

Гравитационно-геологическая модель района Полярно-Уральского трансекта

Н. П. Костров, К. С. Иванов

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mails: kostrov65@ya.ru; ivanovks55@ya.ru

Поступила в редакцию 14.07.2023 г., принята к печати 15.09.2023 г.

Объект исследования. Район Полярно-Уральского сейсмотрансекта. **Цель.** Построить и рассмотреть новую гравитационную компьютерную модель района Полярно-Уральского сейсмотрансекта, состоящую из 29 слоев и 225 388 ячеек. **Материалы и методы.** Геологические, гравимагнитные и сейсмические данные по Полярно-Уральскому сейсмотрансекту (А.В. Рыбалка и др.), авторский метод моделирования. **Результаты.** Построена новая геолого-геофизическая модель, которая уточняет представления о геологическом строении востока Полярного Урала и фундамента (доюрского основания) западной части Западно-Сибирской плиты вдоль Полярно-Уральского сейсмотрансекта до глубины 15 км. Проведенные нами исследования в целом подтвердили высокое качество работ авторов Полярно-Уральского сейсмотрансекта во главе с А.В. Рыбалкой. Представляемая в статье модель конкретизирует представления о строении земной коры вдоль трансекта. Уточнена геологическая карта фундамента Приуральской части Западно-Сибирской плиты. Так, по карте аномального магнитного поля введены многочисленные массивы серпентинитов; в гранитогнейсах выделены участки различной плотности ($2.67 + 0.06$, $2.67 + 0.02$, $2.67 + 0.09$ г/см³); в северной части карты модель образована четырьмя группами пород плотностью $2.67 + 0.12$, $2.67 + 0.05$, $2.67 + 0.06$ и $2.67 + 0.08$ г/см³; эта же формация к юго-востоку от трансекта смоделирована породами плотностью $2.67 + 0.19$, $2.67 + 0.06$, $2.67 + 0.14$, $2.67 + 0.06$, $2.67 + 0.04$ г/см³. Также введены граниты габбро-гранитной формации, расположенные в основном севернее Салехарда, к ним с северо-запада и юго-востока примыкают эффузивы кайнотипного облика (преимущественно базальты) триаса. Введены габбро и неизмененные гипербазиты в юго-восточной части карты. **Выводы.** Построена плотностная 3D-модель в окрестности Полярно-Уральского сейсмотрансекта с привлечением карты аномального магнитного поля. Уточнена геологическая карта района.

Ключевые слова: гравитационное поле, сейсмопрофиль, гравитационное компьютерное моделирование, геодинамика, глубинное строение, Урал, Западная Сибирь

Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН по государственной бюджетной теме лаборатории региональной геологии и геотектоники (тема № 123011800014-3)

Gravitationally-geological model of the Polar Urals transect

Nick P. Kostrov, Kirill S. Ivanov

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st.,
Ekaterinburg 620110, Russia, e-mails: kostrov65@ya.ru; ivanovks55@ya.ru

Received 14.07.2023, accepted 15.09.2023

Research subject. The Polar Urals seismic transect area. **Aim.** To develop and consider a new gravitational computer model of the Polar Urals seismic transect, containing 29 layers and 225,388 cells. **Methods.** Geological, gravity and magnetic, and seismic data on the Polar Urals seismic transect (A.V. Rybalka et al.); the authors' modeling method. **Results.** A new geological and geophysical model was developed. This model refines the existing ideas on the geological structure of the Polar Urals and the basement (Pre-Jurassic basement) of the Western part of the West-Siberian plate along the Polar Urals seismic transect to the depth of 15 km. Our studies have confirmed the high quality of works on the Polar Urals seismic transect headed by A.V. Rybalka. The developed model gives a more detailed representation of the structure of the Earth crust along the transect. The geological map of the basement of the Pre-Urals part of the West-Siberian plate was refined. Thus, according the geomagnetic map, we included numerous arrays of serpentinite; in granite-gneiss, we allocated different density areas ($2.67 + 0.06$, $2.67 + 0.02$, $2.67 + 0.09$ g/cm³); in the North part of the map, the model consist of four

Для цитирования: Костров Н.П., Иванов К.С. (2024) Гравитационно-геологическая модель района Полярно-Уральского трансекта. *Литосфера*, 24(4), 587-608. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-587-608>

For citation: Kostrov N.P., Ivanov K.S. (2024) Gravitationally-geological model of the Polar Urals transect. *Lithosphere (Russia)*, 24(4), 587-608. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-587-608>

group of the rock of different density $2.67 + 0.12$, $2.67 + 0.05$, $2.67 + 0.06$ and $2.67 + 0.08$ g/cm³; this formation to the Source-East of the transect is modeled by rocks with density $2.67 + 0.19$, $2.67 + 0.06$, $2.67 + 0.14$, $2.67 + 0.06$, $2.67 + 0.04$ g/cm³. We also introduced granite of the gabbro-granite formation mainly northward of the city of Salekhard. Cenotypal effusive Triassic rocks (mainly basalt) join to them from North-West and Source-East. In the Source-East corner of the map we introduced gabbro and unweathered ultrabasite. *Conclusion.* A 3D density model in the vicinity of the Polar Urals seismic transect using an anomalous magnetic map was developed. The geological map of the region was clarified.

Keywords: *gravitational field, seismic profile, gravitational computer modeling, geodynamics, deep structure, Urals, West-Siberia*

Funding information

The research was carried out as part of the IGG UB RAS State assignment (state registration No. 123011800014-3)

Acknowledgements

The authors express their gratitude to doctor of physico-mathematical sciences A.S. Dolgal for discussion of the article and useful comments.

ВВЕДЕНИЕ

Полярно-Уральский трансект (ПУТ) является третьим и, по всей видимости, уже последним современным сейсмическим разрезом, выполненным вкрест простираения Уральского складчатого пояса. Он дополняет ранее выполненные трансекты Уралсейс-95 на севере Южного Урала (по линии Стерлитамак–Магнитогорск–Николаевка (Глубинное строение..., 2001; и др.)) и на Среднем Урале (СУТ, международное название ESRU (Рыльков и др., 2013; и др.)) через Уральскую сверхглубокую скважину СГ-4. Главной задачей всех трех сейсмотрансектов через Урал было получить объемную модель строения Урала, что, очевидно, важно и для адекватной оценки металлогении региона. Значение этих сейсмопрофилей трудно переоценить, это “золотой фонд” уральской геофизики, и к данным, полученным в результате их проведения, будут многократно обращаться в течение очень продолжительного времени.

ПУТ выполнен на Полярном Урале в течение трех лет, в 2006–2008 гг. Основным исполнителем работ на Полярно-Уральском трансекте было ОАО “Баженовская геофизическая экспедиция”, сотрудники которой (А.В. Рыбалка и др.) выполнили сейсморазведку МОВ-ОГТ и комплексную интерпретацию материалов. Субподрядные работы проводились следующими организациями: ООО “Северо-Запад” – электроразведочные работы АМТЗ, МТЗ, ГМТЗ; Институт геологии и геохимии УрО РАН – геохимические и геохронологические исследования (группа Ю.Л. Ронкина); ГФУП “ВНИИГеофизика” – исследования методами ГСЗ, МПВ, МОВЗ, этой же организацией проводились буровзрывные работы для ГСЗ-МПВ.

По результатам исследований на Полярно-Уральском трансекте в 2010 г. на восточном окончании ПУТ начато бурение Янгиюганской параметрической скважины. Проектная глубина скважи-

ны – 4000 м, фактическая – 4097 м. Основной задачей бурения скважины ставилось выяснение природы и флюидонасыщения зоны повышенной электропроводимости, связанной с областью высокой отражательности и проводимости в средней коре (Рыбалка и др., 2011). Результаты бурения этой скважины представлены в работах (Горбачев и др., 2013; Угрюмов, Воронов, 2014; Иванов и др., 2016; Бочкарев и др., 2022; и др.).

В фондах существует объемный отчет по объекту “Полярно-Уральский трансект” (Отчет партии ГСЗ за 2006–2008 гг.). Его авторы (А.В. Рыбалка и др.) также опубликовали свои результаты в ряде статей (Золотов и др., 2008; Куликов, Яковлев, 2008; Rybalka et al., 2011; Костюченко и др., 2012; Рыльков и др., 2013; и др.), из которых главной является статья (Рыбалка и др., 2011). Но весьма обширная фактура, полученная при проведении Полярно-Уральского трансекта, остается в основном “за кадром” и геолого-геофизическая общественность знакомится главным образом лишь с выводами, сделанными этими исследователями. Часто при этом бывает не вполне понятно, что же действительно было установлено, а что лишь в той или иной мере является обоснованными предположениями авторов трансекта. Поэтому нами предпринята (с использованием иных методических приемов, часть из которых авторские (Kostrov, 2007; Костров, Иванов, 2017)) новая интерпретация профиля, аппроксимирующего Полярно-Уральский трансект, которая облегчалась и тем, что К.С. Иванов был одним из рецензентов отчета по работам по трансекту и имел возможность при этом детально ознакомиться с весьма обширными исходными экспериментальными данными.

Полярно-Уральский трансект имеет протяженность 300 км и пересекает все главные структуры Урала. Ширина полосы сопутствующих исследований вдоль линии профиля составляла около 50 км.

Глубина изучения декларировалась авторами ПУТ как 70 км, впрочем, очевидно, что с увеличением глубины достоверность результатов и выводов закономерно снижается.

Западная граница трансекта располагается в Предуральском прогибе, далее на восток ПУТ пересекает пакеты батинальных (преимущественно кремнисто-терригенных) пластин Лемвинского аллохтона, Харбейский антиклинорий метаморфических толщ, Войкарский вулканогенный синклиний и Восточно-Уральскую мегазону, перекрытую чехлом мезозойско-кайнозойских осадков Западно-Сибирской плиты.

В результате работ отмеченных выше коллективов по объекту ПУТ создана глубинная геолого-геофизическая модель Полярного Урала в сечении опорного геолого-геофизического профиля – “Полярно-Уральский трансект”, состоящий из глубинной сейсмической модели (набора сейсмических разрезов, отражающих положение основных сейсмических границ в земной коре), глубинной геоэлектрической модели (разреза, отражающего положение геоэлектрических границ и областей аномально высокой проводимости в земной коре и верхней мантии) и комплексной геолого-геофизической модели, учитывающей как вновь полученные данные, так и многочисленные ранее существовавшие геолого-геофизические материалы, в первую очередь данные геологического картирования (Государственная..., 2005а, б; 2008; и др.).

Одним из примечательных результатов ПУТ (Рыбалка и др., 2011; и др.) стало то, что наиболее выразительные элементы разреза МОВ-ОГТ (осадочный чехол и наклонные отражатели преимущественно тектонической природы в пределах “открытого” Урала) практически никак не отобразились на разрезах ГСЗ и МОВЗ. Более того, в складчато-надвиговой области западного (палеоконтинентального) сектора Урала все системы отражателей различного, в том числе и крутого, падения и все объекты различной глубины залегания и возраста сечет практически горизонтальная граница K_1 (Рыбалка и др., 2011; и др.). Таким образом, эта граница не имеет ничего общего с геологической структурой верхней части разреза (детальнее см. (С.Н. Иванов, К.С. Иванов, 2018)). Похожая картина складывается и на больших глубинах (Рыбалка и др., 2011; Рыльков и др., 2013; и др.). И хотя в средней и нижней коре, как правило, отсутствуют крутонаклонные отражающие границы, тем не менее и здесь в большинстве случаев субгоризонтальные границы ГСЗ секут пологонаклонные отражающие границы или области смены отражательности, фиксируемые на разрезе МОВ. Сопоставление разреза ГСЗ и МОВЗ также свидетельствует о том, что границы ГСЗ более пологие, чем границы МОВЗ.

МЕТОДИКА РАБОТ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наши основные усилия в рамках этой работы сосредоточены преимущественно на восточной части ПУТ, поскольку в пределах “открытого” Урала, покрытого кондиционными государственными геологическими картами разных масштабов, геолого-геофизическая изученность все же гораздо лучше, чем у фундамента Западно-Сибирской плиты. Восточная часть Войкарской зоны и все более восточные палеозойско-триасовые структуры, пересекаемые ПУТ, перекрыты неконсолидированными мезокайнозойскими осадками Западно-Сибирского мегабассейна. Наиболее выразительно на разрезе МОВ-ОГТ видна граница осадочного чехла с подстилающим фундаментом. В целом, по сейсмическим данным, фундамент монотонно погружается на восток до глубин 2 км у восточного окончания ПУТ (Рыбалка и др., 2011; и др.). Местами в поверхности фундамента (доюрского основания) проявляются синформные или грабенообразные погружения.

В самом верху разреза выделяется осадочный чехол, причем принципиально отличающийся по мощности и строению для западной Предуральской и восточной Западно-Сибирской частях. На “открытом” Урале в верхней части разреза (около 10 км) проявляется реологически хрупкая консолидированная верхняя кора с интенсивными крутопадающими отражателями внутри нее (Рыльков и др., 2013). Аномально повышенная отражательность с субгоризонтальными отражающими зонами в средней коре зафиксирована лишь под Центрально-Уральским поднятием. Выразительная отражательность в нижней коре проявляется лишь под Восточно-Уральским поднятием. Под всем “открытым” Уралом какая-либо заметная отражательность в нижней коре отсутствует. Под Предуральским прогибом признаки отражательности в нижней коре присутствуют, но они едва заметны, нижнекоревая отражательность здесь радикально менее интенсивна, чем под Восточно-Уральским поднятием. Граница затухания нижнекоревой отражательности, интерпретируемая обычно как граница Мохо, может быть прослежена более-менее уверенно лишь в восточной части разреза, т. е. в пределах Западно-Сибирской плиты (Рыбалка и др., 2011).

