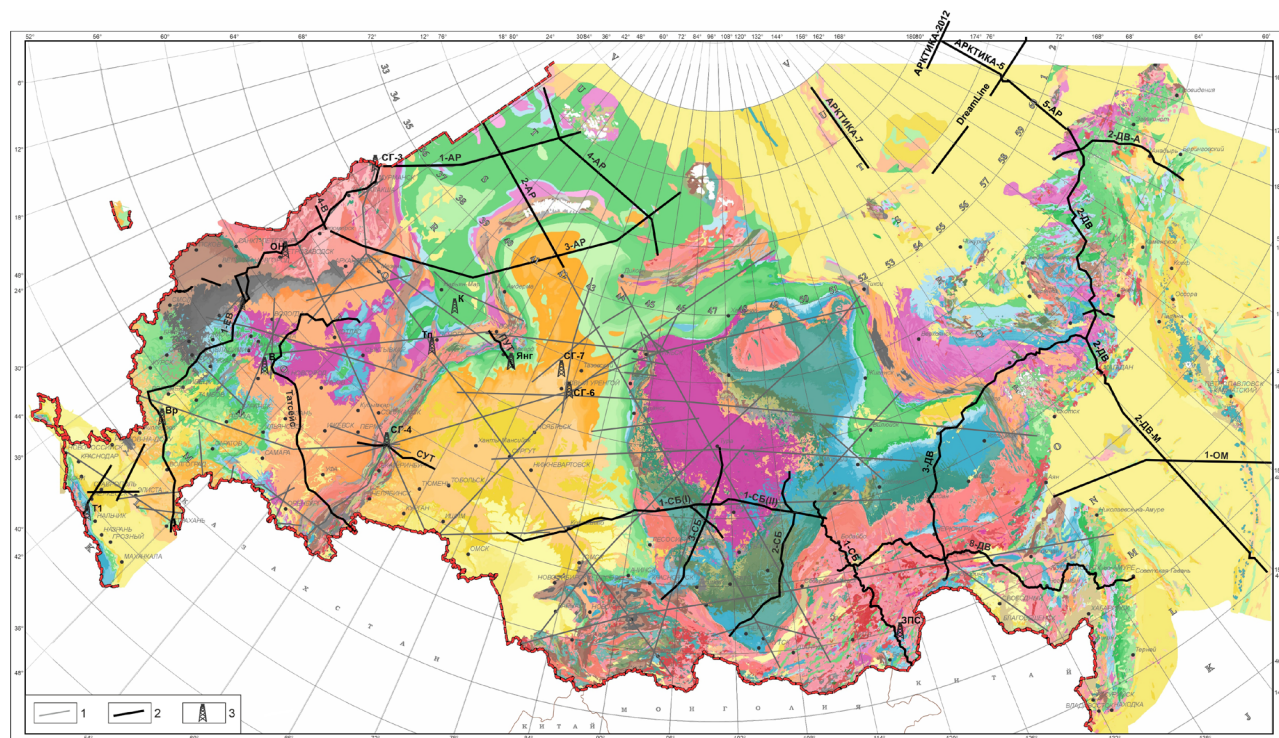


Рис. 1. Схема расположения опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин (по состоянию на декабрь 2021 г.)

1 — глубинные геофизические профили, выполненные многоволновой сейсморазведкой до 1995 г., 2 — опорные комплексные геолого-геофизические профили, выполненные в 1995–2021 гг. и их индексы, 3 — сверхглубокие и параметрические скважины

Fig. 1. Geotranssects, parametric and superdeep boreholes map (as of December 2021)

1 — geotranssects with multiwave seismic exploration before 1995, 2 — geotranssects in 1995–2021 and their indexes, 3 — parametric and superdeep boreholes

используемых и при картировании, и при описании глубинного строения.

В настоящей статье авторы дают определения основных терминов и понятий, используемых при описании глубинного строения, чтобы в дальнейшем избежать неоднозначности при геологической интерпретации; приводят краткие сведения об исходных данных, методике составления карт и их содержании; возможности их использования при тектонических построениях (на примере Сибирского кратона) и в завершение представляют информационный ресурс созданного комплекта карт глубинного строения [https://wega.vsegei.ru/site/gisatlas], который может быть успешно использован как при геологической интерпретации сводных мелкомасштабных карт, так и листов ГК-1000/3.

Основные термины и понятия. Обобщенная модель земной коры и осредненные физические параметры ее основных слоев (рис. 2) в совокупности с определением терминов [13–15], используемых при ее описании (табл. 1), позволяют сблизить понятийную базу, используемую при геологическом картировании поверхности и изучении глубинного строения.

Необходимо отметить, что кристаллическая кора на континентах, как правило, делится на верхнюю и нижнюю, в некоторых регионах в ее пределах выделяют также среднюю, а на границе земной коры и верхней мантии — переходный слой [1; 2].

Однако из-за того, что эти элементы в разрезах прослеживаются не повсеместно и не всегда надежно, при построении сводных карт на большие

Основные границы		Основные слои	Vp (км/с)	σ (г/см ³)
Земная кора	Осадки	Осадочный чехол	2.0 – 4.5	1.80 – 2.40
	Консолидированная земная кора	Акустический фундамент	4.5 – 5.8	2.45 – 2.60
		Промежуточный структурный этаж		
Мантия	Граница М	Кристаллическая кора	6.0 – 7.2	2.62 – 3.05
		Верхняя Мантия	7.9 – 8.4	3.25 – 3.45

Рис. 2. Обобщенная модель континентальной земной коры и осредненные физические свойства ее основных слоев

Fig. 2. Summary model of the Earth's continental crust and generalized physical properties of the crustal main layers

территории их не используют. Также не везде между осадочным чехлом и кристаллической корой выделяется промежуточный структурный этаж. В случае, когда он отсутствует, «фундамент» и «акустический фундамент» совпадают. При обобщении информации о мощности осадочного чехла в регионах, где выделяется промежуточный структурный этаж, иногда у геологов возникает вопрос, куда его относить — к низам осадочного бассейна (как это чаще всего

Таблица 1

Основные термины и понятия

Table 1. Basic terms and concepts

Термин	Определение
Акустический фундамент	Сейсмический горизонт, ниже поверхности которого не регистрируются (либо проявлены крайне слабо) регулярные протяженные отраженные сейсмические волны
Граница Мохоровичича	Сейсмическая граница, названная в честь выявившего ее сербского сейсмолога А. Мохоровичича, характеризующаяся скачкообразным увеличением скоростей продольных сейсмических волн от 6,8–7,2 до 7,9–8,2 км/с и отождествляемая с подошвой земной коры
Земная кора	Верхняя оболочка твердой Земли, выделяемая на основании различных критериев, включающих сейсмические скорости, плотность и состав
Консолидированная земная кора	Толща земной коры за вычетом осадочного чехла
Кристаллическая земная кора	Нерасчлененный комплекс метаморфических и интрузивных горных пород, залегающий между фундаментом и подошвой земной коры
Мантия	Оболочка твердой Земли, расположенная между земной корой и ядром Земли
Осадочный чехол	Комплекс осадочных, неметаморфизованных горных пород, пологозалегающих в виде сплошного покрова на более консолидированном основании
Промежуточный структурный этаж	Комплекс дислоцированных и/или слабометаморфизованных осадочных и вулканогенно-осадочных пород, отделенных от осадочного чехла региональным несогласием
Фундамент	Жесткое основание платформы или осадочного бассейна, поверхность кристаллической земной коры, консолидированной в эпоху, предшествующую осадконакоплению

делается, например, в Западной Сибири, где с этим этажом связывают перспективы нефтегазоносности) или считать его принадлежностью кристаллической коры. Ответ на этот вопрос дает рис. 2, на котором показано, чем отличаются понятия «кристаллическая» и «консолидированная» кора.

Для региональных обобщений целесообразно использовать повсеместно выделяемые на глубинных сейсмических разрезах главные разделы сред — подошву земной коры (граница Мохоровичича (далее — Граница М)) и подошву осадочного чехла. Сейсмические данные в совокупности с данными рельефа и поля силы тяжести позволяют построить площадное распределение (карты) этих границ — глубину залегания подошвы земной коры (Границы М) и осадочного чехла (рельеф разновозрастного фундамента). Производными этих карт являются карты мощности: земной коры, осадочного чехла и консолидированной земной коры.

Граница М и мощность земной коры. Граница М, рассматриваемая как принципиальный раздел двух сред — земной коры и верхней мантии, является основным объектом картирования при глубинных исследованиях [16]. Именно положение этой границы определяет деление на два принципиальных различных типа — океаническую и континентальную коры. Оценка положения Границы М основывается в первую очередь на данных ГСЗ, и обеспеченность территории этими данными определяет масштаб всего комплекта карт глубинного строения. Мощность земной коры — производная карты глубины Границы М — является одним из основных параметров при выделении широкого спектра типов земной коры [17; 18].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Карта глубины Границы Мохоровичича. Общий объем профильных и точечных данных ГСЗ, которые были использованы для построения карты рельефа Границы М России, составляет порядка 150 тыс. пог. км. Размещение профилей по площади не равномерное: расстояние между глубинными сейсмическими профилями меняется от 150 до 1500 км. Если принять за достоверные данные полосу вдоль профиля шириной 80 км, то мы получим следующую картину (рис. 3). На территории Европейской части России, Западной и Восточной Сибири площади, охваченные глубинными сейсмическими исследованиями, достигают 45–50 %. Территория Дальнего Востока освещена на 13 %, а прилегающие акватории Северного Ледовитого и Тихого океанов на 16 и 30 % соответственно.

Это свидетельствует о том, что построение даже мелкомасштабной современной цифровой карты (сеточной модели) рельефа Границы М без привлечения дополнительных данных не представляется возможным. Для решения этой проблемы помимо сейсмических данных были использованы многомерные корреляционные зависимости между глубиной Границы М, осредненными значениями аномалий

поля силы тяжести и рельефом дневной поверхности (дна акваторий), созданные ранее [9].

Построение карты рельефа Границы М включало три основных этапа. Первый этап — расширение (дополнение) ранее созданной [8; 18; 19] базы сейсмических данных по глубинным профилям общей протяженностью более 8 тыс. пог. км. Второй этап — заполнение межпрофильного пространства на основе многомерных корреляционных зависимостей по оценке глубины Границы М [19]. Третий этап — построение предварительной сеточной модели (шаг 5×5 км) с последующей корректировкой по результатам сравнения (рис. 4) с сейсмическими данными по профилям.

С учетом погрешностей определения глубины Границы М по сейсмическим данным и корреляционным уравнениям, а также исходя из детальности исходных данных, корректная визуализация итоговой карты соответствует масштабу 1 : 10 000 000 с шагом основных изогипс 4 км и дополнительных 2 км (рис. 5, а). Карта мощности земной коры (рис. 5, б) представляет собой разность сеточных моделей высот рельефа суши, дна акваторий и глубины Границы М и сохраняет параметры визуализации карты рельефа Границы М: шаг основных изогипс — 4 км, дополнительных — 2 км.

Мощность земной коры территории России и сопредельных акваторий изменяется в широких пределах — от 6 до 60 км. Распределение мощности земной коры имеет сложное мозаичное строение, что не мешает выявить некоторые региональные закономерности. Основной тенденцией, которая уже отмечалась многими исследователями для континентов, является сокращение мощности земной коры в сторону океанов и утолщение ее под горными сооружениями. При этом переход от суши в направлении морей пассивной континентальной окраины Северного Ледовитого океана достаточно плавный и средний перепад мощности коры составляет порядка 4 км. Линейный характер областей пониженной мощности, наиболее яркими из которых являются Баренцевоморская, Лаптевоморская системы, свидетельствует, что основным процессом преобразования континентальной коры являлся рифтогенез. Противоположный характер наблюдается в отношении восточных морей, где переход суша–море фиксируется градиентной зоной с амплитудой 10 км и выше, а снижение мощности коры в задуговых бассейнах относительно берега составляет более 20–24 км.

В пределах суши выделяются четыре крупные субизометричные области: Европейская, Западно-Сибирская, Восточно-Сибирская и Северо-Восточная. Наиболее узкий диапазон изменения мощности коры (порядка 10 км) характерен для Западно-Сибирской области, в то время как в трех других он возрастает практически в 2 раза (порядка 20 км).

