

ОБЪЕМНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПЛОТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ

Сидоров М. Д., Нурмухамедов А. Г.

Аннотация

В статье излагается методика создания плотностной объемной модели земной коры и верхней мантии для блока в южной части полуострова Камчатка. Модель создана по данным интерпретации аномалий Буге и глубинных зондирований методами сейсморазведки и электроразведки. Создание объемного изображения состоит из нескольких этапов. На первом этапе территория исследуется по сети пересекающихся профилей, на которых методом подбора моделируются глубинные плотностные разрезы. Априорными данными служат материалы геологических, геофизических, петрофизических исследований, а также результаты определения глубины до особых точек методом деконволюции Эйлера. На следующем этапе из моделей разрезов формируется 3D матрица плотности. Координаты в плоскости разрезов определяются в узлах квадратной сетки и преобразуются в плановые прямоугольные координаты СК-42. Создается файл базы данных плотности разрезов. Для участков с редкой сетью разрезов создается дополнительная база из грид-файлов погоризонтных карт плотностей. Обе базы объединяются. Рассчитывается 3D сеть элементарных кубических ячеек объемного (voxel) изображения плотности геосреды. Для всего исследованного блока земной коры построено изображение с размером ребра элементарного куба плотности 4 км. Далее проведена детализация модели последовательным уменьшением размера ребра элементарных кубов 2, 1 и 0.5 км. Результаты объемного моделирования представлены в виде блок-диаграмм и карт изолиний плотности в горизонтальных срезах на разной глубине. На блок-диаграммах изображены изоповерхности с плотностью типичной для глубинных границ и структур. Изоповерхность 2.75 г/см³ отображает морфологию кровли кристаллического фундамента, изоповерхность 2.9 г/см³ дает представление о границе между нижней и верхней корой, а изоповерхности 3.2 г/см³ и 3.33 г/см³ вероятную форму раздела кора - верхняя мантия. В модели с элементарной кубической ячейкой 1 км выделена зона пониженной плотности, которая прослеживается на всю мощность коры и объясняется деструкцией горных пород вдоль глубинного разлома. Зона охватывает питающие системы вулканов соп. Асача, Мутновская Сопка, соп. Горелая, Вилючинская Сопка. В модели с элементарной кубической ячейкой 0.5 км изоповерхностью 2.85 г/см³ околонушена область повышенной плотности столбообразной формы. Предполагается, что повышенная плотность блока связана с интрузиями базитового состава. Объемные плотностные модели, построенные по моделям разрезов, дают дополнительную информацию для геодинамических реконструкций, позволяют приближенно определять форму скрытых геологических структур и их объемы, могут быть использованы в 3D моделировании для построения начальных моделей.

The article describes a method for creating a density volumetric model of the Earth's crust and upper mantle for a block in the southern part of the Kamchatka Peninsula. The model was created based on the interpretation of Bouguer gravity and deep soundings by seismic and electrical methods. Creating a three-dimensional image consists of several stages. At the first stage, the territory is explored using a network of intersecting profiles, where deep density sections are modeled using the selection method. A priori data are the materials of geological, geophysical, and petrophysical studies, as well as the results of determining the depth to special points by the Euler deconvolution method. At the next stage, a 3D density matrix is formed from the section models. Coordinates in the sections plane are determined at the nodes of the square grid and converted to rectangular coordinates SK-42. A section density database file is created. For areas with a distant network of sections, an additional database is created from grid files of horizon density maps. Both databases are combined. A 3D network of elementary cubic volume cells (voxel) of the geomedium density image is calculated. For the entire investigated block of the earth's crust, an image with an edge size of an elementary density cube of 4 km was constructed. Further, the model was refined by successive decrease in the edge size of elementary cubes 2, 1, and 0.5 km. The

results of volumetric modeling are presented like block diagrams and maps of density isolines in horizontal sections at different depths. The block diagram shows the isosurfaces with the density typical for the deep boundaries and structures. An isosurface of 2.75 g/cm³ characterizes the morphology of the roof of the crystalline basement, an isosurface of 2.9 g/cm³ indicates the boundary between the lower and upper crust, and isosurfaces of 3.2 g/cm³ and 3.33 g/cm³ indicate the probable shape of the crust-upper mantle section. In the model with a unit cubic cell of 1 km, a zone of reduced density is identified, which can be traced to the entire thickness of the crust and explained by the destruction of rocks along the deep fault. The zone covers the feeding systems of the sop. Asacha, Mutnovskaya Sopka, sop. Gorelaya, and Vilyuchinskaya Sopka volcanoes. In the model with a 0.5 km unit cubic cell with an isosurface of 2.85 g/cm³, a column-shaped area of increased density is outlined. The increased block density is assumed to be associated with intrusions of the basic composition. Volumetric density models built on section models provide additional information for geodynamic reconstructions, allow approximate determination of the shape of hidden geological structures and their volumes, and can be used in 3D modeling to build initial models.