Кроме авторов ПУТ, его интерпретацией занимались и другие исследователи. Так, В.В. Юдиным и Д.Н. Ремизовым (2014) опубликована “сбалансированная геодинамическая модель по профилю ПУТ”. Однако эта двумерная модель (2D), представлена только в виде тезисов, а главное, построена в области, в которой 2D-модели гравитационного поля не применимы в принципе (детальнее см. ниже).

В.С. Дружинин с коллегами (2014) изобразили ПУТ в виде отрезка прямой линии на тектонической карте масштаба 1 : 10 000 000. Однако это не соответствует фактической линии проведения ПУТ: так, населенные пункты, изображенные на рис. 1 в работе (Рыбалка и др., 2011), дают ясное понимание того, что сейсмический профиль идет с запада на восток около 70 км и проходит вблизи населенных пунктов Елецкий и Полярный, а затем поворачивает на ЮВ примерно на 35°.

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ

Авторский метод моделирования геофизических полей описан в работе (Kostrov, 2007), система моделирования приведена в статье (Костров, Иванов, 2017). Этот метод включает как 2D-, так и 3D-моделирование. Изначально, основываясь на двумерных сейсмических моделях (Рыбалка и др., 2011; Рыльков и др., 2013; и др.), мы пытались применить 2D-моделирование. Но в результате лишь убедились в неприменимости этого подхода вблизи ПУТ. На карте аномального гравитационного поля данного региона также можно видеть, что данное поле даже не напоминает поле от двумерных структур (например, подобное полю вдоль линии, аппроксимирующей Средне-Уральский трансект в диапазоне 185–245 км (Иванов, Костров, 2017)).

3D-моделирование заключается в стандартном разбиении объекта на ряд элементарных ячеек – параллелепипедов, в надделении каждого параллелепипеда определенными свойствами (в данном случае плотностью) и подсчете суммарного влияния от каждого параллелепипеда в конкретной точке. Изменяя параметры параллелепипедов определенным образом, мы получаем модельное поле с той или иной точностью (см. рис. 2). Формально существует бесконечно много моделей, удовлетворяющих наблюдаемому гравитационному полю. Поэтому мы при подборе опирались на ограничения, которые следуют из геологических представлений о том или ином объекте. Конечно, из-за неполноты наших знаний приходилось придерживаться общих принципов, используя в том числе геологические данные по данному региону (Перфильев, 1968; Язева, Бочкарев, 1984; Иванов и др., 2003, 2014, 2017, 2018, 2021; Кузнецов и др., 2006; Ананьева и др., 2008; Литосфера..., 2008; Основные черты..., 2010; Пыстин, Пыстина, 2015; Вахрушева и др., 2017; Пучков, Иванов, 2020) и геологические гипотезы.

Для моделирования гравитационного поля мы использовали сводную гравиметрическую карту масштаба 1 : 200 000, которая построена в редукции Буге в условном уровне при плотности промежуточного слоя, общепринятой для Урала, – 2.67 г/см³ и сечением изоаномал 2.0, 1.0 и 0.5 мГал в зависимости от масштаба использованных съе-

мок (Отчет партии ГСЗ за 2006–2008 гг.). В западной и восточной частях трансекта, где мезозойско-кайнозойские осадки перекрывают структуры кристаллического фундамента, плотность промежуточного слоя близка к 2.30 г/см³. Искажения гравитационного поля при этом для западной части региона исследований (абсолютные отметки гипсометрического поля здесь изменяются от 100 до 180 м) составят 1.5–2.8 мГал, в восточной части абсолютные отметки дневного рельефа – 10–70 м, искажения гравитационного поля будут составлять 0.15–1.1 мГал (Отчет партии ГСЗ за 2006–2008 гг.), что практически не повлияло на результат моделирования: разностное гравитационное поле (невязка подбора) имеет амплитуду от –3 до 3 мГал (что составляет 5% от размаха наблюдаемого поля).

Таким образом, мы пользуемся общепринятыми значениями плотности промежуточного слоя, методику определения которой дана, например, в работе (Долгаль, 2012).

Модель

ПУТ начинается на западе, в районе 67°03'11" с. ш. 63°04'40" в. д. (пос. Сейда). Система координат (рис. 1) повернута на –0.6083442 радиана относительно точки (11601378.43, 7442028.43) вблизи пос. Полярный, GPS координаты точки N67°3'23.58", E65°21'14.3676"). В этой точке ПУТ поворачивает к юго-востоку (см. врезку на рис. 1). Таким образом, ось X направлена на юго-восток, ось Y лежит в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси X, а ось Z направлена вверх.

В горизонтальной плоскости XOY размеры ячеек одинаковые, 1800 на 1800 м. Поскольку разрешающая способность метода постепенно уменьшается с глубиной, то и размер по оси Z меняется: в слоях от –2200 до 0 м составляет 200 м, от –7200 до –2200 м – 500 м, от –8000 до –7200 м – 800 м, с –15 000 до –8000 м – 1000 м. Количество ячеек в каждом слое 7772. Плотность каждой ячейки считается постоянной.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Далее используем только $\Delta\sigma$, т. е. эффективную плотность. На следующих рисунках показаны, кроме плотности, изображенной цветом в соответствии с рис. 2г, контуры пород геологической схемы, модифицированной нами.

На рис. 3 можно видеть резкую границу между структурами фундамента и осадочным комплексом ($\Delta\sigma = -0.47$ г/см³). По картам слоев модели (см. рис. 3) видно понижение осадочного комплекса с СЗ на ЮВ до –2000 м. При построении модели уже было известно, что рельеф фундамента понижается от СЗ на ЮВ, поэтому границы осадочного чехла на рис. 3 лишь подчеркивают этот факт и впослед-

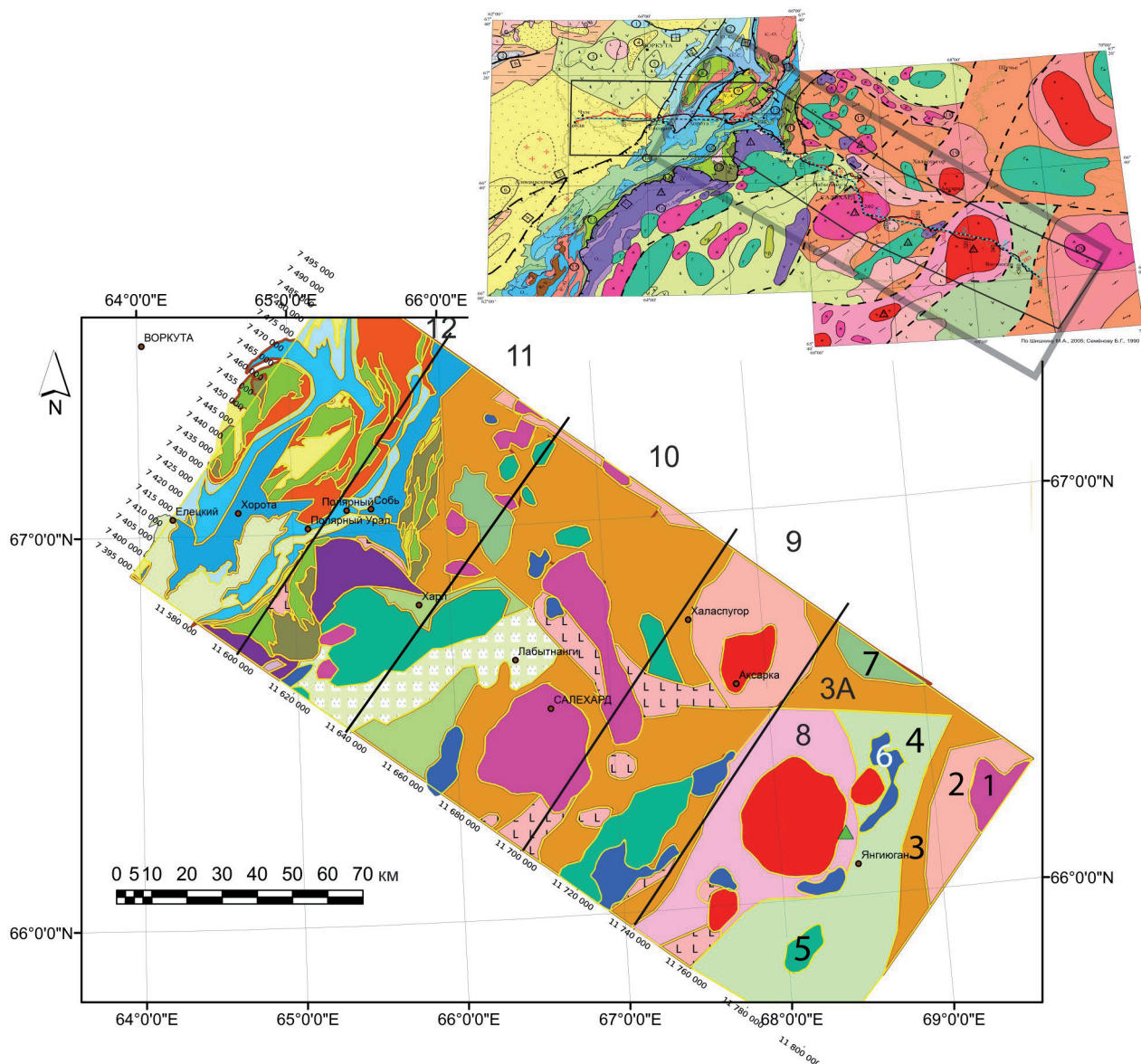


Рис. 1. Схема складчатого фундамента, модифицированная авторами согласно наблюдаемому гравитационному полю.

Вверху – врезка по М.А. Шишкину и Б.Г. Семенову (Семенов и др., 1990), на которой голубыми точками отмечен ПУТ. Жирной черной линией показана область исследования сеймопрофиля ПУТ, жирной серой линией – область данного исследования. Для удобства моделирования выполнен поворот этого рисунка на -0.6083442 радиана ($-34^{\circ}51'36''$) относительно точки (11601378.43, 7442028.43), расположенной вблизи пос. Полярный. Подписи внизу – X- и Y-координаты после поворота в метрах. Вверху, для удобства описания, помечены прямоугольные зоны 9–12 и объекты 1–8 в юго-восточной части карты.

Fig. 1. The scheme of the folded basement modified by authors according to gravity field is shown.

Overhead the inset by M.A. Shishkin and B.G. Semyonov (Semenov et al., 1990) is shown on which PUT is shown by blue points. The bold black line shows the area of study of the PUT seismoprofile, the bold gray line shows the area of current study region. For modeling convenience the drawing was rotated by -0.6083442 radians ($-34^{\circ}51'36''$) relatively the point (11601378.43, 7442028.43) situated nearby to Polyarny town. Subscriptions around the map rectangle are X and Y coordinates after rotation in meters. Above for convenience a rectangular areas 9–12 are marked as well as objects 1–8 in the Source-East part of the map.

ствии могут быть уточнены с учетом новых буровых, сейсмических и других данных.

Исходная (Рыбалка и др., 2011) геологическая схема складчатого фундамента (доюрского осно-

вания) существенно доработана нами. В частности, по наблюдаемому аномальному магнитному полю введены массивы серпентинитов и массив гранитов габбро-гранитной формации (см. центральную