Рельеф разновозрастного фундамента и мощность осадочного чехла. Осадочный чехол уверенно отождествляется на сейсмических разрезах по характеру сейсмической записи и по значениям скоростей упругих волн, поэтому сейсмические методы играют ведущую роль при изучении осадочного

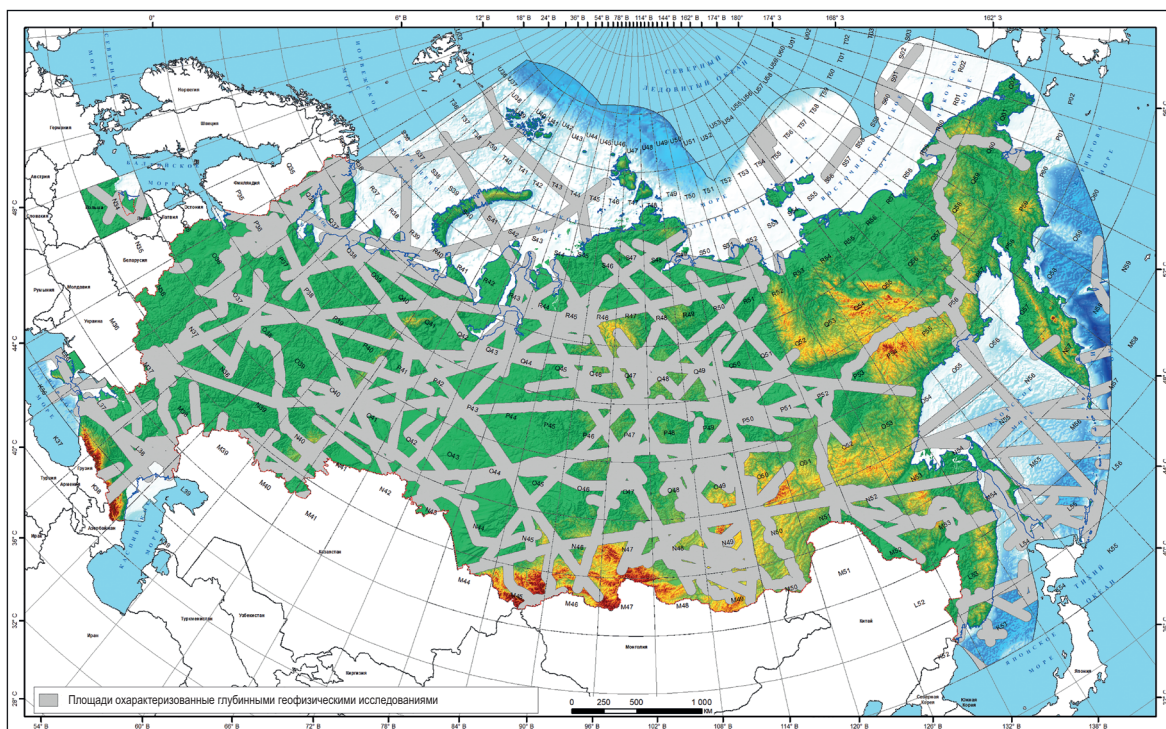


Рис. 3. Обеспеченность карты мощности земной коры России глубинными сейсмическими исследованиями

Fig. 3. Spatial coverage of deep seismic sounding datasets in the Earth's crust thickness map

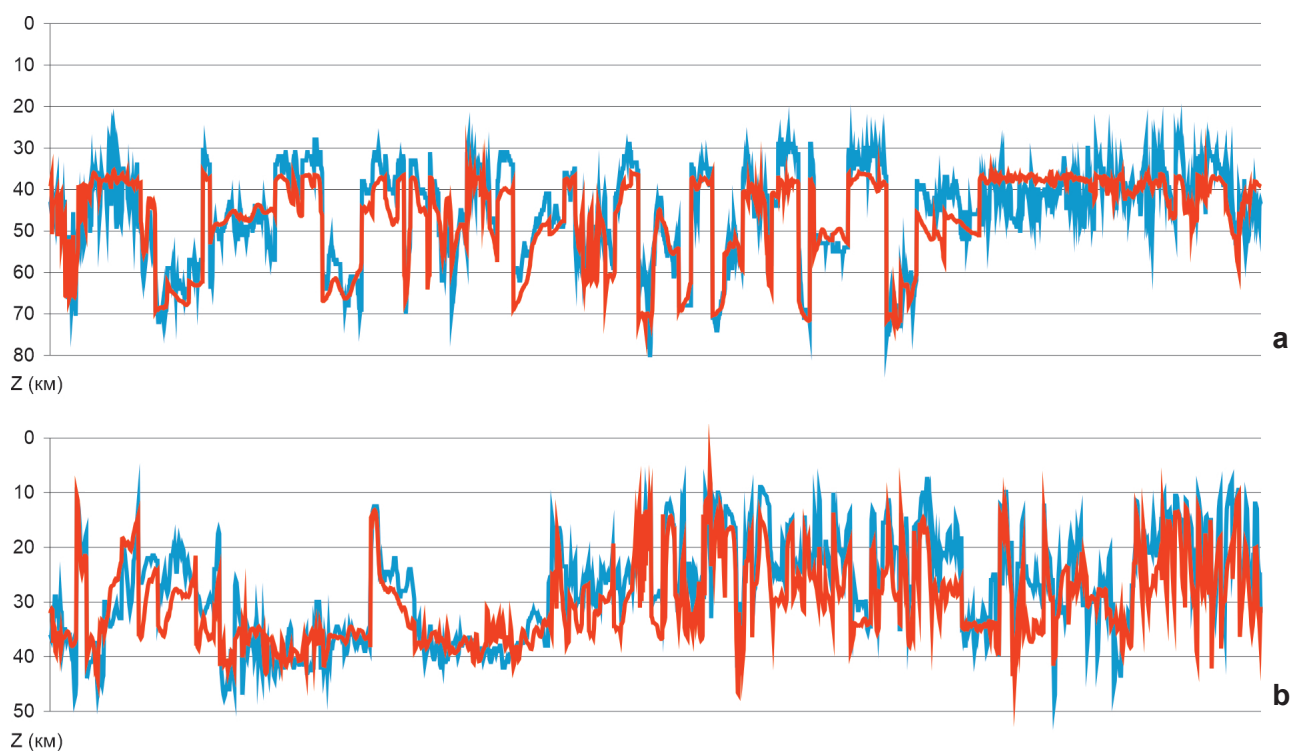


Рис. 4. Сравнение оценки положения глубины границы Мохоровичича по многомерным корреляционным зависимостям и сейсмическим данным

a — суша (3000 точек), *b* — море (1600 точек); голубой — сейсмические данные, красный — результат использования многомерных корреляционных зависимостей

Fig. 4. Comparison of Moho depth estimations by multivariate correlation dependencies and seismic data

a — onshore (3,000 estimation points), *b* — offshore (1,600 estimation points); blue — seismic data, red — estimations by multivariate correlation dependencies

чехла и, в первую очередь, это метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки. На сейсмических разрезах МОВ-ОГТ подошва осадочного чехла обычно фиксируется резкой сменой протяженных и субгоризонтально ориентированных осей синфазности (слоистая среда осадочного чехла) на штриховое, разноориентированное поле отражателей или полное прекращение регулярной сейсмической записи (высокогетерогенная консолидированная кора). Эта граница, индексируемая на разрезах МОВ-ОГТ как акустический фундамент, обычно совпадает со скоростной границей первого рода, выделяемой при наблюдениях методом преломленных волн (далее — МПВ), и соответствует резкому повышению скоростей продольных волн от значений меньших 3,5–4,0 до 5,0 км/с и выше. Как правило, по этим признакам и строится подошва осадочного чехла (поверхность фундамента) по сейсмическим данным.

Изученность территории сейсмическими методами крайне неравномерна. Основной объем сейсмических исследований МОВ-ОГТ сосредоточен в пределах нефтегазоносных провинций, где он превышает сотни тысяч погонных километров. В последнее десятилетие, в том числе в связи с работами по обоснованию границ расширенного континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане, значительно повысилась изученность этого региона. В Дальневосточной части наиболее полно изучены акватории Охотского и Японского морей и значительно менее — Берингова моря. Для всех нефтегазоносных и потенциально нефтегазоносных областей выполнены обобщения сейсмических данных в виде средне-мелкомасштабных аналоговых структурных карт. Значительный объем информации в виде цифровых карт был получен при создании ГК-1000/3 (97 номенклатурных листов). На протяжении многих лет создавались аналоговые (реже цифровые) карты рельефа разновозрастного фундамента по надрегиональным структурам, таким как Восточно-Европейская и Сибирская платформы, Западно-Сибирская плита [20; 21]. В последнее десятилетие, в рамках двух международных проектов, были созданы сеточные модели мелкомасштабных карт по Циркумполярной области, Северной, Центральной и Восточной Азии [10–12]. Все эти материалы были положены в основу компилятивной карты рельефа разновозрастного фундамента.

Карта рельефа фундамента. Разнородность базовых материалов по созданию компиляционной карты рельефа разновозрастного фундамента определила трехэтапность ее формирования.

На первом этапе был сформирован единый цифровой массив изогипс разновозрастного фундамента: преобразование аналоговых карт в цифровые, приведение всех материалов к единой системе координат. Второй этап, наиболее важный и трудоемкий — увязка ранее полученных материалов в областях сочленения. За базовые были приняты фрагменты карт международных проектов, охватывающие территорию России и сопредельные акватории. Этот массив данных уточнялся на основе

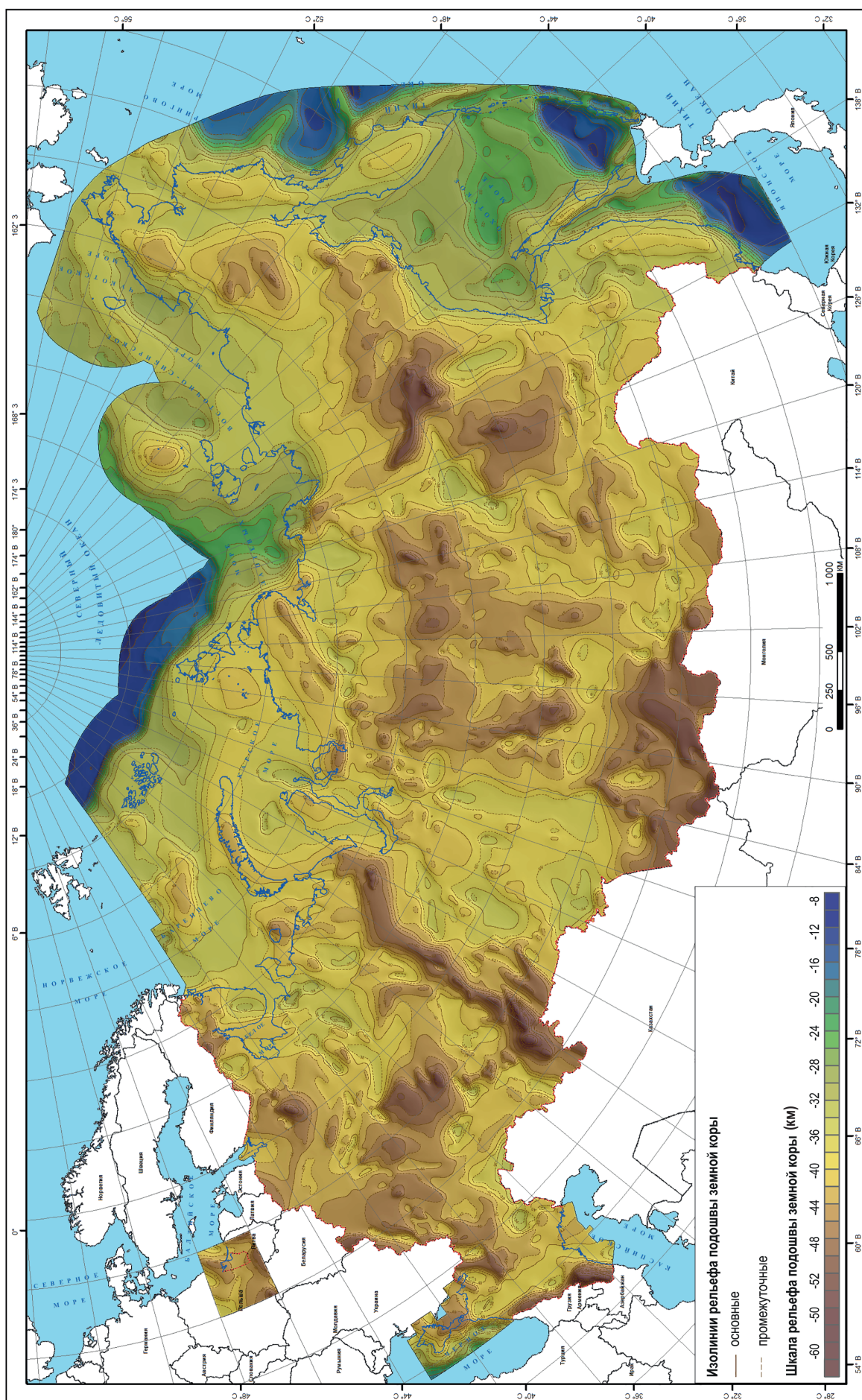
детальных построений по отдельным регионам, включая соответствующие материалы комплектов ГК-1000/3. При увязке и редактировании приоритет отдавался более новой и детальной информации, также учитывались особенности геологического строения и характер потенциальных полей. Заключительный, третий этап — создание сеточной модели карты с шагом 5 × 5 км.