Ключевые слова:

Плотность, модель, воксель, интрузия, земная кора, блок-диаграмма, изоповерхность, Камчатка, density, model, voxel, intrusion, Earth's crust, block diagram, isosurface, Kamchatka

Ключевые слова:

Плотность, модель, воксель, интрузия, земная кора, блок-диаграмма, изоповерхность, Камчатка., density, model, voxel, intrusion, Earth's crust, block diagram, isosurface, Kamchatka

УДК 551.14+551.24+550.8.053

ОБЪЕМНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПЛОТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ПРИМЕРЕ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ

М. Д. Сидоров, А. Г. Нурмухамедов

Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН

E-mail: smd52@mail.ru, nurmuxamedov1949@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач тектонического и прогнозно-минерагенического районирования важно знать глубинное строение исследуемого региона. Обычно эти сведения получают методами глубинных геофизических зондирований. Для этой цели применяются сейсмические методы и методы, основанные на изучении электромагнитного поля Земли. Как правило, зондирования проводятся в единичных пунктах или на отдельных профилях. Трудоемкость и дороговизна работ не позволяют иметь плотную сеть глубинных исследований для больших территорий. Однако существует способ, позволяющий восполнить этот недостаток. Таким способом является изучение плотности земной коры, основанное на интерпретации материалов площадных гравиметрических съемок. Аномалии силы тяжести в редукции Буге отражают плотностные неоднородности. Рассматривая результаты количественной интерпретации аномального поля Δg и сопоставляя их с сейсмическими и геологическими данными можно создать объемную модель распределения плотности в коре и верхней мантии, определить глубинное положение и форму геологических структур, а при необходимости вычислить их объемы. Реализация такого подхода к изучению глубинного строения показана в данной работе на примере блока коры в южной части полуострова Камчатка.

Первые глубинные геофизические исследования, охватывающие кору и верхнюю мантию, были проведены в конце 50-х годов прошлого века по программе Международного геофизического года. В Авачинском заливе, в пределах континентального склона, был пройден профиль глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Позднее, в 60–70 гг., усилиями научных организаций (ИФЗ, СахКНИИ и ИВиС АН СССР) этот профиль был детализирован и продолжен на суше. Результаты зондирований опубликованы в обобщающих работах [Аносов и др., 1978; Балеста, 1981; Попов и др., 1987]. Тогда же были проведены рекогносцировочные исследования ГСЗ на западе полуострова [Потапьев, 1974]. Скоростные характеристики среды, полученные ГСЗ, использовались в дальнейшем при обработке данных исследований методом обменных волн землетрясений (МОВЗ). С середины 80-х гг., на юге Камчатки проводилось изучение глубинного строения методами МОВЗ и магнитотеллурического зондирования (МТЗ) по

сети региональных профилей. Работы выполнены по программе прогноза землетрясений и извержений вулканов Елизовской геофизической экспедицией производственно-геологического объединения «Камчатгеология». В результате, для каждого профиля были составлены геофизические разрезы земной коры и верхней мантии, рассчитаны геоплотностные модели разрезов. Обобщение этих материалов проведено при составлении схемы сеймотектонического районирования (А. Г. Нурмухамедов и др., 2013). Геолого-геофизические модели по отдельным профилям приведены в научных публикациях [Мишин, 1996, 1997; Nurmukhamedov and Sidorov, 2019, Нурмухамедов и др., 2020]. Кроме того, учитывая редкую сеть геофизических профилей с измерениями геофизических параметров приборами, для характеристики глубинных границ и структур создавались плотностные модели по отдельным профилям. Такое моделирование проводилось на этапе подготовки к изданию листов госгеолкарты–200 [Боровцов и др., 2001, 2013; Шеймович, 2000].

К настоящему времени вся описываемая территория покрыта 2-х миллигальными гравиметрическими съемками масштаба 1:200000, а также аэромагнитными съемками 1:50000 и 1:200000 масштабов. Из материалов этих съемок для обеспечения Госгеолкарты–1000/3 геофизической основой была создана электронная база данных (М. Д. Сидоров, 2002), интерполированы матрицы аномальных геофизических полей, которые и используются в плотностном моделировании.

Рассматриваемая территория находится в переходной зоне континент–океан Чукотско-Корякско-Камчатского сектора Тихоокеанского складчатого пояса [Сляднев и др., 2007; Сидоров и др. 2020]. Специфичность положения определила сложность геологического строения, неоднозначность трактовки границ и взаимоотношений различных геологических структур, как на поверхности, так и их глубинного продолжения. Создано большое количество тектонических схем с разным методологическим подходом к их составлению, пониманием природы структур, последовательности их образования.

Ниже приводится краткая геологическая характеристика района необходимая для восприятия методики плотностного моделирования и создания объемных глубинных моделей рассматриваемого участка земной коры.