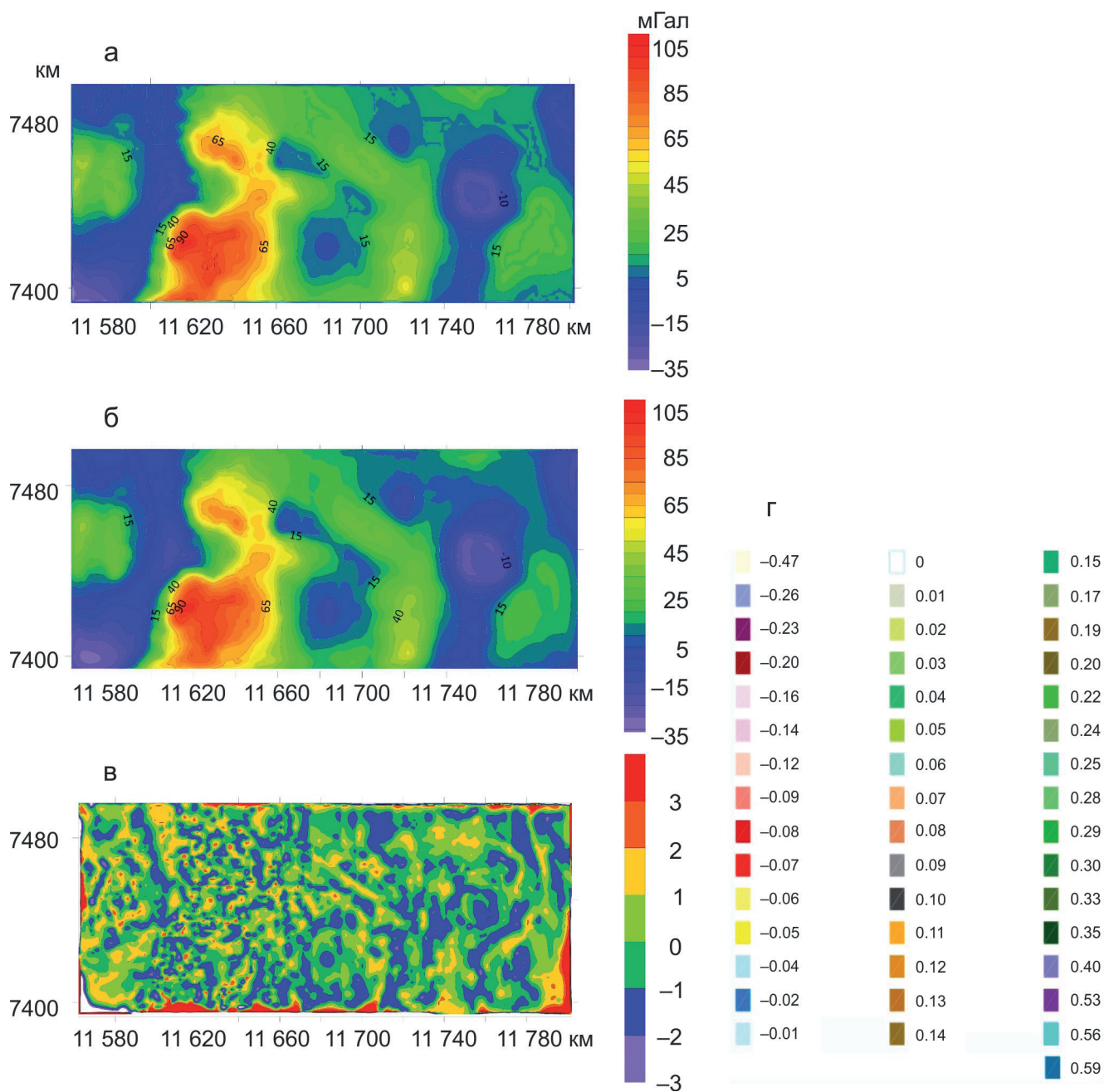
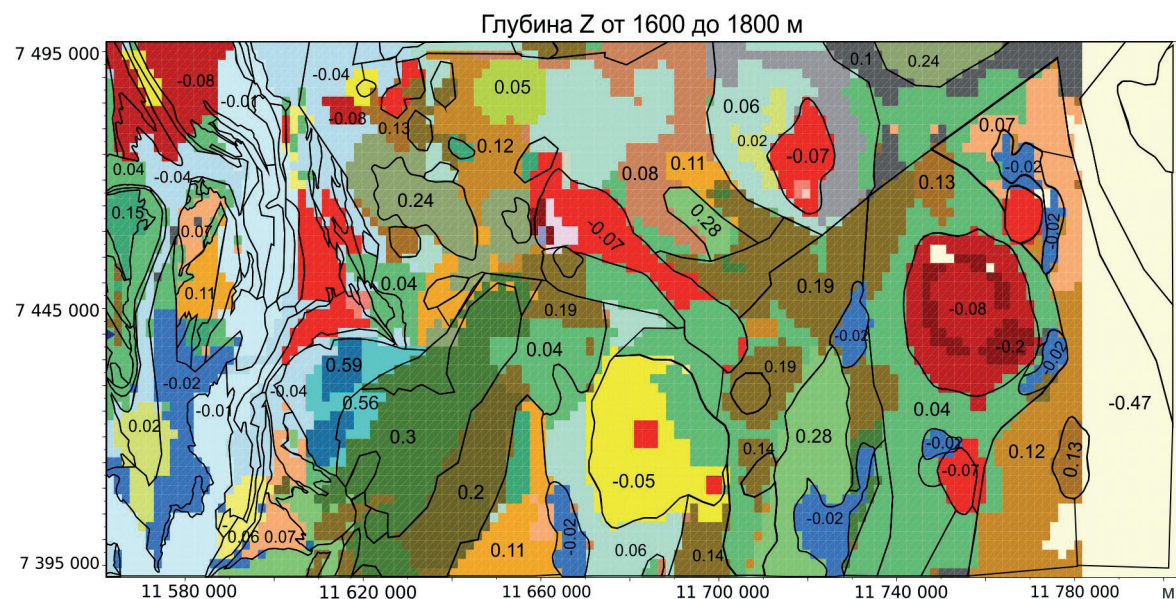
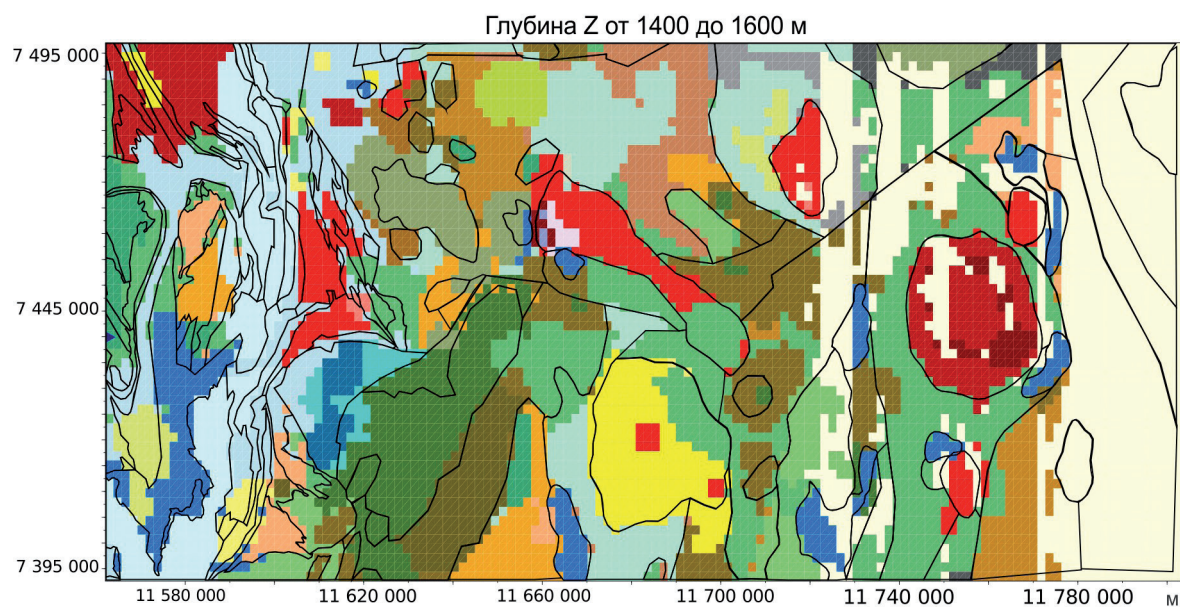
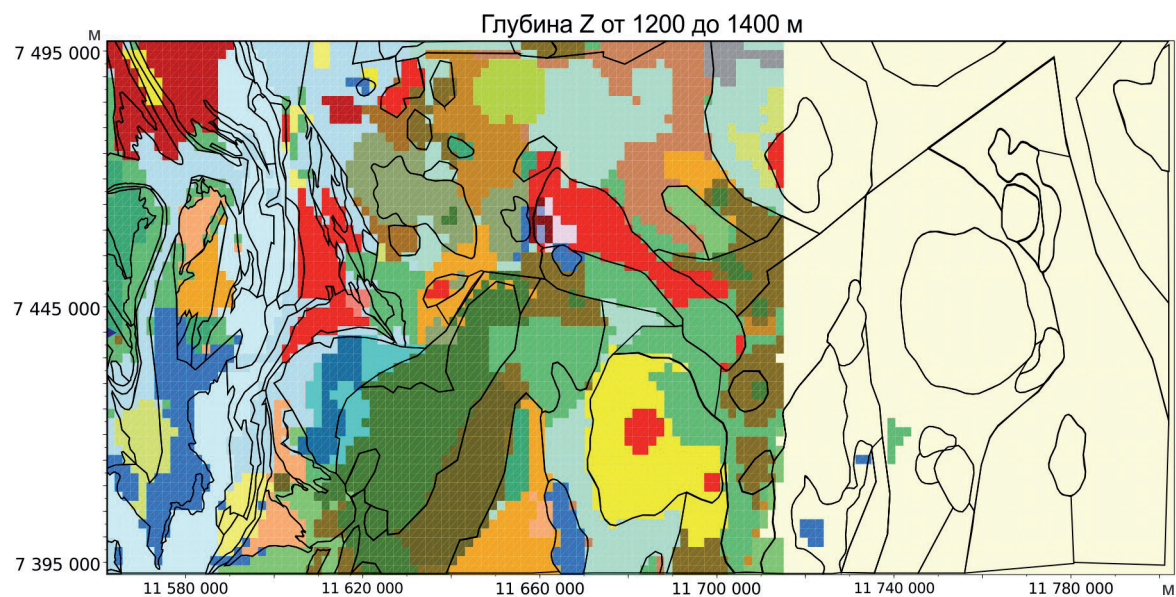


Рис. 2. Наблюдаемое (а), модельное (б) и остаточное (в; $v = a - б$) гравитационное поле и цветовая шкала эффективной плотности горных пород $\Delta\sigma$ (г), использованных при моделировании (плотность = $2.67 + \Delta\sigma$ г/см³, 2.67 г/см³ – опорное значение плотности).

Fig. 2. The observed (a), the model (б) and residual (в; $v = a - б$) gravitational map and a color scale of rock effective density $\Delta\sigma$ (г) used in the modeling (density = $2.67 + \Delta\sigma$ g/cm³, 2.67 g/cm³ – reference density).

и ЮВ часть на рис. 1). Изменена форма гранитных тел согласно изолиниям аномального магнитного поля. Кроме того, моделирование показало, что гнейсы, преимущественно повышенной плотности, разбиваются на ряд отдельных структур. Эти гнейсы разные (см. рис. 3, Z от -1800 до -1600 м): в верхней части модели, от $Y = 7\,495\,000$ м и прак-

тически до середины планшета, $Y = 7\,455\,000$ м, преобладают гнейсы преимущественно повышенной плотности, представленные породами с $\Delta\sigma = 0.05, 0.06, 0.08, 0.11$, а ниже, т. е. $Y < 7\,455\,000$ (см. рис. 3), – породами с $\Delta\sigma = 0.06, 0.19$. На рис. 4 и 5 можно увидеть, что гнейсы, преимущественно повышенной плотности, плотностью $\Delta\sigma = 0.06$,



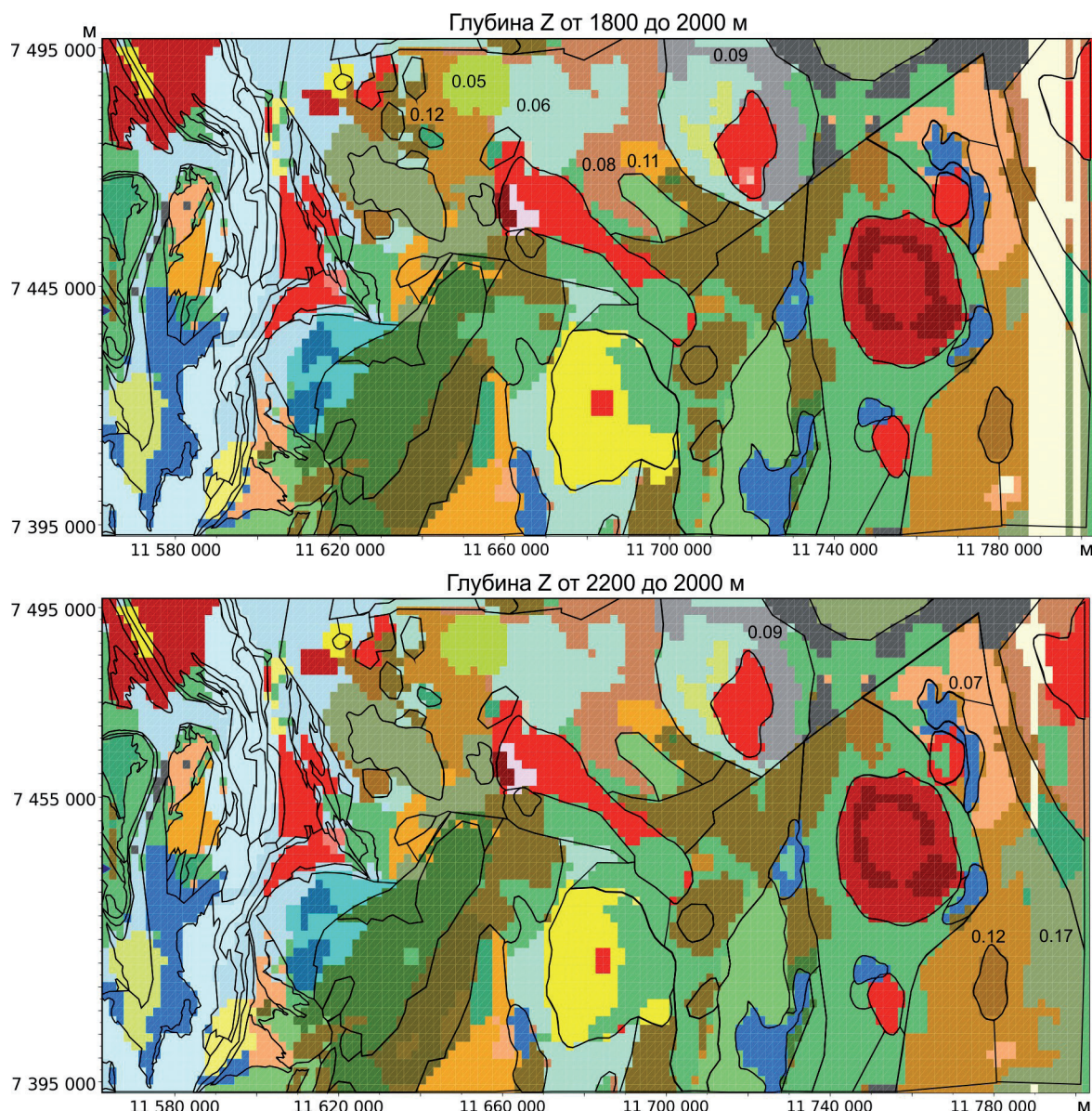


Рис. 3. Горизонтальные срезы геоплотностной модели в интервале глубин Z от 1200 до 2200 м.

Цифрами показана эффективная плотность пород $\Delta\sigma$.

Fig. 3. Horizontal strata of the geo-density model in the range of depth 1200 to 2200 m.

By digits shown relative density of rocks $\Delta\sigma$.