Наибольшие проблемы в увязке данных были в регионах: в области сочленения Сибирской платформы с Западно-Сибирской плитой и Енисейско-Хатангском мегапрогибе. Для решения данной проблемы в анализ были включены сейсмические разрезы по данным МОВ-ОГТ и ГСЗ (Южсибгеоис-1 и Батолит-1-СБ-2006, «Метеорит» и др.). В результате анализа ниже подошвы мезозойского чехла по характеру структуры волнового поля МОВ-ОГТ и скоростным параметрам (ГСЗ) были выделены пачки, характерные для домезозойского чехла Сибирской платформы, которые были включены в общий объем осадочного чехла Западно-Сибирской плиты и Енисейско-Хатангского мегапрогиба в зоне их сочленения с Сибирской плитой.

Несмотря на большой объем сейсмических данных и данных бурения, высокую детальность используемых материалов по отдельным регионам, сводная карта рельефа разновозрастного фундамента как элемент комплекта представлена в масштабе 1 : 10 000 000 с шагом основных изогипс 1 км и дополнительных 0,5 км (рис. 6, а). Карта мощности осадочного чехла (рис. 6, б) является производной и создана путем вычитания сеточной модели рельефа разновозрастного фундамента из сеточной модели современного рельефа (включая батиметрические данные по акваториям) и сохраняет параметры визуализации исходной карты. Цветовая шкала карт (от желтого к рыжему) отражает, соответственно, погружение фундамента и увеличение мощности осадочного чехла; области отсутствия осадочного чехла отмечены серым тоном («псевдорельеф»).

Мощность осадочного чехла изменяется в существенных пределах — от 0 до 24 км. На суше нулевые значения соответствуют щитам древних платформ и фанерозойским орогенным областям (поясам). Наиболее обширные области последних сосредоточены на Северо-Востоке России. Прилегающие акватории характеризуются резко повышенной до аномально высокой мощностью осадочного чехла.

Три крупнейшие структуры территории России — древние Восточно-Европейская, Сибирская платформы и разделяющая их молодая Западно-Сибирская плита — принципиально различаются характером распределения мощности осадочного чехла. Восточно-Европейская платформа в целом характеризуется маломощным осадочным чехлом (менее 3 км), на фоне которого выделяются системы относительно узких грабенов, в которых мощность достигает 6–7 км (Мезенская синеклиза и линейные прогибы по периферии Тимано-Печорской плиты). Аномальная мощность осадков фиксируется в Прикаспийской впадине (до 24 км) и Предуральском краевом прогибе (10–13 км). Для Сибирской платформы характерны крупные структуры с мощным



а

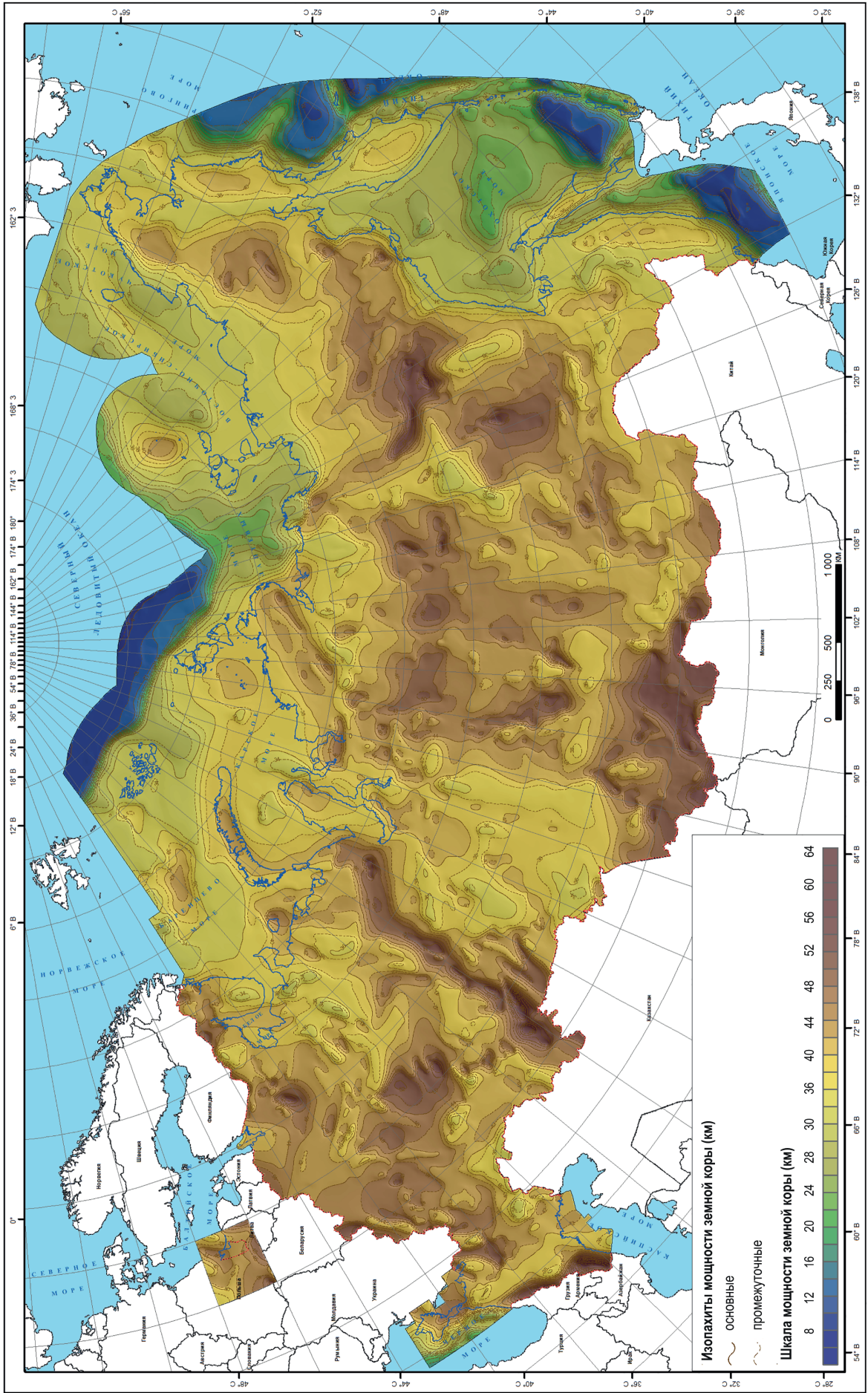


Рис. 5. Карты: *a* — глубины залегания границы Мохоровичича (подшвы земной коры), *b* — мощности земной коры (Russia and adjacent water areas)
Fig. 5. *a* — Moho depth map (bottom of the Earth's crust), *b* — Earth's crust thickness map (Russia and adjacent water areas)



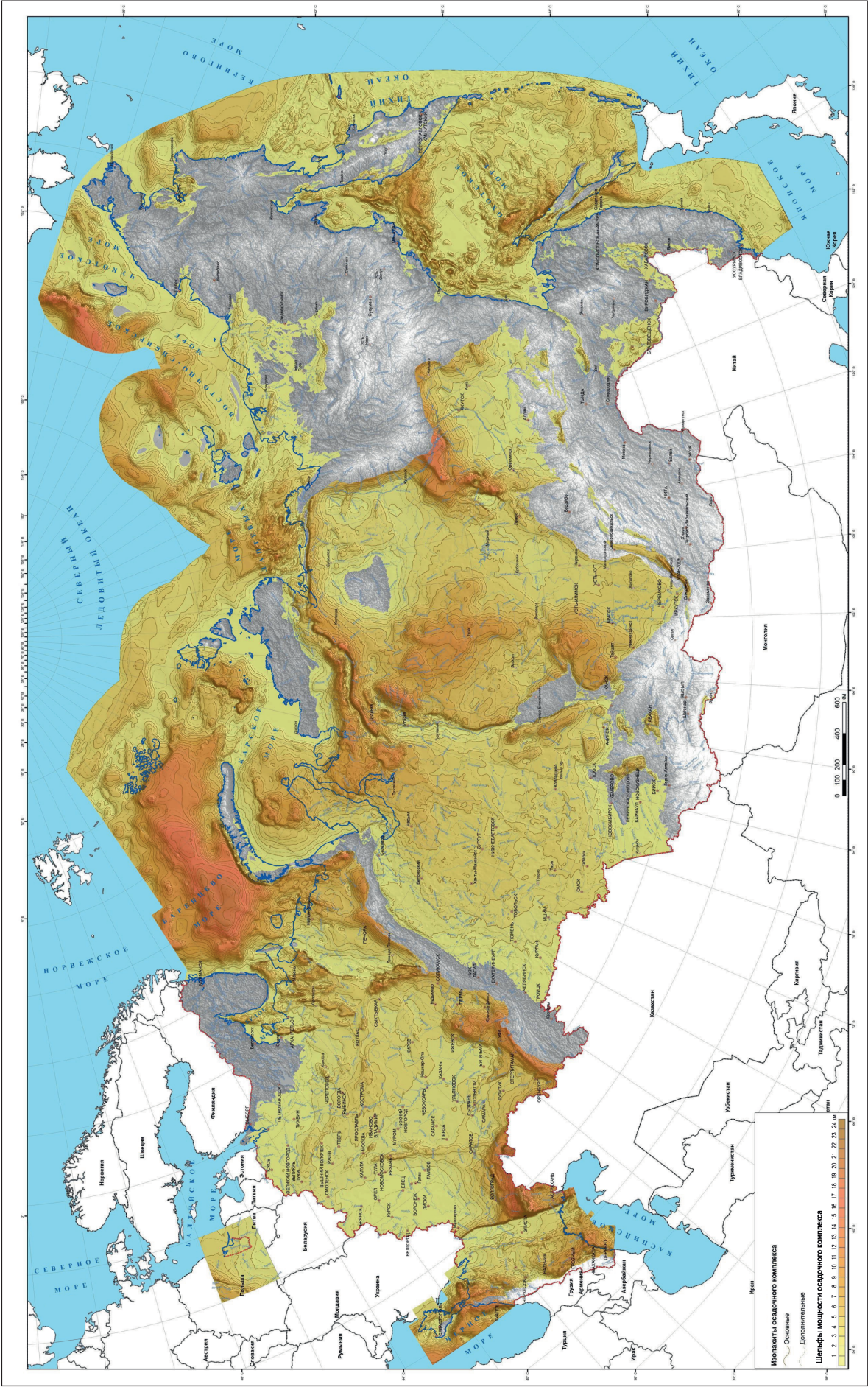


Рис. 6. Карты: *a* — рельефа разновозрастного фундамента, *b* — мощности осадочного чехла
Fig. 6. *a* — Diachronous basement topographic map, *b* — sediments thickness map

осадочным чехлом: Вилуюнская, Тунгусская, Присаяно-Енисейская синеклизы, Енисей-Хатангский мегапрогиб и Приверхоянский краевой прогиб, где мощность осадков достигает 10–15 км. Относительно небольшие мощности (менее 2–4 км) характерны для Западно-Сибирской плиты, при плавном увеличении до 6 км в северо-восточном направлении, где при приближении к Енисейско-Хатангскому мегапрогибу они резко возрастают, достигая 10–13 км.