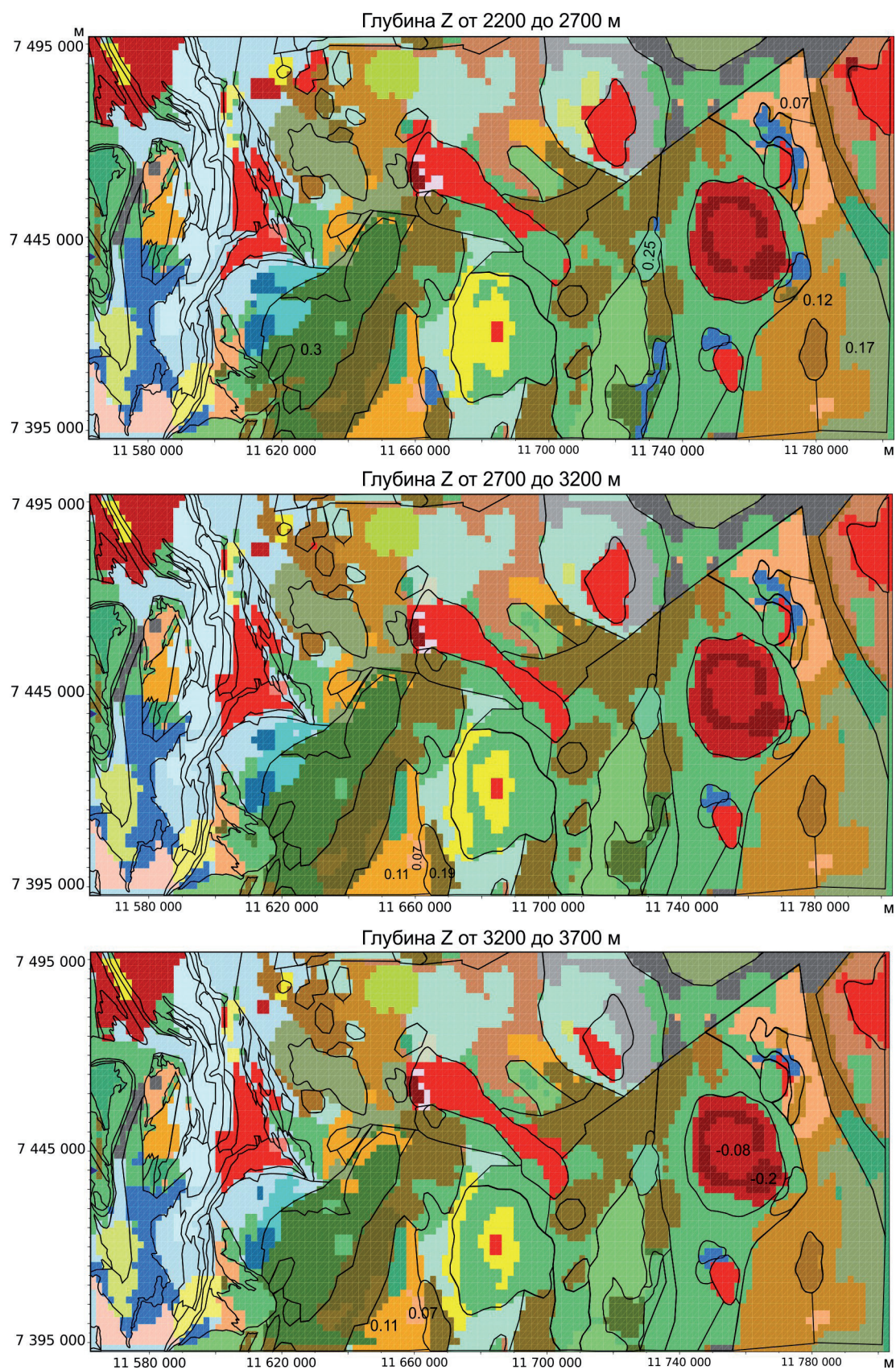
занимая обширную площадь, до нижней границы модели –15 000 м, тогда как прилегающие к ним гнейсы плотностью $\Delta\sigma = 0.05$ доходят до –5200 м.

Структуры Урала, расположенные в северо-западной части модели (слева на планшете рис. 2, отрицательная гравитационная аномалия), представлены главным образом легкими породами (голубой цвет на рис. 3–5), что резко отличает их на всем протяжении модели вниз, по оси Z , т. е. в глубину, от других объектов. Кроме того, в области Урала до глубин 15 000 м можно просле-

дить легкие породы плотностью $\Delta\sigma = -0.07$, изображенные красным цветом, отмеченные на геологической схеме (см. рис. 1) как граниты. Хотя, как известно, граниты обычно столь далеко в глубину не идут, а имеют более-менее “блиноподобную” форму.

Для удобства описания модели на рис. 1 числами (от 1 до 12) помечены с юго-востока на северо-запад районы карты, о которых идет речь:

- массив габбро-гранитовой формации 1
- гранитогнейсы 2



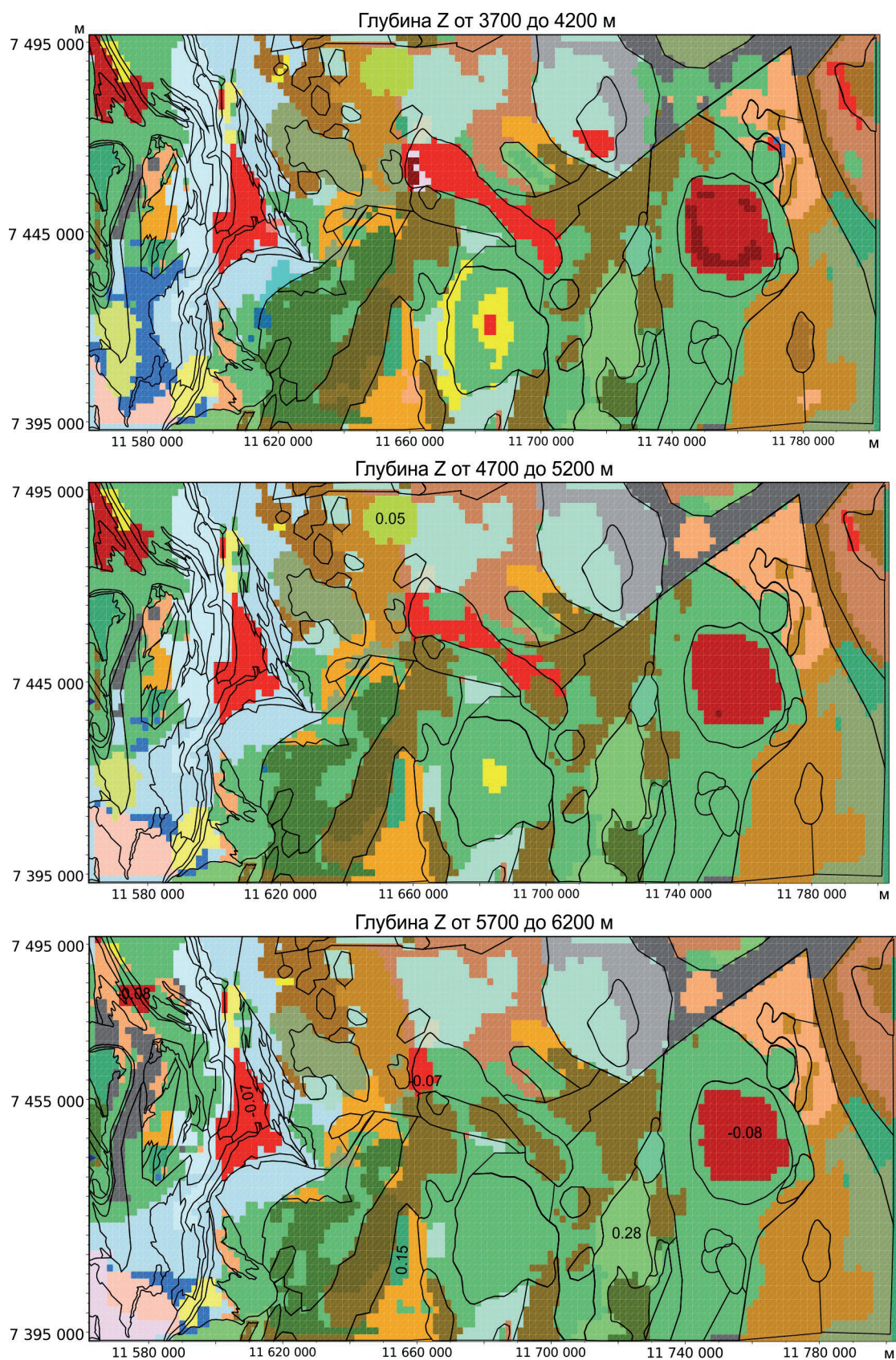
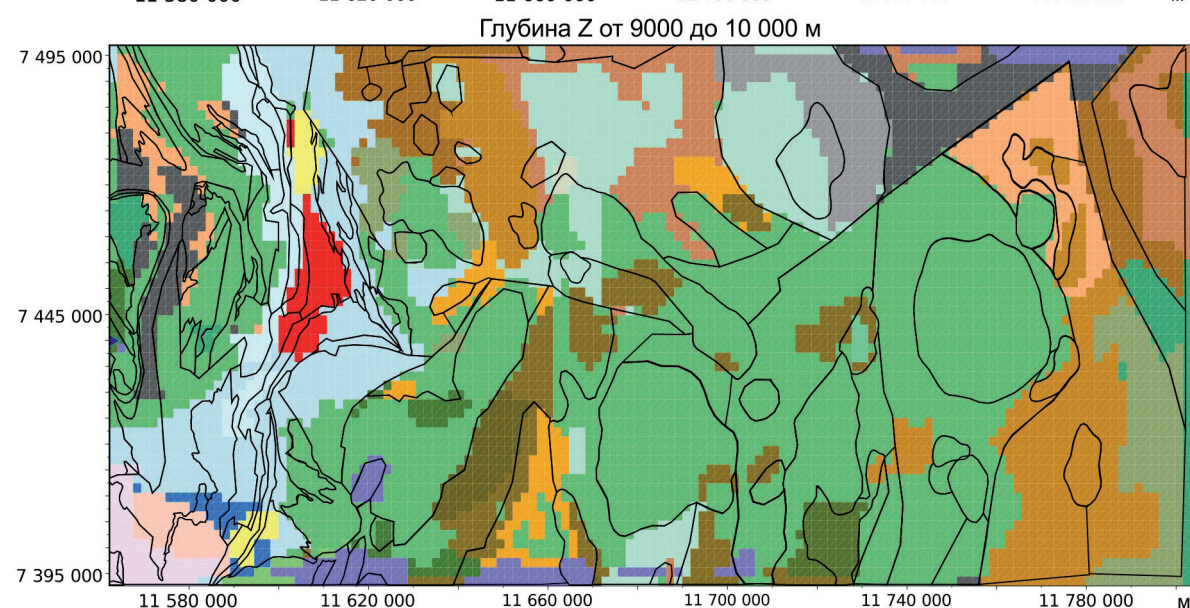
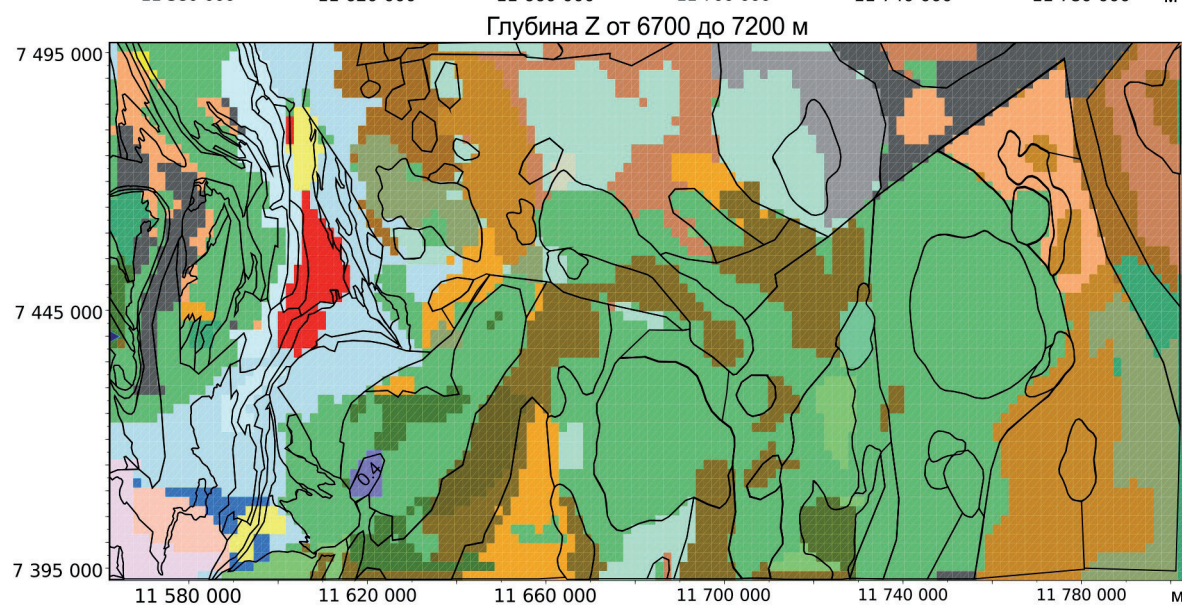
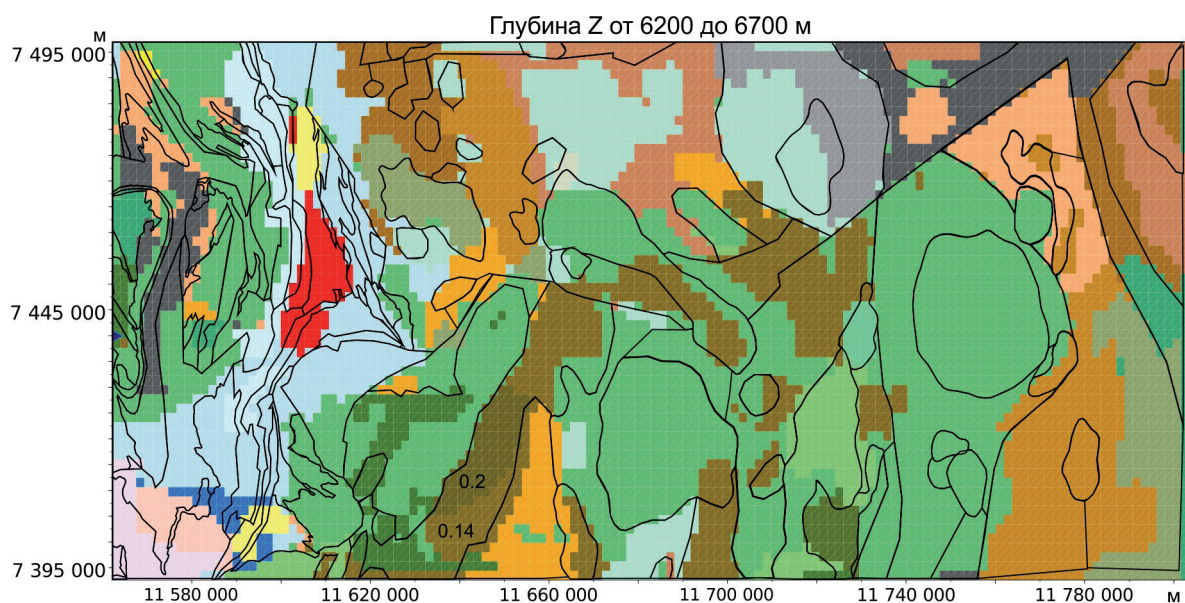


Рис. 4. Горизонтальные срезы геоплотностной модели в интервале глубин от 2200 до 6200 м.

Fig. 4. Horizontal strata of the geo-density model in the range of depth from 2200 to 6200 m.



гранитов ($\Delta\sigma = -0.07$). Серпентиниты отсутствуют на геологической карте (см. рис. 1, верхняя часть), но четко проявляются в магнитном поле.

7. **Массивы габбро-амфиболитов ($\Delta\sigma = 0.24$)** проявляются под осадочным чехлом с глубины 1400 м (см. рис. 3) и прослеживаются до глубины –4700 м (см. рис. 4).

8. **Сланцевый комплекс, преимущественно по осадочным породам включающий в себя тела гранитов и серпентинитов.** Сланцы комплекса ($\Delta\sigma = 0.04$) охватывают граниты ($\Delta\sigma = -0.08, -0.2, -0.07$) и серпентиниты ($\Delta\sigma = -0.02$). Также обращают на себя внимание не отмеченные на геологической карте породы с $\Delta\sigma = 0.13$ (см. рис. 3, Z от –1800 до –1600 м), идущие с 1800 до 6200 м (см. рис. 3, 4) севернее массива гранитов. Граниты (-0.08) внутри этого комплекса проявляются с 1400 м (см. рис. 3) и идут до глубины 6200 м (см. рис. 4). С 1600 м видны породы с $\Delta\sigma = -0.2$, внутри этого гранитного массива, которые распространяются до глубины 4700 м (см. рис. 4). Ниже, с 6700 до 7200 м, модель представлена породами с $\Delta\sigma = 0.04$ (см. рис. 5), под которыми в юго-восточной части этого комплекса с глубины 7200 км (см. рис. 5) до нижней границы модели проявляются породы с $\Delta\sigma = 0.12$. Серпентиниты на юго-востоке граничат с массивом гранитов и прослеживаются с глубины 1400 (см. рис. 3) до 2700 м (см. рис. 4). Серпентиниты, расположенные юго-западнее данной формации, идут до глубины 3700 м (см. рис. 4). С юга к ним примыкают граниты ($\Delta\sigma = -0.07$) с глубины 1400 до 3700 км.

9. (**11 700 < X < 11 740 км**) На границе блока гранитогнейсов расположено с. Халаспугор (66°43'56" с. ш., 67°31'35" в. д.; см. рис. 1), а рядом, внутри комплекса гранитов, – с. Аксарка (66°33'32" с. ш., 67°48'13" в. д.). На геологической карте отмечены комплекс гранитогнейсов и расположенные внутри него граниты ($\Delta\sigma = -0.07$; см. рис. 1).

Гранитогнейсы, по результатам моделирования, образуют четыре области (см. рис. 3; Z от –1800 до –1600 м): примыкающие с запада от гранитов две области плотностью $\Delta\sigma = 0.02$ и область плотностью $\Delta\sigma = 0.06$. К востоку и северо-востоку от гранитов лежит область плотностью $\Delta\sigma = 0.09$, за ней к востоку – область плотностью $\Delta\sigma = 0.04$, идущая до глубины 4700 м.

Структура гранитогнейсов ($\Delta\sigma = 0.06$) к северу и западу от массива гранитов моделируется до глубины 15 000 м, а объекты плотностью $\Delta\sigma = 0.02$ – до глубины 3700 м (см. рис. 4). С востока и северо-востока от гранитов, незначительно изменяясь, до нижней границы модели (15 000 м) идет комплекс плотностью $\Delta\sigma = 0.09$, а с глубины 4.7 км он полностью лежит в границах гранитогнейсов.

К юго-западу от гранитогнейсов (см. рис. 1) четко выделяются габбро и неизменные гиперба-

зиты ($\Delta\sigma = 0.28$), идущие до глубины 8000 м (см. рис. 3, рис. 4).

Комплекс эффузивов кайнотипного облика (преимущественно базальты и долериты триаса) в указанном диапазоне (11 700¹ < X < 11 740 км) представлен породами с $\Delta\sigma = 0.19$ и 0.14, постепенно исчезающими на глубине 8000–10 000 м.

Гнейсы, преимущественно повышенной плотности, в данном диапазоне (от 11 700 до 11 740 км; см. рис. 3) образуют следующие группы пород: $\Delta\sigma = 0.04, 0.19, 0.08, 0.11$.

Комплекс габбро и неизменных гипербазитов ($\Delta\sigma = 0.28$; см. рис. 3) практически исчезает на глубине 7200 км (см. рис. 5). С юго-востока, а также с севера-северо-востока от него смоделированы массивы серпентинитов ($\Delta\sigma = -0.02$), выделенные по карте аномального магнитного поля, до глубин порядка 2200 м.

10. (**11 640 < X < 11 700 км**). Этот район содержит граниты габбро-гранитной формации, следующие с северо-запада на юго-восток; гнейсы, преимущественно повышенной плотности, занимающие преимущественно северную часть карты; эффузивы основного состава (крупный поселок Лабитнанги 66°39'29" с. ш., 66°23'02" в. д., находится внутри этого комплекса); эффузивы смешанного состава (у юго-восточной границы карты, см. рис. 1); граниты габбро-гранитной формации (г. Салехард, 66°32' с. ш., 66°38' в. д. расположен в северной части этой формации – см. рис. 1); эффузивы кайнотипного облика (преимущественно базальты триаса) севернее Салехарда (см. рис. 1) и южнее гранитов габбро-гранитной формации (на юго-восточной границе карты); относительно мелкие тела серпентинитов.

Рассмотрим Z от –1800 до –1600 м (см. рис. 3) в указанном диапазоне изменений X и геологическую карту (см. рис. 1). Видно, что гнейсы, преимущественно повышенной плотности, смоделированы породами различной плотности: $\Delta\sigma = 0.12, 0.05, 0.06, 0.08$ и 0.11. Компактная группа пород плотностью $\Delta\sigma = 0.05$ идет до глубины 5200 м, глубже их сменяют породы с плотностью $\Delta\sigma = 0.12$ (см. рис. 4), которые прослеживаются до нижней границы модели (см. рис. 5). Следующая группа плотностью $\Delta\sigma = 0.06$ (изображена показана голубым цветом) идет с глубины 600 до 15 000 м (см. рис. 3–5). Породы плотностью $\Delta\sigma = 0.08$ граничат с предыдущей группой и проявляются примерно с глубины 800 м. Относительно небольшой массив пород плотностью $\Delta\sigma = 0.11$ моделируется с глубины 800 до 13 000 м.

Гнейсы, преимущественно повышенной плотности, охватывающие с запада граниты габбро-гранитной формации (внутри нее отмечен г. Сале-

¹ Здесь и далее 11 тыс. км – по СК-42, т. е. системе координат Пулково 1942 г.

хард на рис. 1), как видно на рис. 3, имеет плотность $\Delta\sigma = 0.06$ и прослеживается до глубин порядка 5200 км.

Таким образом, гнейсы преимущественно повышенной плотности моделируются группами неоднородных по плотности пород.

В указанной полосе (от 11 640 до 11 700 км) четко виден массив эффузивов смешанного состава (см. рис. 1) плотностью $\Delta\sigma = 0.11$ (см. рис. 3), с северо-востока к которому прилегают серпентиниты ($\Delta\sigma = -0.02$), смоделированные до глубины 2700 м.

На границе карты (см. рис. 3), к югу от массива гранитов габбро-гранитной формации в районе $X = 11\ 700$ км, $Y = 7400$ км, расположено поле эффузивов кайнотипного облика (преимущественно базальтов триаса) плотностью $\Delta\sigma = 0.14$, которые прослеживаются до глубины 9000 м.

Следует обратить внимание на поле эффузивов основного состава (см. рис. 3; $X = 11\ 640$ км, $Y = 7\ 410$ км), модель которого по плотности распадается на три части: $\Delta\sigma = 0.2$ (вытянутая часть), 0.04 и 0.19 (расширенные части) (см. рис. 3; Z от -1800 до -1600 м). Четкое разделение прослеживается до глубины 2000 м. Ниже 2000 м эту часть пород плотностью $\Delta\sigma = 0.04$ заменяют породы плотностью $\Delta\sigma = 0.14$.

В указанный диапазон (от 11 640 до 11 700 км) попадает часть массива габбро и неизменных гипербазитов с $\Delta\sigma = 0.3$ (см. рис. 3; Z от -1800 до -1600 м), расположенная у северо-западной границы рассматриваемого диапазона.

На указанной полосе проявляются массивы гранитов габбро-гранитной формации. В одном из них, наиболее изометричном, расположен г. Салехард (см. рис. 1), а другой, заново введенный нами, на схеме рис. 1 находится севернее и имеет вытянутую форму. Причем наиболее приближенная к "салехардской" часть массива перекрыта с -1200 до -2700 м более тяжелыми породами ($\Delta\sigma = 0.04$). Как видно из верхней врезки на рис. 1, этот массив отсутствует на структурно-тектонической схеме складчатого фундамента в районе ПУТ (Рыбалка и др., 2011). Массив начинается с 400 м и идет до глубины 6200 м (см. рис. 3, 4). "Салехардский" массив с глубин порядка 800 м сложен породами с $\Delta\sigma = -0.05$ и -0.07 . С глубины 5700 км в контурах массива, за исключением небольшой южной части, лежат только породы плотностью $\Delta\sigma = 0.04$ (см. рис. 4, 5).

11. (11 600 < X < 11 640 км), пос. Полярный ($69^{\circ}11'54''$ с. ш., $33^{\circ}27'22''$ в. д.) – пос. Харп ($66^{\circ}48'25''$ с. ш., $65^{\circ}48'12''$ в. д.; см. рис. 1). В этом диапазоне наиболее интересен дунит-гарцбургитовый комплекс, показанный на рис. 1.

Координата 11 600 км пересекает небольшой комплекс базальт-андезит-дацит-риолитовой формации плотностью $\Delta\sigma = 0.07$. Этот комплекс смоделирован от 0 до слоя Z от -2000 до -1800 м (рис. 6, 7). Ниже комплекс моделируется иными породами.

Рядом (см. рис. 7; слой Z от -1800 до -1600 м; $X = 11\ 600$ – $11\ 620$ км, $Y = 7400$ – 7410 км) смоделирована вулканогенно-кремнистая формация (см. рис. 1), имеющая плотность $\Delta\sigma = 0.28$. По модели, эта формация идет с глубины 0 до 2200 м (см. рис. 6, 7). В юго-восточной части этой формации смоделированы породы плотностью $\Delta\sigma = 0.2$ с глубины 800 до 2700 м (см. рис. 6, 7).

Граниты габбро-гранитной формации ($X = 11\ 620$ – $11\ 630$ км, $Y = 7\ 400$ – $7\ 415$ км; см. рис. 1) представляют собой два комплекса пород ($\Delta\sigma = 0.04$; рис. 6, Z от -400 до -200 м), расположенных к востоку от вулканогенно-кремнистой формации ($\Delta\sigma = 0.28$), один комплекс расположен севернее другого, более мелкого, охватывается формацией габбро и неизменных гипербазитов. Северный комплекс смоделирован с 0 до -600 м (см. рис. 6), а южный – с 0 до -800 м. Глубже нижней границы комплексы подстилаются основной породой плотностью $\Delta\sigma = 0.3$ (см. рис. 6). С глубины 6.7 км (см. рис. 9) до нижней границы модели в границах северного комплекса можно видеть породы плотностью $\Delta\sigma = 0.4$ (по всей видимости, габбро-ультрабазиты или эклогиты).

Эффузивы основного состава (см. рис. 1) с юга и востока от габбро и неизменных гипербазитов прилегают к линии $X = 11\ 640$ км (см. рис. 3, 6–9) и состоят из пород плотностью $\Delta\sigma = 0.2$. Однако в юго-восточной части у границы моделирования (см. рис. 1) с глубины 1000 м эта формация представлена породами плотностью $\Delta\sigma = 0.3$. Причем породы с $\Delta\sigma = 0.2$ идут до нижней границы модели – 15 000 м (см. рис. 6–9).

Габбро и неизменные гипербазиты имеют плотность $\Delta\sigma = 0.3$ во всей области распространения этих пород, но, однако, в слое Z от 0 до -200 м и до слоя Z от -800 до -600 м имеют небольшое включение пород плотностью $\Delta\sigma = 0.4$ (см. рис. 6). С глубины 2200 м (см. рис. 7) породы плотностью $\Delta\sigma = 0.3$ уступают место породам плотностью $\Delta\sigma = 0.04$, которые почти полностью сменяют породы плотностью $\Delta\sigma = 0.3$ начиная с глубины 7200–6700 м (см. рис. 9).