Существенно отличается осадочный чехол морей Северного Ледовитого океана и восточных морей. В первом отмечается целый ряд крупных бассейнов (Южно-Карский, Северо-Карский, Лаптевоморский) с мощностью осадочного чехла более 8–10 км и крупнейший субмеридиональный Баренцевоморский бассейн, в котором средняя мощность превышает 8 км и достигает 20 км. Структуру осадочного чехла восточных морей в основном можно охарактеризовать как «мелко мозаичную» — множество относительно локальных впадин с мощностью 3–5 км и несколько относительно крупных бассейнов с мощностью, не превышающей 8–10 км.

Мощность консолидированной земной коры. Сеточная модель (5 × 5 км) карты мощности консолидированной земной коры (рис. 2 и табл. 1) является разностью между сеточными моделями мощности земной коры и осадочного чехла. В цифровом виде карта представлена в масштабе 1 : 10 000 000 с шагом изопахит 4 км (рис. 7).

Схема районирования разновозрастного фундамента. При современных геодинамических построениях необходимо учитывать не только районирование поверхностных структур, но и информацию о строении всей земной коры [9; 11; 12; 22; 23]. Целевым назначением представленной схемы является выделение аномальных объектов трех рангов на уровне фундамента на основе анализа структурных особенностей поля силы тяжести и аномального магнитного поля ΔT_a в совокупности с особенностями глубинного строения территории. Помимо того, что роль строения фундамента неоспорима в оценке истории развития любой тектонической структуры, выбор данного уровня земной коры позволяет соблюсти основополагающие принципы тектонического районирования «однородности описания» [24] как в отношении территорий, перекрытых осадочным чехлом (около 75 %), так и областей с выходом складчатого (кристаллического) фундамента на поверхность. Успешное решение аналогичных задач для крупных регионов убедительно демонстрируют работы предшественников как в акваториальной части, так и на суше [25; 26].

Использование сеточных моделей как потенциальных полей, так и основных разделов земной коры (рельеф фундамента и Границы М) позволило создать широкий спектр трансформаций, в первую очередь «геологическую редукцию» поля Δg , исключая влияние осадочного чехла и существенной неоднородности мощности земной коры. Помимо этого, при создании схемы был использован широкий спектр «традиционных» трансформант: спектральное разложение потенциальных полей, TILT преобразования [27], различные типы классификаций.

Схема районирования строилась на тех же принципах, что были использованы в предшествующих работах [28; 29] — принципы тектонического районирования, сформулированные Ю. А. Косыгиным [24]. Районирование рассматривалось как совокупность методов разграничения пространства (в том числе в 3D варианте) в соответствии с выбранной систематикой тел (ранговостью), при соблюдении правил полного без остатка деления этого пространства, без пересечения границ и индивидуальности характеристик выделяемых элементов [30].

При оконтуривании площадей была принята следующая система ранжирования (в порядке убывания): аномальная провинция, аномальная область, аномальный район. С тектоническими таксонами принятая система сопоставляется следующим образом. Аномальные провинции, как правило, соответствуют древним платформам, молодым плитам, складчатым областям. В то же время в объем провинции могут входить крупные разновозрастные тектонические структуры, представляющие единый ряд становления консолидированной коры. Аномальные области соответствуют региональным структурам второго порядка, объединенным общей зональностью потенциальных полей, с единым или близким возрастом консолидации земной коры. Аномальные районы — совокупность аномалий потенциальных полей, характеризующая внутреннюю зональность аномальной области и соответствующая структурам фундамента с уникальной историей развития (формирования, преобразования последующими эндогенными процессами и т. д.).

Надрегиональными границами являются границы, разделяющие континентальный и океанический типы коры. На границе Тихоокеанской плиты она имеет конвергентный характер и соответствует современной зоне субдукции [18; 30], в Северном Ледовитом океане — это красная линия, соответствующая границе двух типов коры, образованная при раскрытии Арктического бассейна Циркумполярной Арктики [10; 17] с некоторыми уточнениями в южной части.

Пограничные пояса, разделяющие аномальные провинции (в первую очередь на сухопутной части схемы), являются принципиально новым элементом районирования глубинного строения. Выделение этих линейных элементов, соответствующих по своей значимости и протяженности провинциям, обязано, в первую очередь, современным опорным геолого-геофизическим профилям Государственной сети. Выделено три типа поясов (см. рис. 8). Первый тип (Уральский и Верхоянский пояса) разделяет внутриконтинентальные аномальные провинции — Восточно-Европейскую и Западно-Сибирскую, Восточно-Сибирскую и Верхояно-Колымо-Чукотскую и характеризуется повышенной мощностью коры, в том числе с линзами коро-мантийной смеси. Пояса первого типа имеют субмеридиональное простираение. Второй тип (Чукотско-Амурский пояс) простирается вдоль побережья Тихого океана, отделяет Верхояно-Колымо-Чукотскую и Амурскую провинции от Берингово-Япономорской провинции и отличается надрегиональной зоной пониженной



Рис. 7. Карта мощности консолидированной земной коры
Fig. 7. Consolidated Earth's crust thickness map

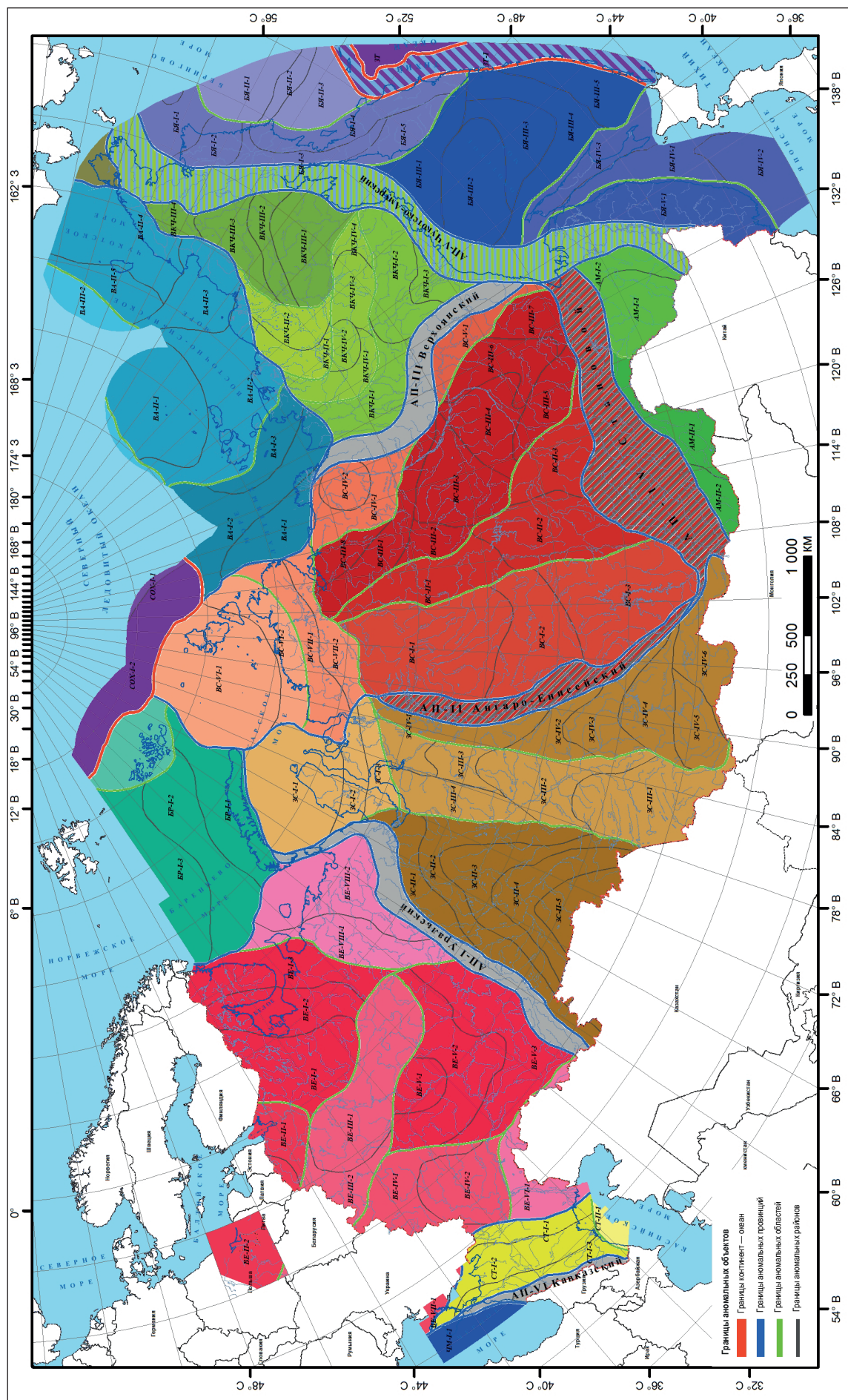


Рис. 8. Схема районирования фундамента на основе комплексного анализа потенциальных полей с учетом карт глубинного строения (список аномальных объектов — в табл. 2)
 Fig. 8. Basement area map by potential fields datasets, with deep structure maps included (refer to the list of anomalous objects in table 2)

мощности земной коры. Третий тип (Ангаро-Енисейский и Становой пояса) имеют сложное строение: на фоне преимущественно повышенной мощности земной коры выделяются участки пониженной мощности. Ангаро-Енисейский и Становой пояса являются пограничными между Сибирским кратоном и Центральнo-Азиатским подвижным поясом. Строение всех типов поясов изучено современными опорными геолого-геофизическими профилями.

Яркий образ поясов первого типа представлен двумя опорными профилями («Урсейс» и 3-ДВ) [31]. На глубинных геофизических разрезах отчетливо фиксируются области со специфическими характеристиками, постепенно погружающиеся на восток до глубины в 20 км. Глубинные данные позволяют с высокой степенью достоверности предполагать, что эти области являются краевыми зонами древних кратонов (Восточно-Европейского и Сибирского), погружающимися под смежные складчатые области на востоке. Фронт передовых надвигов сопредельных областей (Урало-Казахстанской и Верхояно-Колымской) молодых провинций (Западно-Сибирской и Верхояно-Колымо-Чукотской) фиксируется западнее проекции погруженного края кратонов на расстоянии до 150–200 км. В соответствии с этим выделены и оконтурены пояса первого типа: западная граница — фронт передовых надвигов, восточная — проекция погруженного края картонов.

Принципиально иной образ характерен для второго типа пограничных поясов: Чукотско-Амурский пояс представляет собой надрегиональную зону пониженной мощности консолидированной земной коры, которая разграничивает области с относительно повышенной мощностью. На севере пояс отчетливо фиксируется на геофизических разрезах опорного профиля 2-ДВ-А и разделяет Омолоно-Чукотскую и Корякско-Камчатскую области, на юге (профиль 8-ДВ) — Буреинскую и Сихотэ-Алинскую области, в центральной части сочленение между Верхояно-Колымской и Охотоморской областями представляет собой широкую зону градиентного понижения мощности земной коры между Верхояно-Колымо-Чукотской и Берингово-Япономорской провинциями, фиксируемую в зоне сочленения опорных профилей 2-ДВ и 2-ДВ-М [29]. Пояса в современной структуре занимают буферное положение между изометричными коллизионными областями континента с корой высокой мощности и линейными структурами переменной мощности обрамления Тихоокеанской плиты.

Наиболее сложное строение имеют пояса третьего типа (Ангаро-Енисейский и Становой). Относительно узкий Ангаро-Енисейский пограничный пояс, в целом характеризующийся повышенной мощностью коры, фиксируется, в первую очередь, серией профилей 2-го этапа (1972–1995 гг.) и единственным профилем современного этапа (1-СБ-2006), пересекающим Енисейский кряж. К сожалению, опорный профиль 1-СБ-2006, переобработка на современном уровне которого не осуществлена, не дает четкую структуру внутреннего строения пояса.

Становой пограничный пояс имеет ширину от 300 до 600 км, чем резко отличается от остальных

поясов. Внутренняя структура пояса фиксируется двумя современными профилями — 1-СБ-Восточным, пересекающим Аргунский массив, Селенгино-Становую СО и Байкальскую СО, и профилем 8-ДВ, пересекающим пояс в зоне сочленения Восточно-Сибирской и Амурской провинций и далее проходящим вдоль него на запад более 1000 км. Оба опорных профиля свидетельствуют о сложной внутренней структуре пояса, но в совокупности с анализом потенциальных полей однозначно фиксируют его обособленность относительно прилегающих аномальных провинций (Восточно-Сибирской и Амурской). Фактически, как будет показано ниже, данный пояс представляет собой коллаж областей (блоков кратонного типа) с повышенной мощностью коры, которые разделяются зонами смятия.