Пос. Харп (см. рис. 1) расположен в поле формации эффузивов смешанного состава. Однако моделирование показало, что эта формация состоит (см. рис. 6; Z от -200 до 0 м) из очень тяжелых пород плотностью $\Delta\sigma = 0.56$, 0.3 и 0.17. Слой (см. рис. 6; Z от -200 до -400 м) содержит породы плотностью $\Delta\sigma = 0.3$, что прослеживается до глубины 3.7 км (см. рис. 8), где начинают проявляться породы плотностью $\Delta\sigma = 0.04$, идущие до нижней границы модели.

Дунит-гацбургитовый комплекс сложен главным образом из пород с $\Delta\sigma = 0.53$, 0.59 и 0.56 (см. рис. 6, 7) и на глубине, начиная с 4700 м, полностью заменен легкими ($\Delta\sigma = -0.04$, 0.04) породами (см. рис. 8). Комплекс довольно круто погружается

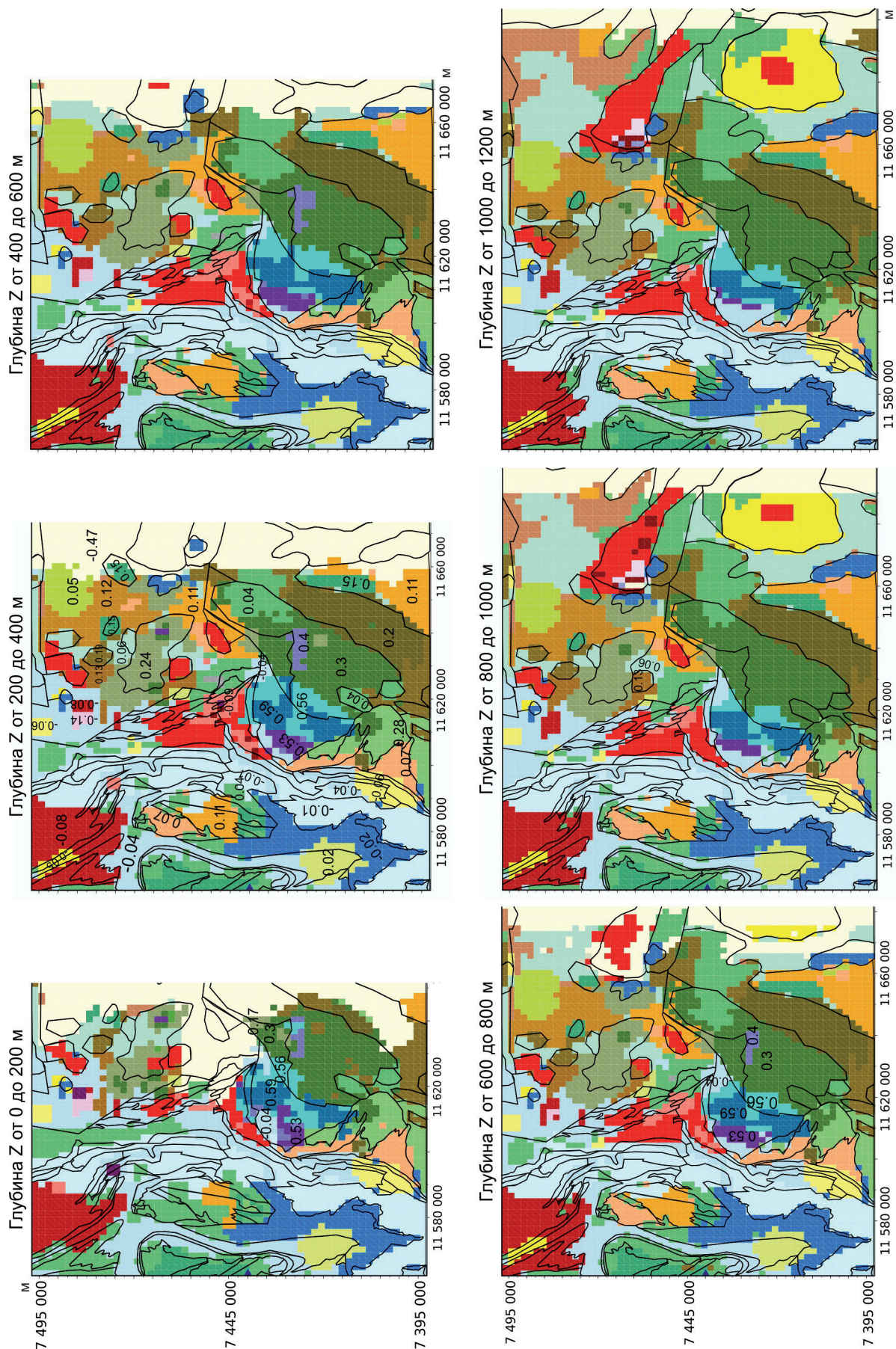


Рис. 6. Горизонтальные срезы геоплотностной модели районов 11 и 12 (см. рис. 1). Глубина Z от 0 до 1200 м.

Fig. 6. Horizontal strata of the geo-density model in the regions 11 and 12 (see Fig. 1). The depth Z from 0 to 1200 m.

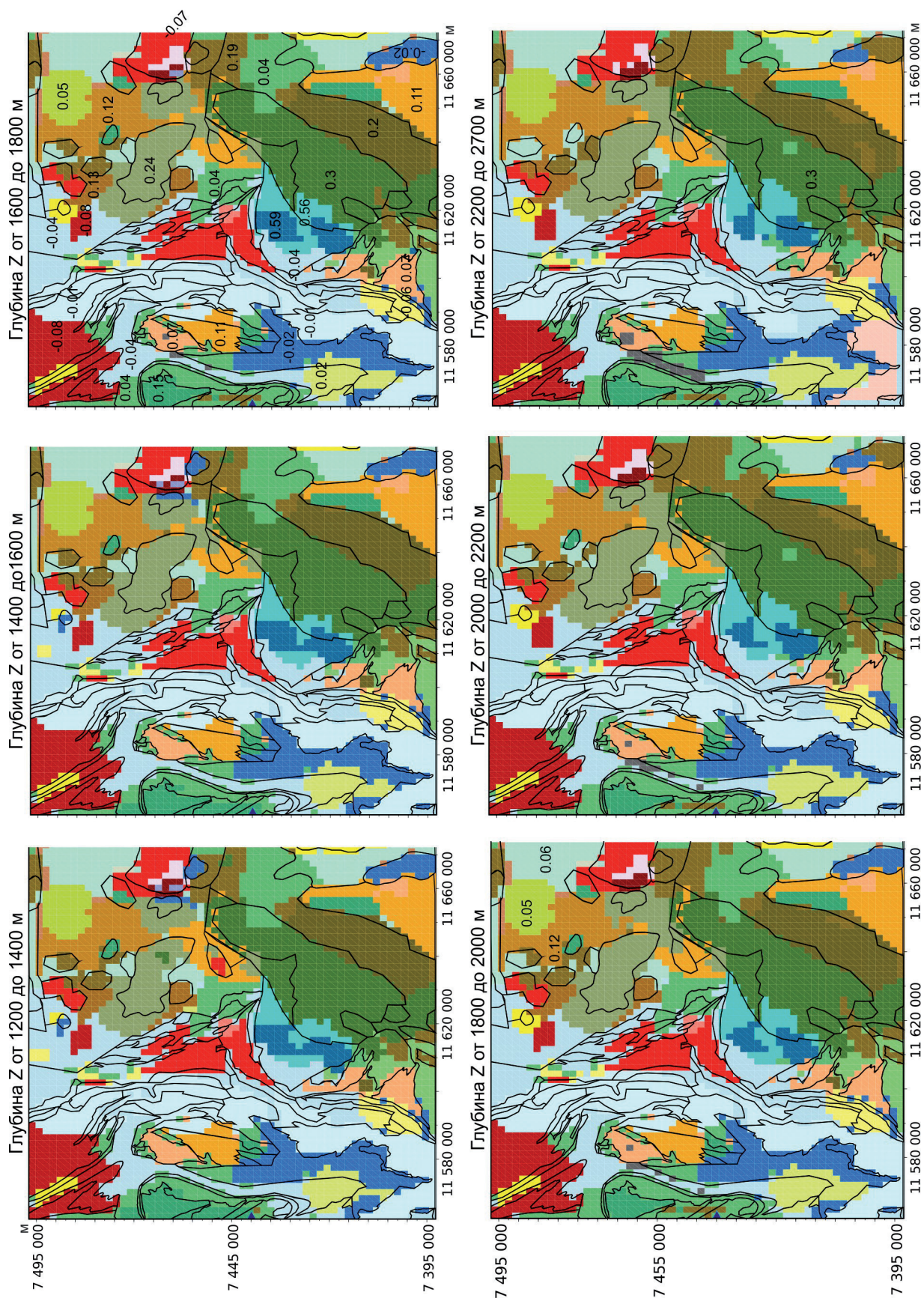


Рис. 7. Горизонтальные срезы геоплотностной модели районов 11 и 12 (см. рис. 1). Глубина Z от 1200 до 2700 м.

Fig. 7. Horizontal strata of the geo-density model in the regions 11 and 12 (see Fig. 1). The depth Z from 1200 to 2700 m.

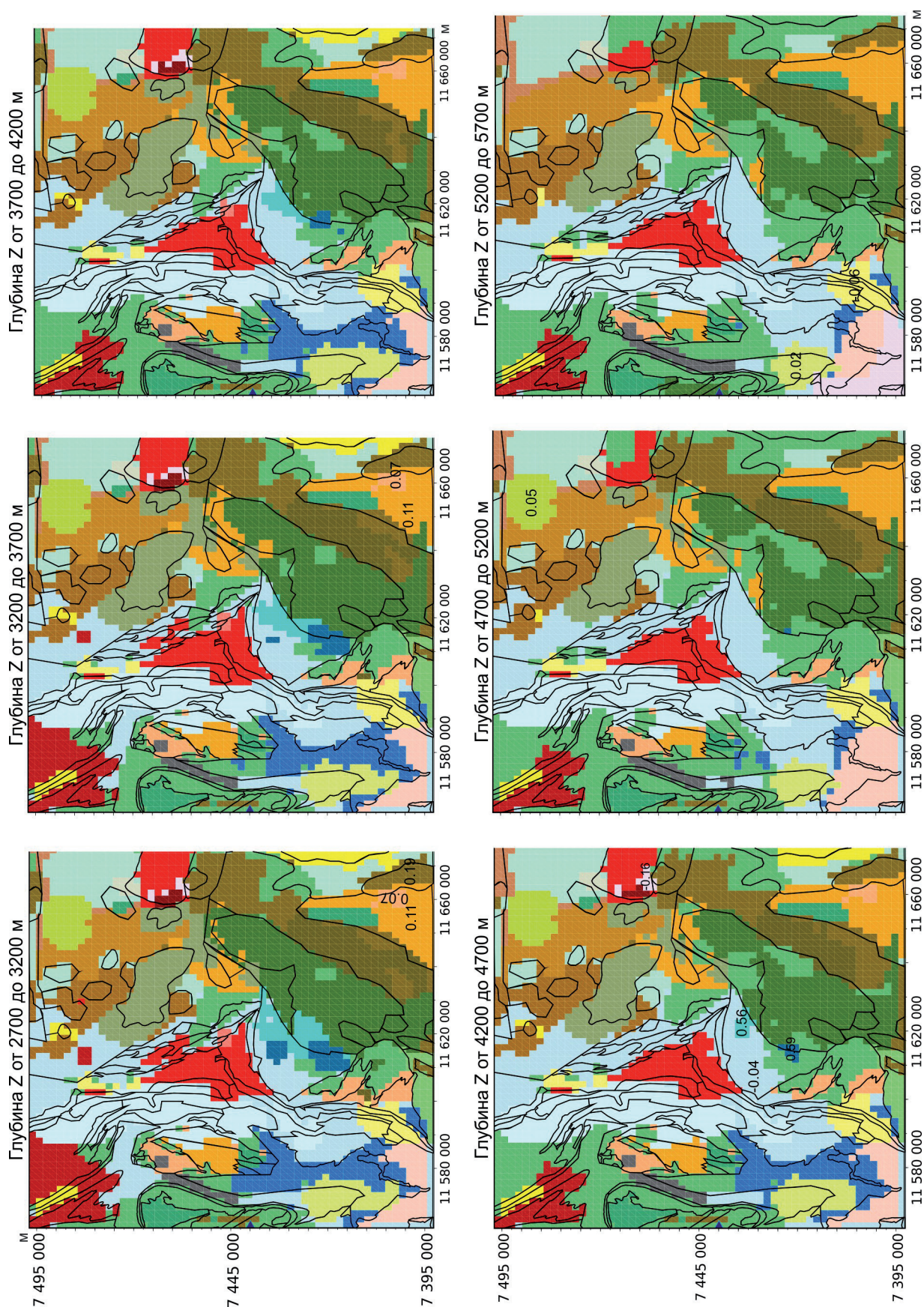


Рис. 8. Горизонтальные срезы геоплотностной модели районов 11 и 12 (см. рис. 1). Глубина Z от 2700 до 5700 м.
Fig. 8. Horizontal strata of the geo-density model in the regions 11 and 12 (see Fig. 1). The depth Z from 2700 to 5700 m.

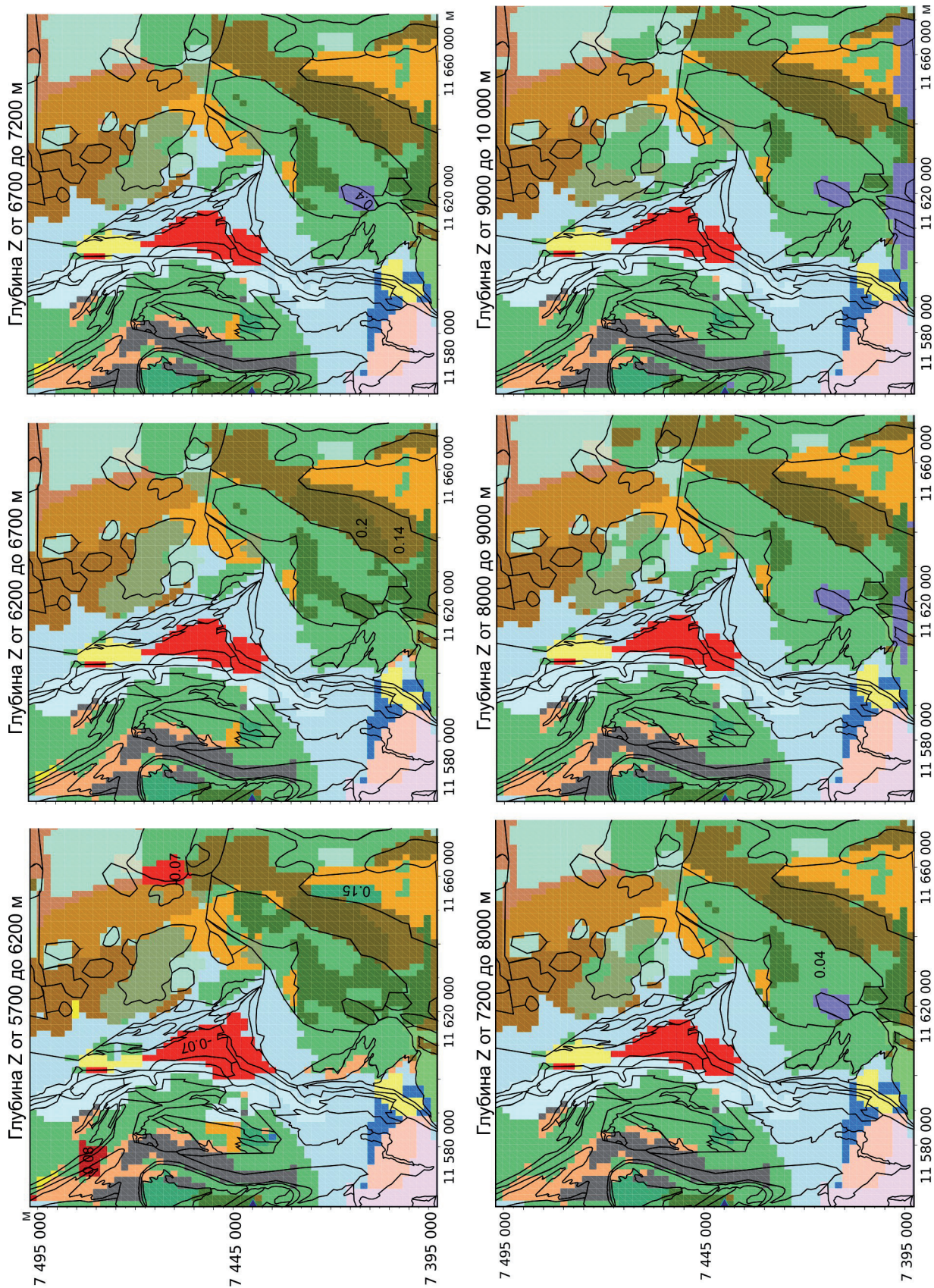


Рис. 9. Горизонтальные срезы геоплотностной модели районов 11 и 12 (см. рис. 1). Глубина Z от 5700 до 10 000 м.

Fig. 9. Horizontal strata of the geo-density model in the regions 11 and 12 (see Fig. 1). The depth Z from 5700 to 10 000 m.

с СЗ на ЮВ, причем на СЗ сложен в основном породами с $\Delta\sigma = 0.53$.

Известняково-углеродистая формация, расположенная к северу от дунит-гарцбургитового массива, представлена породами плотностью $\Delta\sigma = -0.07$ и -0.09 (см. рис. 3–5, 6–9). Как видно из этих рисунков, данная формация со стороны “открытого” Урала ограничена легкими породами с $\Delta\sigma = 0.01$ (см. рис. 3) до глубины 5700 м, а ниже – породами плотностью $\Delta\sigma = 0.04$ (см. рис. 9).

К северо-востоку от дунит-гарцбургитового комплекса на схеме складчатого фундамента (см. рис. 1) хорошо видна известняково-углеродистая формация (изображена темно-синим цветом), которая простирается до северо-восточного края области моделирования. На модели (см. рис. 3–9) обращает на себя внимание объект плотностью $\Delta\sigma = -0.07$ (показан красным цветом), соответствующий части данной формации.

Массив габбро-амфиболитов плотностью $\Delta\sigma = 0.24$ (см. рис. 1, район 11; $\approx 67^\circ$ с. ш., 66° в. д.) прослеживается с северо-запада на юго-восток. К нему примыкают небольшие участки гранитов габбро-гранитной формации. Массив габбро-амфиболитов моделируется телом (оно превышает размеры, предполагавшиеся ранее; см. рис. 1), которое простирается в северо-западном направлении. Если смотреть структуру модели по слоям, то видно, что отмеченная особенность просматривается до нижней границы модели – 15 000 м. Сам массив габбро-амфиболитов сменяется породами плотностью $\Delta\sigma = 0.04$ с глубины 11 000 м.

12. (от 11 563 до 11 600 км). Обращает на себя внимание полоса голубого цвета ($\Delta\sigma = -0.01$), идущая через всю область моделирования (см. рис. 3–9). С глубиной эта полоса смещается на ЮВ. Сравнивая геологическую карту (см. рис. 1) с рис. 3, мы видим, что терригенный флиш и известково-углеродная формация (синий цвет) на геологической карте (см. рис. 1) соответствуют породам с $\Delta\sigma = -0.02$ и -0.01 . Известково-углеродная формация ($\Delta\sigma = -0.02$) смоделирована до глубины 4700 м (см. рис. 4, 6–8).

Базальт-песчано-конгломератовая толща (на северном-северо-восточном срезе; рис. 1) моделируется комплексом пород плотностью $\Delta\sigma = -0.08$. Толща прослеживается до глубины 3700 м (см. рис. 4, 6–9), а от глубины 3700 до 15 000 м сменяется породами плотностью $\Delta\sigma = 0.04$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

О точности моделирования (совпадения наблюдаемого аномального гравитационного поля с модельным) можно судить по рис. 2. За исключением каймы площади моделирования, точность моделирования ± 3 мГал при наблюдаемом поле от -75 до 105 мГал, т. е. около 5%. Наглядно это показано на

рис. 2, на котором изображено остаточное (наблюденное–модельное) гравитационное поле. Однако это не единственно возможная модель, теоретически моделей можно подобрать бесконечно много: такова природа гравитационного поля. Остановиться на той или иной модели позволяют геологические данные. Затем модель можно лишь уточнять.

При рассмотрении предложенной модели обращает на себя внимание следующее. Как видно на рис. 3, смоделировано постепенное погружение фундамента от Урала в юго-восточном направлении. Плотность осадочного чехла считается однородной и равной -0.47 . При этом предположении гнейсы преимущественно повышенной плотности (см. рис. 1) под осадочным чехлом уверенно разделяются на ряд областей с плотностью (с северо-запада на юго-восток) $\Delta\sigma = 0.12, 0.05, 0.06, 0.08, 0.04, 0.07$ в северо-восточной части области моделирования ($11\ 640 < X, 7440 < Y < 7495$ км). В юго-восточной части моделирования ($11\ 640 < X, 7395 < Y < 7440$ км) гнейсы, преимущественно повышенной плотности, представлены породами плотностью $\Delta\sigma = 0.06, 0.04, 0.19$. (см. рис. 3, Z от -1800 до -1600 м; рис. 4, Z от -3200 до -2700 м).

Далее идут уточнения геологической карты (верхняя часть рис. 1). Мы смоделировали участки серпентинитов по карте аномального магнитного поля (АМП), предполагая, что эти массивы серпентинитов имеют блинообразную форму. Также по карте АМП уточнена форма гранитов на юго-востоке смоделированного участка и гранитов в районе пос. Аксарка.

Продвигаясь далее на северо-запад на рис. 1 ($11\ 640 < X < 11\ 700$ км), согласно АМП, изменен контур гранитов габбро-гранитовой формации (г. Салехард расположен внутри этой формации), введен еще один объект этой формации, лежащий севернее и простирающийся с северо-запада на юго-восток. Причем юго-восточная его часть перекрыта породами плотностью $\Delta\sigma = 0.04$ до глубины 2.7 км (см. рис. 4).

Граниты ($11\ 740 < X < 11\ 780, 7425 < Y < 7455$ км), изображенные на рис. 1, смоделированы по большей части объектом плотностью $\Delta\sigma = -0.08$. Однако в него пришлось ввести менее плотную ($\Delta\sigma = -0.2$) кольцеобразную структуру, простирающуюся с глубины 1600 м до глубины 4200–4700 м (см. рис. 3, 4).

На северо-западе планшета в области “открытого” Урала хорошо виден объект плотностью $\Delta\sigma = -0.07$ ($11\ 600 < X < 11\ 620$ км, $7435 < Y < 7465$ км), показанный красным цветом, идущий до нижней границы модели на глубине 15 000 м. Можно было бы предположить, что это – граниты. Но граниты должны, вероятно, были бы иметь иную форму, иные размеры. Этот объект расположен вдали от краев планшета.

Дунит-гарцбургитовый комплекс смоделирован существенно неоднородным, особенности модели этого комплекса можно проследить на рис. 6–9. Можно предполагать, что природа этой неоднородности, вероятнее всего, заключается в разной степени серпентинизации.

ВЫВОДЫ

По карте аномального магнитного поля на карту фундамента введены тела серпентинитов, характерных форм и размеров, отредактирована форма массивов гранитов и гранитов габбро-гранитовой формации. Выявлены неоднородности в полях гнейсов преимущественно повышенной плотности, а также кольцевая неоднородность, вероятно, гранитов внутри дунит-клинопироксенитового комплекса (см. рис. 1, район 8). Обращает на себя внимание неоднородность гранито-гнейсов (см. рис. 1, район 9). Далее на северо-запад граниты габбро-гранитовой формации разделены на два участка (см. рис. 1, район 10). Форма поля эффузивов смешанного состава (см. рис. 1, район 11) уточнена, но модель предполагает продолжение пород этой же плотности за пределы структуры в северо-западном направлении (см. рис. 3). Смоделирована структура дунит-гарцбургитового комплекса, существенно неоднородного по плотности (вероятно, в результате разной степени серпентинизации). Северо-западнее него введен комплекс пород плотностью $\Delta\sigma = -0.07$, идущий до нижней границы модели. Плотностные характеристики соответствуют гранитам, но размер по вертикали не соответствует типичным уплощенным формам гранитных plutonov.

Благодарности

Авторы благодарят доктора физ.-мат. наук А.С. Долгала за обсуждение статьи и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Е.М., Винничук Н.Н., Иванов К.С., Кормильцев В.В., Федоров Ю.Н. (2008) О плотности пород востока и фундамента Западно-Сибирской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 114 с.
- Бочкарев В.С., Иванов К.С., Пахалко А.Г., Сергеев С.А. (2022) Особенности геологического строения фундамента Зауралья и возраст риолитов туринской серии. *Уральск. геол. журн.*, 6(150), 55-73.
- Вахрушева Н.В., Ширяев П.Б., Степанов А.Е., Богданова А.Р. (2017) Петрология и хромитовосность ультраосновного массива Рай-Из Полярный Урал. (Ред. К.С. Иванов). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 265 с.
- Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект УРАЛСЕЙС). (2001) (Ред. А.Ф. Морозов). Тверь: ГЕРС, 286 с.
- Горбачев В.И., Наркисова В.В., Крупеник В.А., Тарханов Г.В., Попов С.Г., Свешникова К.Ю., Соколова Т.Н., Кузьмин Д.А., Докучаев А.Я. (2013) Новые данные о фундаменте Западно-Сибирской плиты (Янгиюганская параметрическая скважина). *Горн. ведомости*, (9), 22-37.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. (2005а) М-6 1 : 1 000 000 (3-е поколение). Уральск. сер. Лист Q-41 (Воркута). Объяснит. записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 335 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. (2005б) М-6 1 : 1 000 000 (3-е поколение). Уральск. сер. Лист Р-40 (Североуральск). Объяснит. записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 332 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. (2008) М-6 1 : 1 000 000 (3-е поколение). Южно-Карская сер. Лист R-41.
- Долгаль А.С. (2012) Комплексирование геофизических методов. Пермь: РИО Пермского гос. национ. исслед. ун-та, 166 с.
- Дружинин В.С., Ракитов В.А., Осипов В.Ю., Начапкин Н.И., Недядько В.В. (2014) Строение земной коры полярного сектора Уральской складчатой системы по данным ГСЗ. *Геология и геофизика*, 55(3), 498-505.
- Золотов Е.Е., Недядько В.В., Чернышев Ю.А., Гречишников Г.А., Егоркин А.В., Ломова Г.А., Пономарев С.В., Ракитов В.А., Рыжкова И.А. (2008) Строение консолидированной коры и верхней мантии вдоль Полярно-Уральского трансекта. *Тез. докл. X геофиз. чтений им В.В. Федынского*. М.: Центр "Геон", 20-21.
- Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Елизаров Д.В., Шокальский С.П. (2016) О возрасте и составе гнейсов из фундамента северо-западной части Западно-Сибирской плиты. *Литосфера*, (1), 59-73.
- Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Пучков В.Н., Пономарев В.С., Костров Н.П., Хиллер В.В. (2021) Складчатый фундамент полуострова Ямал и его структурные связи. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 285 с.
- Иванов К.С., Коротеев В.А., Ерохин Ю.В., Шокальский С.П., Сергеев С.А. (2014) Состав и возраст кристаллического фундамента северо-западной части Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна. *Докл. АН*, 459(5), 607-611.
- Иванов К.С., Коротеев В.А., Костров Н.П. (2017) Глубинные структуры сочленения Урала с Русской и Западно-Сибирской платформами. *Докл. АН*, 475(1), 64-67.
- Иванов К.С., Коротеев В.А., Пономарев В.С., Ерохин Ю.В. (2018) Докембрий Западно-Сибирской плиты: проблема и решение. *Докл. АН*, 482(3), 307-310.
- Иванов К.С., Костров Н.П. (2017) Новая геолого-геофизическая интерпретация потенциальных полей в районе Средне-Уральского трансекта. Ст. 2. Восток Урала и Западная Сибирь. *Литосфера*, (1), 96-115.
- Иванов К.С., Федоров Ю.Н., Ерохин Ю.В., Пономарев В.С. (2016) Геологическое строение фундамента Приуральской части Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 302 с.
- Иванов К.С., Федоров Ю.Н., Коротеев В.А., Печеркин М.Ф., Кормильцев В.В., Погромская О.Э., Ронкин Ю.Л., Ерохин Ю.В. (2003) Строение и природа области сочленения Урала и Западной Сибири. *Докл. АН*, 393(5), 647-651.
- Иванов С.Н., Иванов К.С. (2018) Реологическая модель строения земной коры (модель 3-го поколения).