Цветовая гамма на схеме районирования (рис. 8) соответствует высшему рангу структур (аномальная провинция, пояс). Тональность провинций от темной к более светлой — предположительному «омоложению» возраста консолидации аномальных областей. На схеме указаны индексы аномальных районов, включающие название аномальной провинции (заглавные буквы), области (римские цифры) и района (арабские цифры), название структур всех рангов представлено в табл. 2. Погораничные пояса первого типа с четкой и относительно постоянной характеристикой внутреннего строения — серый цвет; штриховка поясов второго и третьего типов показывает влияние процессов, характерных для смежных с ними аномальных провинций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенности глубинного строения аномальных провинций. Сеточные модели комплекта карт глубинного строения в совокупности с векторной схемой районирования фундамента позволяют оценить их статистические параметры (рис. 9), определить (по косвенным признакам) корректность их выделения и сравнить между собой.

Две древнейшие аномальные провинции — Восточно-Европейская (далее — ВЕ) и Восточно-Сибирская (далее — ВС), возраст фундамента которых оценивается как архей-раннепротерозойский, значительно различаются внутренней зональностью и мощностью основных подразделений земной коры. Первая провинция включает 8 областей, вторая — 7 (рис. 8, табл. 2), большая часть которых представлена кристаллической корой, но в площадь провинций также входят области с двухэтажным строением фундамента, т. е. представленные консолидированной земной корой (рис. 2). Для Восточно-Европейской провинции, расположенной практически в пределах суши, двухэтажный фундамент характеризует Печорскую аномальную область (ВЕ-III). В пределах Восточно-Сибирской, захватывающей в том числе Таймыро-Североземельскую складчатую систему и Северо-Карскую (акваториальную) плиту, выделяются две аномальные области с двухэтажным фундаментом (BC-VI, BC-VII).

**Список аномальных объектов на схеме комплексного районирования потенциальных полей
с учетом данных глубинного строения (рис. 8)**

Table 2. List of anomalous objects depicted on the basement area map by potential fields datasets, with deep structure maps included (Fig. 8)

Название и индексация аномальных таксонов	Название и индексация аномальных таксонов
ВЕ. Восточно-Европейская провинция	ВКЧ. Верхояно-Колымо-Чукотская провинция
ВЕ-I. Лапландско-Мезенская область	ВКЧ-I. Верхояно-Колымская область
ВЕ-I-1. Карельский район	ВКЧ-I-1. Адыча-Полоусный район
ВЕ-I-2. Беломорский район	ВКЧ-I-2. Оймяконский район
ВЕ-I-3. Кольский район	ВКЧ-I-3. Охотский район
ВЕ-II. Прибалтийская область	ВКЧ-II. Уяндинская область
ВЕ-II-1. Ладожский район	ВКЧ-II-1. Восточно-Полоусненский район
ВЕ-II-2. Литовский район (фрагмент)	ВКЧ-II-2. Центрально-Колымский район
ВЕ-III. Смоленско-Московская область	ВКЧ-III. Омолоно-Чукотская область
ВЕ-III-1. Ярославский район	ВКЧ-III-1. Омолонский район
ВЕ-III-2. Смоленский район (фрагмент)	ВКЧ-III-2. Олойский район
ВЕ-IV. Воронежская область	ВКЧ-III-3. Анюйский район
ВЕ-IV-1. Окский район (фрагмент)	ВКЧ-III-4. Пэкульнейский район
ВЕ-IV-2. Хоперский район	ВКЧ-IV. Черско-Момская область
ВЕ-V. Волго-Уральская область	ВКЧ-IV-1. Туостакский район
ВЕ-V-1. Средневожский район	ВКЧ-IV-2. Момский район
ВЕ-V-2. Нижне-Камский район	ВКЧ-IV-3. Рассохинский район
ВЕ-V-3. Татарский район	ВКЧ-IV-4. Балыгычанский район
ВЕ-VI. Прикаспийская область	ЧА. Восточно-Чукотско-Аляскинская провинция (фрагм.)
ВЕ-VII. Украинская область (фрагм.)	АМ. Амурская провинция (фрагм.)
ВЕ-VIII. Тимано-Печорская область	АМ-I. Аргуно-Хинганская область
ВЕ-VIII-1. Ижма-Печорский район	АМ-I-1. Аргунский район
ВЕ-VIII-2. Средне-Тиманский район	АМ-I-2. Забайкальский район
ВС. Восточно-Сибирская провинция	АМ-II. Буреинская область
ВС-I. Тунгусско-Ангарская область	АМ-II-1. Зейско-Буреинский район
ВС-I-1. Курейский район	АМ-II-2. Баджалский район
ВС-I-2. Бахтинско-Подкаменный район	БМ. Баренцевоморская провинция
ВС-I-3. Ангарский район	БМ-I. Баренцевская область
ВС-II. Мамско-Вилуйская область	БМ-I-1. Новоземельский район
ВС-II-1. Вилуйский район	БМ-I-2. Центрально-Баренцевский район
ВС-II-2. Мирнинский район	БМ-I-3. Западно-Баренцевский район
ВС-II-3. Патомский район	БМ-II. Область Земли Франца-Иосифа
ВС-III. Анабаро-Алданская область	ВА. Восточно-Арктическая провинция
ВС-III-1. Далдынский район	ВА-I. Лаптевоморская область
ВС-III-2. Айхальский район	ВА-I-1. Прибрежный район
ВС-III-3. Мархинский район	ВА-I-2. Усть-Ленский район
ВС-III-4. Нимнырский район	ВА-I-3. Святоносский район
ВС-III-5. Сутамский район	ВА-II. Новосибирско-Чукотская область
ВС-III-6. Алданский район	ВА-II-1. Район Де-Лонга
ВС-III-7. Учурский район	ВА-II-2. Котельниковский район
ВС-III-8. Хапчангский район	ВА-II-3. Раучуанский район
ВС-IV. Биректинская область	ВА-II-4. Чукотскоморский район
ВС-IV-1. Усть-Оленёкский район	ВА-II-5. Северо-Врангелевский район
ВС-IV-2. Экектский район	БЯ. Берингово-Япономорская провинция

Название и индексация аномальных таксонов	Название и индексация аномальных таксонов
ВС-V. Тыринская область	БЯ-I. Корякско-Камчатская область
ВС-VI. Таймыро-Северо-Карская область	БЯ-I-1. Наваринский район
ВС-VI-1. Северо-Земельский район	БЯ-I-2. Северо-Корякский район
ВС-VI-2. Северо-Таймырский район	БЯ-I-3. Ветвейский район
ВС-VII. Таймыро-Хатангская область	БЯ-I-4. Олюторско-Восточно-Камчатский район
ВС-VII-1. Таймырский район	БЯ-I-5. Западно-Камчатский район
ВС-VII-2. Хатангский район	БЯ-II. Беринговоморская область
СТ. Скифско-Туранская провинция (фрагм.)	БЯ-II-1. Алеутский район
СТ-I. Скифская область	БЯ-II-2. Ширшовский район
СТ-I-1. Район Вала Карпинского	БЯ-II-3. Командорский район
СТ-I-2. Ставропольский район	БЯ-III. Охотоморская область
СТ-I-3. Кубанско-Терекский район	БЯ-III-1. Северо-Охотский район
ЗС. Западно-Сибирская провинция	БЯ-III-2. Центрально-Охотский район
ЗС-I. Карско-Обская область	БЯ-III-3. Дерюгинский район
ЗС-I-1. Ямальский район	БЯ-III-4. Восточно-Охотский район
ЗС-I-2. Гыданский район	БЯ-III-5. Южно-Охотский район
ЗС-I-3. Тазовский район	БЯ-IV. Сихотэ-Алинская область
ЗС-II. Урало-Казахстанская область	БЯ-V. Сахалино-Япономорская область
ЗС-II-1. Восточно-Уральский район	БЯ-V-1. Северо-Япономорский район
ЗС-II-2. Зауральский район	БЯ-V-2. Центрально-Япономорский район
ЗС-II-3. Нижнеишимский район	БЯ-V-3. Сахалинский район
ЗС-II-4. Кокчетавский район	АП. Аномальные пограничные пояса
ЗС-III. Алтай-Западно-Сибирская область	АП-I. Уральский
ЗС-III-1. Рудноалтайско-Томский район	АП-II. Ангаро-Енисейский
ЗС-III-2. Вах-Колпашевский район	АП-III. Верхоянский
ЗС-III-3. Тазовский район	АП-IV. Становой
ЗС-III-4. Тарко-Салинский район	АП-V. Чукотско-Амурский
ЗС-IV. Саяно-Приенисейская область	АП-VI. Кавказский
ЗС-IV-1. Приенисейский район	Тихоокеанская зона субдукции
ЗС-IV-2. Сымский район	
ЗС-IV-3. Чулымский район	
ЗС-IV-4. Кузнецкий район	
ЗС-IV-5. Западно-Саянский район	
ЗС-IV-6. Восточно-Саянский район	

При практически одинаковых диапазонах мощности осадочного чехла (~15 км) в ВС провинции площадь аномальных областей с мощностью осадочного чехла более 8–10 км составляет порядка 16 % при менее чем 10 % для ВЕ провинции (рис. 9, а). Аномально высокая мощность осадков (более 20 км) резко выделяет Прикаспийскую область в пределах ВЕ, однако, поскольку это незначительный фрагмент основной структуры (Прикаспийской впадины), существенный вклад в статистические глубинные параметры она не вносит.

Мощность земной коры ВС варьирует в более широких пределах по сравнению с ВЕ (рис. 9, б), при этом площадь аномальных областей, средняя мощ-

ность коры которых превосходит 44 км, практически одинакова (30 %), а объем областей с мощностью менее 36 км существенно отличается: в ВЕ — порядка 2 %, в ВС — порядка 9 % от общей площади провинций. Еще более значимые различия между двумя древнейшими аномальными провинциями демонстрирует гистограмма мощности консолидированной земной коры (рис. 9, с). Принципиально различна и внутренняя зональность (совокупность аномальных областей, районов) рассматриваемых аномальных провинций, которая является результатом анализа, в первую очередь, потенциальных полей и их трансформант.

Внутренняя зональность ВЕ коррелирует с ранее созданными схемами районирования

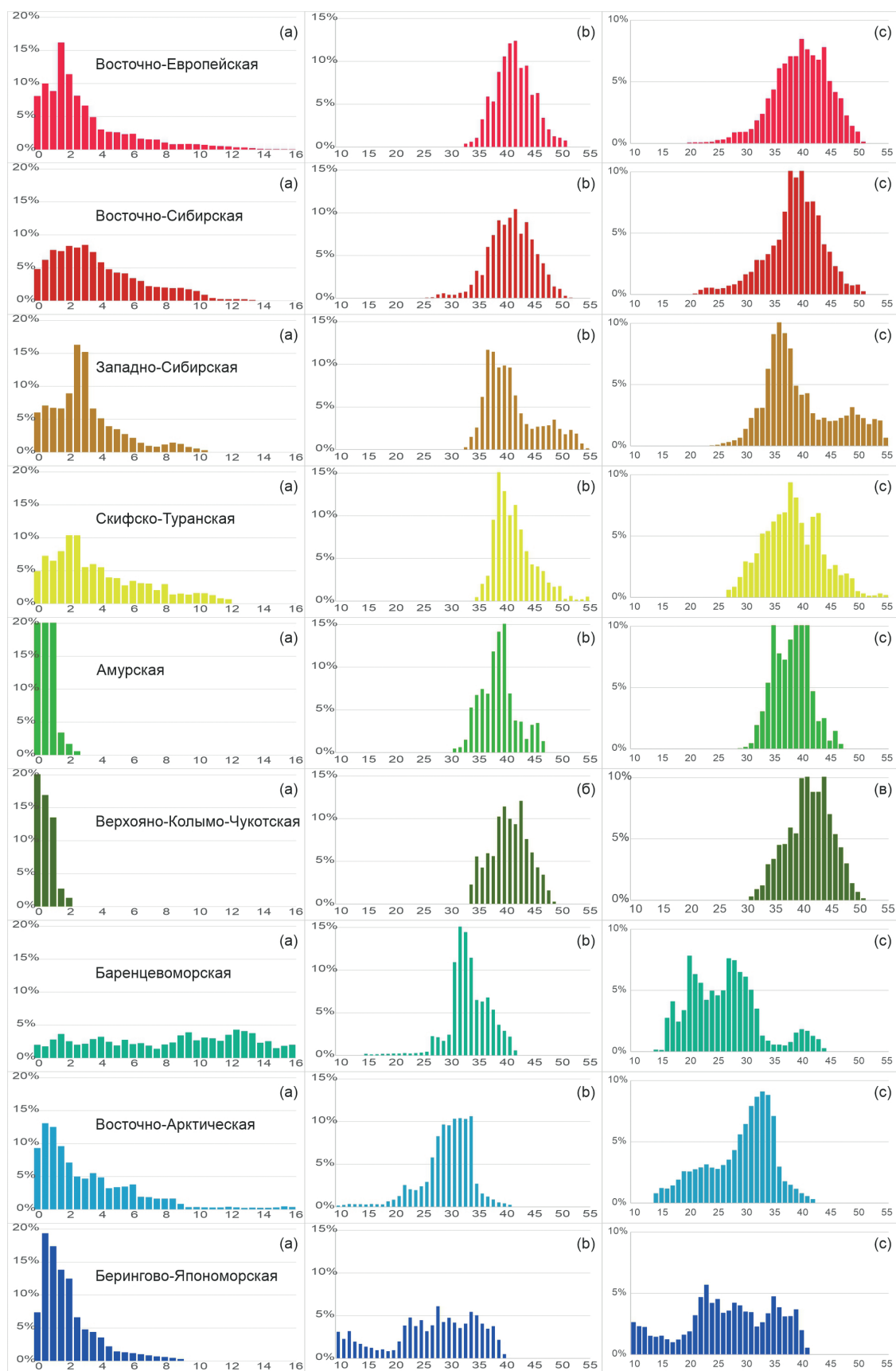


Рис. 9. Распределение мощности основных элементов глубинного строения аномальных провинций

a — осадочный чехол, *b* — земная кора, *c* — консолидированная земная кора

Fig. 9. Basic deep structure thickness distribution in anomalous provinces

a — sedimentary cover, *b* — Earth's crust, *c* — consolidated Earth's crust

фундамента Восточно-Европейской платформы [25; 32]: два древнейших «ядра» (протократона) представлены Лапландско-Мезенской и Волго-Уральской аномальными областями, их разделяет Среднерусская область северо-восточного простирания с фундаментом преимущественно раннепротерозойского возраста.

Западно-Сибирская и Скифско-Туранская аномальные провинции, соответствующие молодым плитам, имеют принципиально отличающиеся от древних платформ характеристики по картам глубинного строения. Диапазоны изменения мощности осадочного чехла двух аномальных провинций близки (0,5–11,0 км); при этом следует учитывать, что в пределах России Скифско-Туранская провинция представлена фрагментом. Средняя мощность земной коры обеих провинций находится в диапазоне 38–42 км. Однако Западно-Сибирская провинция характеризуется бимодальным распределением параметра, и второй максимум отмечается в области аномально высоких значений (48–54 км). Эта область диаграммы соответствует южной части Алтае-Приенисейской аномальной области (ЗС-IV), которая включает структуры Алтае-Саяно-Монгольской складчатой области.

Фрагмент Скифско-Туранской провинции имеет четко выраженную линейную зональность северо-западного простирания (3 района): самая северная (СТ-I-1), соответствующая валу Карпинского, выражена надрегиональной положительной аномалией поля силы тяжести и отрицательной аномалией поля ΔT_g ; две другие выделены в объеме Скифской плиты и характеризуются резким понижением поля Δg , вплоть до интенсивной отрицательной аномалии в южном районе и цепочкой вытянутых в северо-восточном направлении среднечастотных положительных магнитных аномалий.

Западно-Сибирская провинция имеет четырехчленное деление: три области сосредоточены на суше и имеют схожую внутреннюю зональность в виде вложенных конусов с вершинами, ориентированными на север. Они замыкаются четвертой областью, включающую сушу и акваториальную часть и характеризующуюся асимметричной зональностью центрального типа.

Три аномальные провинции (Верхояно-Колымо-Чукотская, Амурская и Восточно-Чукотско-Аляскинская) соотносятся с мезозойскими складчатыми областями. При этом последние две представлены фрагментарно, а объем Восточно-Чукотско-Аляскинской столь незначителен (в рамках данного масштаба), что статистические параметры и характер потенциальных полей не отражают ее реальный образ.

Осадочный чехол Верхояно-Колымо-Чукотской (далее — ВКЧ) и Амурской (далее — АМ) провинций представлен локальными впадинами мощностью менее 2 км. Диапазон изменения мощности земной коры составляет 15–20 км, при этом средние значения (~60 % территории) для ВКЧ смещены в область более высоких значений (39–44 км) по отношению к Амурской (38–42 км). Области мощной земной коры (более 44 км) составляют порядка 21 % в ВКЧ и не более 9 % в фрагменте Амурской провинции.

Две аномальные области фрагмента Амурской провинции (АМ-I и АМ-II) различаются как мощностью земной коры, так и внутренней зональностью. Аргуно-Хинганская область (АМ-I) при повышенной мощности коры (более 42 км) характеризуется резко пониженными значениями поля Δg при общей северо-восточной ориентировке средне-высокочастотных аномалий потенциальных полей. Зональность Буреинской области (АМ-II) тяготеет к центральному типу при относительно пониженной мощности земной коры (менее 40 км).

«Ядром» четырехчастного (с позиции аномальных областей) деления Верхояно-Колымо-Чукотской провинции является Омолоно-Чукотская область (ВКЧ-III), которая на северо-запад «наращивается» Уяндинской (ВКЧ-II) и на юг-запад Черско-Момской (ВКЧ-IV) и Верхояно-Колымской (ВКЧ-I) областями. Провинция имеет широкий диапазон изменения мощности земной коры (~20 км), при этом относительно узкий диапазон более 39–45 км отвечает более чем 65 % площади, а на 10 % площади отмечаются аномально высокие значения (более 45 км). Наибольшей мощностью коры характеризуется Омолоно-Чукотская область, высокие значения параметра отмечаются также в юго-западных областях (ВКЧ-I, ВКЧ-IV). В направлении Восточно-Арктической провинции мощность земной коры всех областей снижается, минимальными значениями (менее 38 км) характеризуется Уяндинская область (ВКЧ-II).

Две аномальные провинции (Баренцевоморская и Восточно-Арктическая) пассивной окраины континента в пределах Северного Ледовитого океана значимо различаются по всем глубинным параметрам и характеру потенциальных полей.

Гистограмма мощности осадочного чехла Баренцевоморской провинции резко отличается от всех остальных гистограмм по аналогичному параметру (рис. 9, а): практически равномерно распределенные значения при аномально широком диапазоне (более 18 км). Слабо выраженный максимум в интервале 8–14 км соответствует Баренцевской области (за исключением Новой Земли), а значения менее 4 км в области сопредельной с границей «континент-океан» (Франца-Иосифа). Восточно-Арктическая провинция при схожем диапазоне изменения мощности осадков (16 км) характеризуется относительно низкими значениями — более 80 % площади имеет мощность осадочного чехла менее 5 км, а площадь с мощностью более 8 км составляет порядка 7 %. Это определяет резкое различие провинций по оценке мощности консолидированной коры (рис. 9, с). Резко различна и ориентировка аномалий потенциальных полей двух аномальных провинций: для основной (по площади) Баренцевской области преобладают субмеридиональные направления региональных и среднечастотных аномалий Δg , в то время как в занимающей большую площадь Новосибирско-Чукотской области Восточно-Арктической провинции — субширотные.

Как уже отмечалось ранее, Берингово-Япономорская провинция резко отличается по всем глубинным параметрам от аномальных провинций Северного Ледовитого океана. Диапазон мощности осадочного

чехла составляет порядка 9 км при резко преобладающих значениях менее 3 км (80 % площади). Гистограммы мощности земной и консолидированной земной коры подобны, однако трехчастное деление с максимумами в районе 10–12 км, 22–25 км и 35–38 км более ярко выражено на гистограмме консолидированной земной коры (рис. 9, *b, c*). Это свидетельствует о крайней неоднородности провинции, в состав которой входят как задуговые бассейны (Берингоморская область и Южно-Охотский и Центрально-Япономорский районы), так и складчатые системы (Корякско-Камчатская и Сихотэ-Алинская области, Сахалинский район).

Анализ схемы районирования фундамента, основанный на особенностях структуры потенциальных полей в совокупности с параметрами глубинного строения, свидетельствует об индивидуальности выделенных аномальных провинций, что отчетливо выражено в гистограммах параметров глубинного строения и внутренней зональности (распределении областей и районов) провинций. С одной стороны, аномальные провинции в подавляющем большинстве случаев коррелируют с общепринятыми надрегиональными тектоническими структурами (древние и молодые платформы, складчатые области и т. д.). С другой стороны, в целом ряде случаев границы их существенно расширены и в их состав включены области, структура и глубинные параметры которых преобразованы более молодыми процессами активизации, чем «базовая» кристаллическая кора. Авторы отдают себе отчет в дискуссионности подобных решений, но тем не менее считают, что это дает возможность по-новому взглянуть на историю развития надрегиональных структур. Выделение нового элемента районирования — пограничных поясов трех типов — указывает на сложный и разноплановый характер взаимодействия крупнейших тектонических структур и предполагает необходимость современным концептуальным представлениям о строении складчатых областей с последующим их возможным уточнением в связи с новыми данными по глубинному строению. В соответствии с этим представленная схема может рассматриваться как новый и принципиально важный элемент современного 3D тектонического районирования России.

ОБСУЖДЕНИЕ

Возможность использования карт глубинного строения для тектонических построений демонстрируется на примере районирования фундамента ВС аномальной провинции. Схема (рис. 8) была доработана с учетом современных представлений о тектонике Сибирского кратона [33; 34] и преобразована в схему тектонического районирования (рис. 10) с разделением кристаллического фундамента на блоки, различающиеся по формационному типу — гранулитогнейсовые и гранит-зеленокаменные (тоналит-трондьемит-гнейсовые) и возрасту. На полученной схеме прослежены все основные элементы строения кратона.

Основу структурного каркаса ВС занимают две меридионально вытянутые аномальные области — Анабаро-Алданская и Тунгусо-Ангарская. Первая соответствует архейскому Далдыно-Алданскому гранулитовому поясу [33], в составе которого выделяются как ортогнейсовые (Далдынский, Тунгский, Нимнырский), так и парагнейсовые блоки (Хапчанский и Учурский). Тунгусо-Ангарская область в свою очередь соответствует Тунгусской группе гранулитовых блоков архейского возраста, каждый из которых в рамках данной схемы не имеет собственного названия. Внутреннее строение гранулитовых блоков подобного типа определяется наличием крупных гнейсовых овалов [35], которые обрамляются кристаллическими комплексами, занимающими промежуточное «межовальное» положение. Гранулитогнейсовые овалы уверенно выделяются по картам потенциальных полей и идентифицируются как в пределах Далдыно-Алданского пояса, так и в Тунгусских блоках. При этом в Далдыно-Алданском поясе границы овалов, оконтуренные по аномалиям потенциальных полей, полностью совпадают с их границами, приводимыми на геологических схемах строения Алданского щита [35]. Это позволяет выделять аналогичные структуры на перекрытых осадками областях (рис. 10).

По современным представлениям, расположенные к западу от Далдыно-Алданского пояса Биректинский и Тыринский блоки относятся к палеопротерозойской коре тоналит-трондьемит-гнейсового типа [33; 34]. Между Анабаро-Алданской и Тунгусо-Ангарской располагается Мамско-Виллюйская область, которой соответствуют Маганский и Олёкминский блоки фундамента гранит-зеленокаменного типа. Мамско-Виллюйская область имеет форму равнобедренного треугольника, типичную для гранит-зеленокаменных областей древних платформ [35].

Принципиальным элементом строения Сибирского кратона являются шовные зоны или зоны смятия (шеар-зоны в англоязычной литературе) (рис. 10). Шовные зоны, расположенные внутри кратона, разделяют блоки кристаллической коры; зоны, отмечаемые на периферии, являются границами кратона и смежных складчатых областей. Они прослеживаются по границам практически всех блоков, характеризуются шириной от первых км до десятков км и, как правило, выражены в аномалиях потенциальных полей.