Литосфера, 18(4), 500-519.

- Костров Н.П., Иванов К.С. (2017) Комплекс интерпретации потенциальных полей для геологии. *Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН*, (10), 3-8.
- Костюченко С.Л., Морозов А.Ф., Кременецкий А.А. (2012) Тимано-Урало-Пайхойская коллизионная область. М.: Геолкарт-Геос, 210 с.
- Кузнецов Н.Б., Соболева А.А., Удоратина О.В., Герцева М.В., Андреичев В.Л., Дорохов Н.С. (2006) Доуральская тектоническая эволюция северо-восточного и восточного обрамления Восточно-Европейской платформы. *Литосфера*, (4), 3-22.
- Куликов В.А., Яковлев А.Г. (2008) Глубинная геоэлектрическая модель Полярного Урала. *Электронное научное издание "ГЕОразрез" ISSN 2070-0768*, (2), 20.
- Литосфера Тимано-Североуральского региона: геологическое строение, вещество, геодинамика. (2008) (Ред. А.М. Пыстин, В.Л. Андреичев, А.И. Антошкина и др.). Сыктывкар: Геопринт, 234 с.
- Основные черты геологического строения и минерально-сырьевой потенциал Северного, Приполярного и Полярного Урала. (2010) (Ред. А.Ф. Морозов, О.В. Петров, А.Н. Мельгунов). СПб.: ВСЕГЕИ, 274 с. (+Приложения на CD).
- Перфильев А.С. (1968) Особенности тектоники севера Урала. М.: Наука, 248 с.
- Пучков В.Н., Иванов К.С. (2020) Тектоника севера Урала и Западной Сибири: общая история развития. *Геотектоника*, (1), 41-61.
- Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. (2015) Архейско-палеопротерозойская история метаморфизма пород Уральского сегмента земной коры. *Тр. КарНЦ РАН*, (7), 3-18.
- Рыбалка А.В., Петров Г.А., Кашубина Т.В., Куликов В.А., Егоркин А.В., Душин В.А., Кашубин С.Н. (2011) Глубинное строение Урала по данным Полярно-Уральского трансекта. *Регион. геол. и металлогения*, (48), 25-36.
- Рыльков С.А., Рыбалка А.В., Иванов К.С. (2013) Геологическое строение и металлогения Урала: сопоставление глубинной структуры Южного, Среднего и Полярного Урала. *Литосфера*, (1), 3-16.
- Семёнов Б.Г., Екидина Н.Я., Ананьева Е.М. и др. (1990) Построение комплексной модели земной коры Урала. Отчет по теме за 1989–1990 гг., ФГУ "ТФИ по Уральскому округу". <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=284b270e43007f7f58c853c09a637d69>
- Тектоническая история Полярного Урала. (2001) (Ред. А.Н. Диденко, С.А. Куренков, С.В. Руженцев и др.). М.: Наука, 91 с. (Тр. ГИН РАН, вып. 531).
- Угрюмов А.Н., Воронов В.Н. (2014) К вопросу о стратиграфическом расчленении разреза фундамента Западно-Сибирской плиты по стволу Янгйюганской параметрической скважины. *Горн. ведомости*, (6), 34-48.
- Юдин В.В., Ремизов Д.Н. (2014) Сбалансированная геодинамическая модель по профилю "Полярноуральский трансект". *Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России*. Мат-лы XVI геол. съезда Респ. Коми. Т. II. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 77-79.
- Язева Р.Г., Бочкарев В.В. (1984) Войкарский вулканоплутонический пояс (Полярный Урал). Свердловск: УНЦ АН СССР, 154 с.
- Kostrov N.P. (2007) Calculation of magnetic anomalies caused by 2D bodies of arbitrary with consideration of demagnetization. *Geophys. Prospect.*, 55(1), 91-115.
- Rybalka A., Petrov G., Kashubina T., Aniskin A. (2011) 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, 103 p.

REFERENCES

- Anan'eva E.M., Vinnichuk N.N., Ivanov K.S., Kormil'tsev V.V., Fedorov Yu.N. (2008) About density of the East rocks and the West-Siberian basement. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 114 p. (In Russ.)
- Bochkarev V.S., Ivanov K.S., Pakhalko A.G., Sergeev S.A. (2022) Particularities of geological structure of the Zauralye basement and the Turinian series rhyolite age. *Ural. Geol. Zhurnal*, 6(150), 55-73. (In Russ.)
- Deep structure and geodynamics of the Southern Urals (URALSEIS project). (2001) (Ed. A.F. Morozov). Tver', Gers Publ., 286 p. (In Russ.)
- Gorbachev V.I., Narkisova V.V., Krupenik V.A., Tarkhanov G.V., Popov S.G., Sveshnikova K.Yu., Sokolova T.N., Kuz'min D.A., Dokuchaev A.Ya. (2013) New data on the West-Siberian plate basement (Yangiyuganskaya parametric borehole). *Gornye Vedomosti*, (9), 22-37. (In Russ.)
- State geological map of Russian Federation. (2005a) Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Ural series. List Q-41 (Vorkuta). Explanatory note. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 335 p. (In Russ.)
- State geological map of Russian Federation. (2005b) Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Ural series. List P-40 (Severouralsk). Explanatory note. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 332 p. (In Russ.)
- State geological map of Russian Federation. (2008) Scale 1 : 1 000 000 (third generation). South-Kara series. List R-41. (In Russ.)
- Dolgal' A.S. (2012) Complexation of geophysical methods. Perm, Editorial-Publishing department of Perm governmental national research university, 166 p. (In Russ.)
- Druzhinin V.S., Rakitov V.A., Osipov V.Yu., Nachapkin I.I., Nedyad'ko V.V. (2014) The earth crust structure of polar sector of the Ural folded system on the GSZ data. *Geol. Geofiz.*, 55(3), 498-505. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Erokhin Yu.V., Elizarov D.V., Shokal'skii S.P. (2016) About age and composition of gneisses from the basement of the West-Siberian plate north-western part. *Lithosphere (Russia)*, (1), 59-73. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Erokhin Yu.V., Puchkov V.N., Ponomarev V.S., Kostrov N.P., Khiller V.V. (2021) Folded dsement of the Yamal peninsular and its structural bounds. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 285 p. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Koroteev V.A., Erokhin Yu.V., Shokal'skii S.P., Sergeev S.A. (2014) Composition and age of crystalline basement of the north-western part of the West-Siberian oil-and gas-bearing megabasin. *Dokl. Akad. Nauk*, 459(5), 607-611. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Koroteev V.A., Kostrov N.P. (2017) Deep structures of Urals joints with the Russian and West-Siberian platforms. *Dokl. Akad. Nauk*, 475(1), 64-67. (In Russ.)

- Ivanov K.S., Koroteev V.A., Ponomarev V.S., Erokhin Yu.V. (2018) Precambrian of the West-Siberian plate: Problem and decision. *Dokl. Akad. Nauk*, **482**(3), 307-310. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Kostrov N.P. (2017) A new geological-geophysical interpretation of potential fields in the area of Middle-Uralian transect. Paper 2. The East of the Urals and Western Siberia. *Lithosphere (Russia)*, (1), 96-115. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Fedorov Yu.N., Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S. (2016) Geological structure of the basement of Preuralian part of the West-Siberian oil-and-gas-bearing megabasin. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 302 p. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Fedorov Yu.N., Koroteev V.A., Pecherkin M.F., Kormil'tsev V.V., Pogromskaya O.E., Ronkin Yu.L., Erokhin Yu.V. (2003) Structure and nature of the Urals and West Siberia joint area. *Dokl. Akad. Nauk*, **393**(5), 647-51. (In Russ.)
- Ivanov S.N., Ivanov K.S. (2018) Rheological model of the earth crust structure (model of the third generation). *Lithosphere (Russia)*, **18**(4), 500-519. (In Russ.)
- Kostrov N.P. (2007) Calculation of magnetic anomalies caused by 2D bodies of arbitrary with consideration of demagnetization. *Geophys. Prospect.*, **55**(1), 91-115.
- Kostrov N.P., Ivanov K.S. (2017) Complex interpretation of potential fields for geology. *Vestn. IG Komi NTs UrO RAN*, (10), 3-8. (In Russ.)
- Kostyuchenko S.L., Morozov A.F., Kremenetskii A.A. (2012) Timam-Ural-Paikhoi collision area. Moscow, Geolcart-Geos Publ., 210 p. (In Russ.)
- Kulikov V.A., Yakovlev A.G. (2008). Deep geo-electric model of the Polar Urals. *Electronic scientific edition "GEOsection" ISSN 2070-0768*, (2), 20. (In Russ.)
- Kuznetsov N.B., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Gertseva M.V., Andreichev V.L., Dorokhov N.S. (2006) Pre-Uralian tectonic evolution of the north-eastern and eastern frame of the East-European platform. *Lithosphere (Russia)*, (4), 3-22. (In Russ.)
- Lithosphere of Timan-Severouralsk area: Geological structure, substance, geodynamics. (2008) (Eds A.M. Pystin, V.L. Andreichev, A.I. Antoshkina et al.). Syktyvkar, Geoprint Publ., 234 p. (In Russ.)
- Main features of geological structure and raw-resources potential of the North, Polar and Cis-Polar Urals. (2010) (Eds A.F. Morozov, O.V. Petrov, A.N. Mel'gunov) St.Petersburg, VSEGEI Publ., 274 p. (+ Appl. on CD). (In Russ.)
- Perfil'ev A.S. (1968) Particularities of tectonics of north of the Urals. Moscow, Nauka Publ., 248 p. (In Russ.)
- Puchkov V.N., Ivanov K.S. (2020) Tectonics of the north of the Urals and West Siberia: General history of development. *Geotektonika*, (1), 41-61. (In Russ.)
- Pystin A.M., Pystyna Yu.I. (2015) Archean-paleoproterozoic history of metamorphism of rocks of the Uras segment earth crust. *Tr. KarNTs RAN*, (7), 3-18. (In Russ.)
- Rybalka A., Petrov G., Kashubina T., Aniskin A. (2011) 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, 103 p.
- Rybalka A.V., Petrov G.A., Kashubina T.V., Kulikov V.A., Egorkin A.V., Dushin V.A., Kashubin S.N. (2011) Deep structure of the Urals on data of the Polar-Uralian transect.) *Region. Geol. i Metallogeniya*, (48), 25-36. (In Russ.)
- Ryl'kov S.A., Rybalka A.V., Ivanov K.S. (2013) Geological structure and metalogeny of the Urals: comparison of deep structure of Southern, Middle and Polar Urals. *Lithosphere (Russia)*, (1), 3-16. (In Russ.)
- Semenov B.G., Ekidina N.Ya., Anan'eva E.M. et al. (1990) Construction of complex model of the earth crust of the Urals. Report on the topic for 1989-1990, FGU "TFI on the Uralian region". (In Russ.) <https://rfgf.ru/catalog/docview.php?did=284b270e43007f7f58c853c09a637d69>
- Tectonic history of the Polar Urals. (2001) (Eds A.N. Didenko, S.A. Kurenkov, S.V. Ruzhentsev et al.). Moscow, Nauka Publ., 91 p. (Tr. GIN RAN, iss. 531). (In Russ.)
- Ugryumov A.N., Voronov V.N. (2014) About the profile stratigraphic dividing of the West-Siberian plate basement along the trunk of the Yangiyugansk parametric borehole. *Gornye Vedomosti*, (6), 34-48. (In Russ.)
- Vakhrusheva N.V., Shiryaev P.B., Stepanov A.E., Bogdanova A.H. (2017) Petrology and chromite presence of ultrabasic massif Rai-Iz, Polar Urals. (Ed. K.S. Ivanov). Ekaterinburg, IGG UB RAS, 265 p. (In Russ.)
- Yudin V.V., Remezov D.N. (2014) Balanced geodynamical model on the profile "Polar Urals transect". *Geology and mineral resources of the European north-east of Russia*. Mater. of XVI Geol. Congress of Komi Repub. V. 2. Syktyvkar, IG Komi NTs UrO RAN Publ., 77-99. (In Russ.)
- Yazeva R.G., Bochkarev V.V. (1984) The Voikar volcano-plutonic belt (Polar Urals). Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 154 p. (In Russ.)
- Zolotov E.E., Nedyad'ko V.V., Chernyshev Yu.A., Grechishnikov G.A., Egorkin A.V., Lomova G.A., Ponomarev S.V., Rakitov V.A., Ryzhkova I.A. (2008) The structure of consolidated crust and upper mantle along the Polar-Urals transect. *Abstracts of reports of the X Geophysical Readings named after. V.V. Fedynsky*. Moscow, Tsentr "Geon", 20-21. (In Russ.)