Нанесенные на карты глубинного строения зоны смятия в большинстве случаев оказываются конформными границам аномалий мощности земной коры, их структурному рисунку либо сами отмечаются по линейным аномалиям мощности. Наибольшей шириной среди зон подобного типа отличаются Байкало-Патомская и Верхоянская зоны, характеризующиеся крупноамплитудными надвигами и шарьяжами. Последняя в схеме геофизического районирования отнесена к пограничным поясам первого типа. Байкало-Патомская зона рифейского возраста входит в сложную структуру Центрально-Азиатского пояса, отделяя Западно-Становой блок кратонного типа от Сибирского кратона. Как и Верхоянский пояс,

Байкало-Патомская зона отмечается линейными аномалиями повышенной мощности земной коры. На севере она перекрывает Маганскую зону смятия или тектонического меланжа [30], так же как Верхоянская зона перекрывает Билляхскую и Улканскую зоны (рис. 10).

По южному обрамлению Баргузино-Витимского и Станового блоков, чьи границы коррелируются с зонами повышенного градиента мощности коры, прослеживаются несколько ветвящихся зон смятия, которые представляют собой пояса динамометаморфических комплексов (рис. 10). Такая особенность зон смятия не является уникальной чертой Центрально-Азиатского складчатого региона, так как схожую морфологию обнаруживают также зоны тектонического меланжа в пределах хорошо изученного Анабарского щита [30]. Можно предположить, что и в других погребенных или слабоизученных областях морфология расположенных в их пределах

зон смятия в действительности значительно сложнее, чем это обычно изображается на тектонических схемах.

Одним из самых изученных динамометаморфических поясов южной складчатой периферии Сибирского кратона является Агинско-Борщовочный пояс [36], обрамляющий с юга Становой блок. Высокая металлогеническая значимость пояса способствовала повышенному вниманию к проблемам геологического строения объектов подобного типа в Забайкальском регионе.

На опорном геолого-геофизическом профиле 1-СБ-Восточный, пересекающим Агинско-Борщовочный пояс, была забурена Забайкальская параметрическая скважина, что позволило получить опорный разрез Борщовочного комплекса метаморфического ядра — одного из важнейших тектонических элементов не только конкретного пояса, но и всего региона [37].

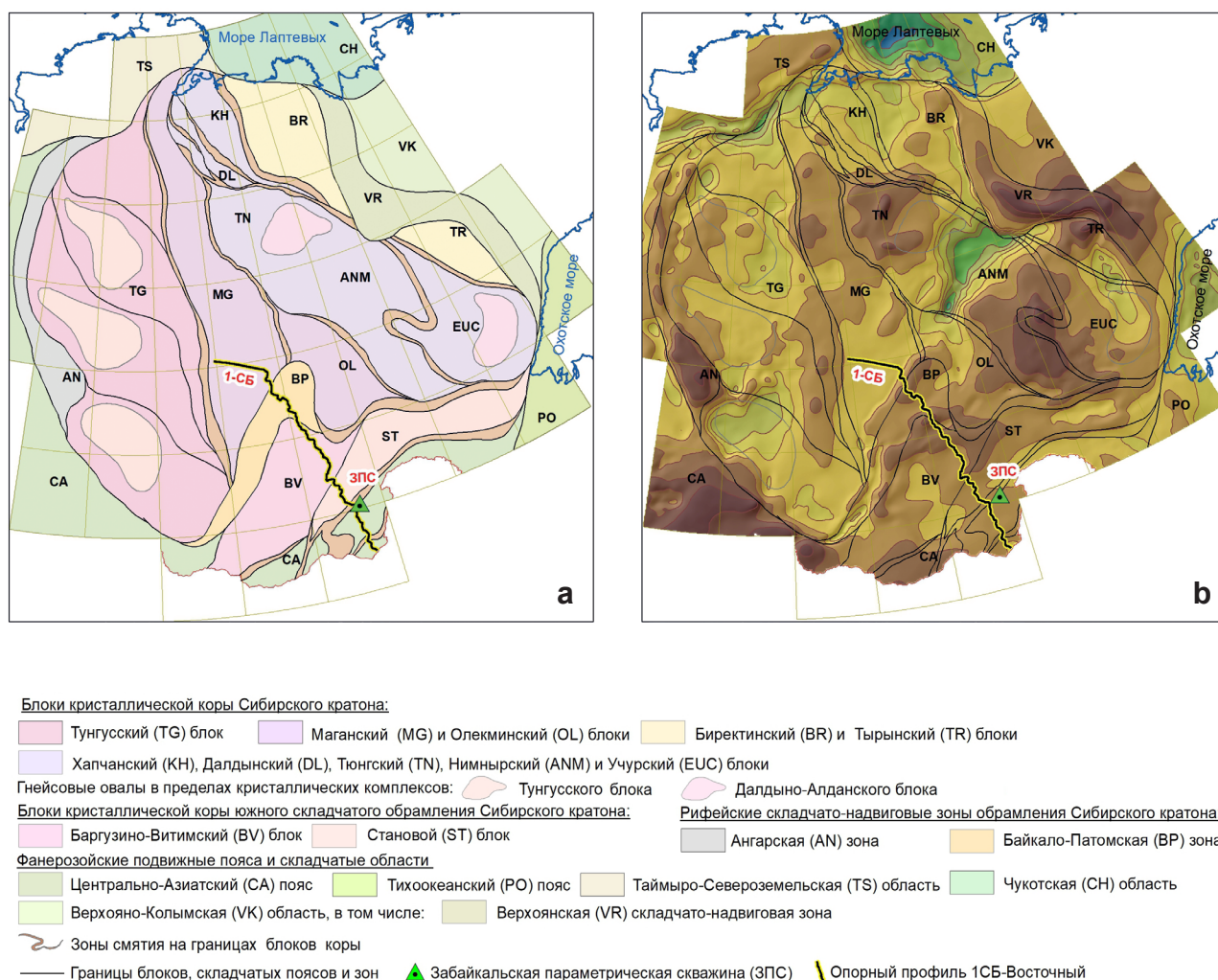


Рис 10. Схема тектонического районирования фундамента Сибирского кратона и его южного обрамления (а), схема мощности консолидированной земной коры с элементами тектонического районирования (b)

Условные обозначения к схеме мощности земной коры с элементами тектонического районирования приведены на рис. 7.

Fig. 10. Tectonic basement structure of the Siberian Craton and southern adjacent areas (a), consolidated Earth's crust thickness map, with tectonic elements borders included (b)

Fig. 7 presents symbols for the crust thickness map, with tectonic elements borders included.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданный по материалам глубинных геофизических исследований территории России и ее континентального шельфа цифровой комплект карт отражает особенности строения земной коры на всю ее мощность, демонстрирует связь глубинных и поверхностных геологических структур и может служить основой для фундаментальных геотектонических построений. Информационный ресурс, позволяющий использовать цифровые карты для последующих обобщений и геологической интерпретации в рамках сводного и обзорного картографирования, размещен на сайте института им. А. П. Карпинского в «Цифровом двойнике недр России» по ссылке [<https://wega.vsegei.ru/site/gisatlas>].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Опыт многоволновой сейсморазведки при изучении земной коры континентов и океанов / Под ред. С. Н. Кашубина, О. В. Петрова. СПб. : ВСЕГЕИ, 2022. 112 с.
2. Mooney W. D. Crust and Lithospheric Structure — Global Crustal Structure / [Eds.] B. Romanowicz, A. Dziewonski // *Treatise on Geophysics*. Vol. 1: Seismology and Structure of the Earth. Elsevier, 2007. P. 361–417. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52748-6.00011-0>.
3. Глубинные сейсмические исследования в России: результаты и проблемы. Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования / А. В. Липилин [и др.] // *Материалы Международного научно-практического семинара*. Роснедра, ВСЕГЕИ. СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. С. 85–90.
4. Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин — основа глубинного 3D картографирования территории Российской Федерации и ее континентального шельфа / С. Н. Кашубин [и др.] // *Региональная геология и металлогения*. 2016. № 67. С. 43–48.
5. Глубинное геолого-геофизическое изучение недр России: современное состояние и основные задачи / Р. Б. Сержантов [и др.] // *Региональная геология и металлогения*. 2013. № 53. С. 26–31.
6. Атлас карт глубинного строения земной коры и верхней мантии территории СССР: краткие пояснительные тексты / Ред. В. Ю. Зайченко [и др.] // *Министерство геологии СССР; АН СССР; ВНИИГеофизика*. М., 1989. 83 с.
7. Костюченко С. Л., Морозов А. Ф. Геолого-геофизические образы земной коры и верхней мантии территории России в картах и моделях. Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования // *Материалы Международного научно-практического семинара*. Роснедра, ВСЕГЕИ. СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. С. 82–85.
8. Строение раздела Мохо территории России и прилегающих акваторий. Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования / Ю. М. Эринчек [и др.] // *Материалы Международного научно-практического семинара*. Роснедра, ВСЕГЕИ. СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. С. 241–244.
9. Российская научная школа геологической картографии в создании нового поколения государственных геологических карт территории Российской Федерации, ее континентального шельфа и глубоководных окраин Евразии и Циркумполярной Арктики / О. В. Петров [и др.] // *Региональная геология и металлогения*. 2016. № 67. С. 6–18.
10. Карта типов земной коры Арктики / О. В. Петров [и др.] // *Тектоническая карта Арктики*. СПб. : ВСЕГЕИ, 2019. С. 26–32.
11. *Tectonics of Asia (Northern, Central and Eastern Asia)* / [Eds.] O. V. Petrov, S. Dong. Cham: Springer, 2021. 262 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62001-1>.
12. *Tectonics of the Arctic*. Springer Geology / [Eds.] O. V. Petrov, M. Smelror. Cham: Springer, 2021. 208 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46862-0>.
13. *Геологический словарь*. В 2-х томах / Под ред. А. Н. Криштофовича. М. : Госгеолтехиздат, 1960. Т. 1 — 402 с.; Т. 2 — 445 с.
14. *Геологический словарь*. В 2-х томах. Издание 2-е, перераб. и доп. / Под ред. К. Н. Паффенгольца. М. : Недра, 1978. Т. 1 — 486 с.; Т. 2 — 456 с.
15. *Геологический словарь*. В 3-х томах. Издание 3-е перераб. и доп. / Гл. ред. О. В. Петров., СПб. : Изд-во ВСЕГЕИ, 2010–2011. Т. 1 — 432 с.; Т. 2 — 480 с.; Т. 3 — 440 с.
16. Christensen N. I., Mooney W. D. Seismic Velocity Structure and Composition of the Continental Crust: A Global View // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1995. Vol. 100, iss. B6. P. 9761–9788. <https://doi.org/10.1029/95JB00259/>.
17. Типы земной коры Циркумполярной Арктики / С. Н. Кашубин [и др.] // *Региональная геология и металлогения*. 2013. № 55. С. 5–20.
18. Типы земной коры Центральной и Северо-Восточной Азии, дальневосточной и арктической областей перехода континент–океан / С. Н. Кашубин [и др.] // *Региональная геология и металлогения*. 2018. № 73. С. 6–18.
19. Карта мощности земной коры Циркумполярной Арктики / С. Н. Кашубин [и др.] // *Региональная геология и металлогения*. 2011. № 46. С. 5–13.
20. Структурная карта поверхности фундамента платформенных территорий СССР. Масштаб 1 : 5 000 000 / Гл. ред. В. В. Семенович [и др.]. Министерство геологии СССР, 1982.
21. Структурно-формационная карта фундамента Западно-Сибирской плиты масштаба 1 : 5 000 000 / Ред. В. С. Сурков. Новосибирск : СНИИГГиМС, 2000.
22. Геохимическое картирование Циркумполярной Арктики: научная парадигма, технология, предварительные результаты / А. А. Кременецкий [и др.] // *Разведка и охрана недр*. 2015. № 6. С. 8–21.
23. Тектоническое районирование фундамента Арктики / О. В. Петров [и др.], ред. О. В. Петров, М. Пубелье // *Тектоническая карта Арктики*. СПб. : ВСЕГЕИ, 2019. С. 40–60.
24. Косыгин Ю. А. Основы тектонического районирования // *Принципы тектонического районирования*. Владивосток, 1975. С. 8–24.
25. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы. Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС. В 2-х томах. М. : ГЕОКАРТ ; ГЕОС, 2010. Т. 1. 408 с.
26. Сурков В. С., Жеро О. Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. М. : Недра, 1981. 144 с.
27. Millera H. G., Singh V. Potential Field TILT — a New Concept for Location of Potential Field Sources // *Journal of Applied Geophysics*. 1994. Vol. 32, iss. 2–3. P. 213–217. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1).
28. Схема районирования аномальных потенциальных полей Арктики / С. Н. Кашубин [и др.], ред. О. В. Петров, М. Пубелье // *Тектоническая карта Арктики*. СПб. : ВСЕГЕИ, 2019. С. 18–21.
29. Глубинное строение земной коры северо-восточной Евразии и ее континентальных окраин / С. Н. Кашубин [и др.] // *Геодинамика и тектонофизика*. 2021. Т. 12 (2). С. 199–224. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0521>.
30. Воронин А. Ю. Районирование территорий на основе искусственного интеллекта и распознавания образов в задачах природопользования // *Автореферат дис. ... д-ра техн. наук*. М., 2007. 44 с.

31. Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект Уралсейс). Тверь : ГЕРС, 2001. 286 с.
32. Богданова С. В. Земная кора Русской плиты в раннем докембрии (на примере Волго-Уральского сегмента). М. : Наука, 1986. 224 с.
33. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М. : МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.
34. The Siberian Craton and its evolution in terms of the Rodinia hypothesis / D. P. Gladkochub [et al.] // Episodes. 2006. Vol. 29. P. 169–174. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2006/v29i3/002>.
35. Салоп Л. И. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л. : Недра, 1982. 343 с.
36. Рутштейн И. Г., Богач Г. И., Абдукаримов Т. Ф. Геология и рудоносность динамометаморфических структур Восточного Забайкалья. Изд. 2-е, испр. и доп. / Отв. ред.: Н. В. Межеловский, И. Г. Рутштейн. М. : Геокарт-Геос, 2015. 169 с.
37. Забайкальская параметрическая скважина: первые данные о глубинном строении Борзовочного комплекса метаморфического ядра / О. В. Петров [и др.] // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 513, № 2. С. 165–173. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601321>.

REFERENCES

1. Experience of multiwave seismic exploration in the study of the earth's crust of continents and oceans / [Eds.] S. N. Kashubin, O. V. Petrov. St. Petersburg: VSEGEI; 2022. 112 p. (In Russ.).
2. Mooney W. D. Crust and Lithospheric Structure — Global Crustal Structure / [Eds.] B. Romanowicz, A. Dziewonski. *Treatise on Geophysics*. Vol. 1: *Seismology and Structure of the Earth*. Elsevier; 2007. P. 361–417. <https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00011-0>.
3. Deep seismic studies in Russia: results and problems. Models of the earth's crust and upper mantle based on the results of deep seismic profiling / A. V. Lipilin [et al.]. *Proceedings of the International scientific and practical seminar. Rosnedra, VSEGEI*. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House; 2007. P. 85–90. (In Russ.).
4. State network of reference geological and geophysical profiles, parametric and superdeep wells — the basis for deep 3D mapping of the territory of the Russian Federation and its continental shelf / S. N. Kashubin [et al.]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2016; (67): 43–48. (In Russ.).
5. Deep geological and geophysical study of the subsurface of Russia: current state and main tasks / R. B. Serzhantov [et al.]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2013; (53): 26–31. (In Russ.).
6. Atlas of the map of the deep structure of the earth's crust and the upper mantle of the territory of the USSR: [Maps]: short explanatory texts / [Eds.] V. Yu. Zaychenko [et al.]. *Ministry of Geology of the USSR; Academy of Sciences of the USSR; VNIIGeophysics*. Moscow; 1989. 83 p. (In Russ.).
7. Kostyuchenko S. L., Morozov A. F. Geological and geophysical images of the earth's crust and upper mantle of the territory of Russia in maps and models. Models of the earth's crust and upper mantle based on the results of deep seismic profiling // *Proceedings of the International scientific and practical seminar. Rosnedra, VSEGEI*. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House; 2007. P. 82–85. (In Russ.).
8. Structure of the Moho boundary of the territory of Russia and adjacent water areas. Models of the earth's crust and upper mantle based on the results of deep seismic profiling / Yu. M. Erinchek [et al.]. *Proceedings of the International scientific-practical seminar. Rosnedra, VSEGEI*. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House; 2007. P. 241–244. (In Russ.).
9. Russian scientific school of geological cartography in creating a new generation of state geological maps of the territory of the Russian Federation, its continental shelf and deep-water margins of Eurasia and the Circumpolar Arctic / O. V. Petrov [et al.]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2016; (67): 6–18. (In Russ.).
10. Map of Arctic crust types. In the book / O. V. Petrov [et al.]. *Tectonic map of the Arctic*. St. Petersburg: VSEGEI; 2019. P. 26–32. (In Russ.).
11. Tectonics of Asia (Northern, Central and Eastern Asia) / [Eds.] O. V. Petrov, S. Dong. Cham: Springer; 2021. 262 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62001-1>.
12. Tectonics of the Arctic. Springer Geology / [Ed.] O. V. Petrov, M. Smelror. Cham: Springer; 2021. 208 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46862-0>.
13. Geological dictionary. In two volumes / [Ed.] A. N. Kristofovich. Moscow: Gosgeoltekhizdat; 1960. Vol. 1: 402 p.; Vol. 2: 445 p. (In Russ.).
14. Geological dictionary. In two volumes. Second edition, revised and enlarged / [Eds.] K. N. Paffengolts. Moscow: Nedra; 1978. Vol. 1: 486 p.; Vol. 2: 456 p. (In Russ.).
15. Geological Dictionary. In three volumes. Third edition, revised and enlarged // [Ed.] O. V. Petrov. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House; 2010–2012. Vol. 1: 432 p.; Vol. 2: 480 p.; Vol. 3: 440 p. (In Russ.).
16. Christensen N. I., Mooney W. D. Seismic Velocity Structure and Composition of the Continental Crust: A Global View. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1995; 100 (B6): 9761–9788. <https://doi.org/10.1029/95JB00259/>.
17. Types of the Earth's Crust of the Circumpolar Arctic / S. N. Kashubin [et al.]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2013; (55): 5–20. (In Russ.).
18. Types of the earth's crust in Central and North-East Asia, the Far Eastern and Arctic regions of the continent-ocean transition / S. N. Kashubin [et al.]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2018; (73): 6–18. (In Russ.).
19. Map of the crustal thickness of the Circumpolar Arctic / S. N. Kashubin [et al.]. *Regional Geology and Metallogeny*. 2011; (46): 5–13. (In Russ.).
20. Structural map of the basement surface of platform territories of the USSR. Scale 1 : 5,000,000 / [Eds.] V. V. Semenov [et al.]. USSR Ministry of Geology; 1982. (In Russ.).
21. Structural-formational map of the basement of the West Siberian plate at a scale of 1 : 5,000,000 / [Ed.] V. S. Surkov. Novosibirsk: SNIIGiMS; 2000. (In Russ.).
22. Geochemical mapping of the Circumpolar Arctic: scientific paradigm, technology, preliminary results / A. A. Kremenetsky [et al.]. *Prospect and Protection of Mineral resources*. 2015; (6): 8–21. (In Russ.).
23. Tectonic zoning of the Arctic basement / O. V. Petrov [et al.], [Eds.] O. V. Petrov, M. Pubellier. *Tectonic map of the Arctic*. St. Petersburg: VSEGEI; 2019. P. 40–60. (In Russ.).
24. Kosygin Yu. A. Fundamentals of tectonic zoning // *Principles of tectonic zoning*. Vladivostok; 1975. P. 8–24. (In Russ.).
25. Deep structure, evolution and useful minerals of the Early Precambrian basement of the East European platform. Interpretation of materials on the reference profile 1-EB, profiles 4B and TATSEIS. In 2 volumes. Moscow: GEOKART; GEOS; 2010. Vol. 1. 408 p. (In Russ.).
26. Surkov V. S., Zhero O. G. Foundation and development of the platform cover of the West Siberian plate. Moscow: Nedra; 1981. 144 p. (In Russ.).
27. Millera H. G., Singh V. Potential Field TILT — a New Concept for Location of Potential Field Sources. *Journal of Applied Geophysics*. 1994; 32 (2–3): 213–217. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1).
28. Scheme for zoning anomalous potential fields in the Arctic / S. N. Kashubin [et al.], [Eds.] O. V. Petrov, M. Pubellier. *Tectonic map of the Arctic*. St. Petersburg: VSEGEI; 2019. P. 18–21. (In Russ.).
29. Deep structure of the earth's crust of northeastern Eurasia and its continental margins / S. N. Kashubin [et al.]. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2021; 12 (2): 199–224. doi:10.5800/GT-2021-12-2-0521. (In Russ.).
30. Voronin A. Yu. Zoning of territories based on artificial intelligence and pattern recognition in nature management

tasks. Abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Moscow; 2007. 44 p. (In Russ.).

31. Deep structure and geodynamics of the Southern Urals (Uralseis project). Tver: GERS Publishing House; 2001. 286 p.

32. Bogdanova S. V. The Earth's crust of the Russian plate in the early Precambrian (using the Volga-Ural segment as an example). Moscow: Nauka; 1986. 224 p. (In Russ.).

33. Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Moscow: MAIK "Nauka/Interperiodika"; 2001. 571 p. (In Russ.).

34. The Siberian Craton and its evolution in terms of the Rodinia hypothesis / D. P. Gladkochub [et al.]. *Episodes*.

2006; (29): 169–174. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2006/v29i3/002>.

35. Salop L. I. Geological development of the Earth in the Precambrian. Leningrad: Nedra; 1982. 343 p. (In Russ.).

36. Geology and ore-bearing capacity of dynamometamorphic structures of Eastern Transbaikalia 2nd ed., corrected and enlarged / I. G. Rutshteyn, G. I. Bogach, T. F. Abdugarimov; [Eds.] N. V. Mezhelevsky, I. G. Rutshteyn. Moscow: Geokart-Geos; 2015. 169 p. (In Russ.).

37. Transbaikalian parametric borehole: first data of the deep structure of the Borshtchovochny metamorphic core complex / O. V. Petrov [et al.]. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2023; 513 (2): 165–173. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601321> (In Russ.).

Евгения Дововна Мильштейн

Кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий геофизик отдела глубинной геофизики

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-3618-6348>

SPIN-код РИНЦ 5197-7487

Evgenia_Milshteyn@karpinskyinstitute.ru

Evgeniia D. Milshteyn

PhD (Geology and Mineralogy), Leading Geophysicist,
Department of Deep Geophysical Studies

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0000-0003-3618-6348>

RSCI SPIN-code 5197-7487

Evgenia_Milshteyn@karpinskyinstitute.ru

Евгений Александрович Андросов

Ведущий геофизик
отдела глубинной геофизики

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0009-0004-7673-4980>

Evgeniy_Androsova@karpinskyinstitute.ru

Evgeniy A. Androsova

Leading Geophysicist, Department
of Deep Geophysical Studies

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0009-0004-7673-4980>

Evgeniy_Androsova@karpinskyinstitute.ru

Сергей Николаевич Кашубин

Доктор геолого-минералогических наук, профессор,
консультант отдела глубинной геофизики

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0009-0001-4211-962X>

SPIN-код РИНЦ 6426-3358

Sergey_Kashubin@karpinskyinstitute.ru

Sergey N. Kashubin

DSc (Geology and Mineralogy), Professor,
Consultant, Department of Deep Geophysical Studies

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0009-0001-4211-962X>

RSCI SPIN-code 6426-3358

Sergey_Kashubin@karpinskyinstitute.ru

Иван Вячеславович Кудрявцев

Руководитель Центра глубинной геофизики

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

<https://orcid.org/0009-0006-0881-8482>

SPIN-код РИНЦ 7812-1507

Ivan_Kudryavtsev@karpinskyinstitute.ru

Ivan V. Kudryavtsev

Head, Department of Deep Geophysical Studies

All-Russian Geological Research Institute of A. P. Karpinsky,
Saint Petersburg, Russia

<https://orcid.org/0009-0006-0881-8482>

RSCI SPIN-code 7812-1507

Ivan_Kudryavtsev@karpinskyinstitute.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 29.10.2024

Одобрена после рецензирования 06.12.2024

Принята к публикации 28.12.2024

Submitted 29.10.2024

Approved after reviewing 06.12.2024

Accepted for publication 28.12.2024