Описываемая территория расположена на территории Корякско-Камчатской складчатой области [Сидоров и др., 2020]. В геологическом строении участвуют верхнемеловые-палеоценовые, большей частью терригенные флишоидные отложения, а также комплексы океанического палеобассейна и его окраины: вулканогенно-кремнистые, туфо-терригенные, терригенные меловые–нижнепалеогеновые отложения. На складчатые структуры наложены кайнозойские образования вулканических поясов и моласса.

Наиболее древними являются домеловые метаморфические толщи, представленные ганальской, камчатской и колпаковской метаморфическими сериями [Сляднев и др., 2007]. Породы толщ метаморфизованы в амфиболитовой и гранулитовой фациях, слагают верхний слой консолидированной коры и обнажаются в ядрах гранито-гнейсовых куполов севернее от рассматриваемой площади. По плотности породы разделяются на две главные группы: повышенной плотности (кристаллические сланцы, амфиболиты, амфиболовые гнейсы) и пониженной плотности (плагигнейсы, мигматиты, серицит-кварцевые сланцы). Блоки, сложенные преимущественно кристаллическими сланцами, отличаются по величине аномалий силы тяжести от блоков с преобладанием гнейсов [Сидоров, Степанов, 2006]. Последнее обстоятельство имеет существенное значение для интерпретации и плотностного моделирования.

Выходы меловых и мел–палеоценовых отложений расположены в северо-западной части описываемой территории, а также в акватории Тихого океана, где они представляют акустический фундамент на материковом склоне (рис. 1). По генезису отложений выделяются осадочные (терригенные) и вулканогенные породы, метаморфизованные в зеленосланцевой фации. Вулканогенные породы представлены туфами, туффитами, лавами базальтов. Среди осадочных пород преобладают алевролиты, песчаники, филлиты, аспидные сланцы. Плотность блоков мезозойских толщ зависит от состава преобладающих пород (см. таблицу). Наиболее плотными являются участки, где доминируют вулканогенные образования, особенно со значительной долей лавовых потоков. Менее плотными являются блоки терригенных толщ. Эта особенность находит отражение в локальной компоненте аномального поля силы тяжести, что также важно для плотностного моделирования.

Отложения эоцен–плиоценового возраста развиты преимущественно на севере и востоке площади, представлены вулканогенными и осадочными толщами. По преобладающему составу пород в покровных фациях вулканические комплексы (ВК) разделяются на преимущественно кислые ВК и преимущественно средне–основные ВК. Эта особенность позволяет различать их по средней величине плотности толщ. Кислые ВК сложены риолитами, дацитами и их туфами, кислыми игнимбритами. В основных ВК преобладают андезиты, базальты, андезибазальты и их туфы.

В южной половине площади и на северо-востоке широко развиты вулканы четвертичного возраста. Они слагают в разной степени сохранившиеся постройки щитовых и стратовулканов, покровные, экструзивно–жерловые и субвулканические образования, шлаковые конусы, а также толщи пирокластики, связанные с образованием кальдер. Здесь в голоцене была сформирована крупнейшая на полуострове зона ареального базальтового вулканизма [Сляднев и др., 2007]. Плотность слоев и блоков,

состоящих из вулканитов квартера, зависит от состава и, в значительной степени, от структурно-текстурных особенностей отложений. Наименьшей плотностью обладают тела сложенные риолитами, дацитами, кислыми игнимбритами, туфами и шлаками. Относительно них более плотными являются покровы и потоки базальтов, андезибазальтов.

В структурном плане кайнозойские вулканогенные образования относятся к Восточно–Камчатскому и Южно–Камчатскому [Сляднев и др., 2007] наложенным вулканическим поясам. Граничат структуры по Малкинско–Петропавловской (Начикинской) складчато–глыбовой зоне поперечных дислокаций [Шеймович, 2000; Сляднев и др., 2007], хотя границы самой зоны различны у разных авторов.

Все субвулканические образования независимо от возраста по плотности можно разделить на две группы: плотные, с плотностью свыше 2.70 г/см^3 и менее плотные, с плотностью ниже $2.60\text{--}2.65 \text{ г/см}^3$). Плотные тела сложены долеритами, диоритовыми порфиритами, базальтами, андезибазальтами, андезитами. Менее плотные породами кислого ряда, от риолитов до андезидацитов. В целом, плотность субвулканических фаций относительно покровных фаций вулканических комплексов выше, из-за их большей однородности и монолитности.

Среди плутонических образований максимальной плотностью обладают интрузии базитов и ультрабазитов, а относительно низкой интрузии гранитоидов. Крупные интрузивные тела оказывают заметное влияние на локальную компоненту аномального поля силы тяжести.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ ПЛОТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Плотностная модель земной коры и верхней мантии Южной Камчатки построена по технологии объемного изображения результатов моделирования глубинных разрезов [Сидоров, 2016а]. Для построения объемной модели использован материал, накопленный за несколько десятилетий в виде сети пересекающихся профилей плотностных моделей (рис. 2). Очевидно, что в местах пересечения профилей подобранные плотности в общих блоках разрезов должны быть близки по величине, а границы слоев на линии пересечения совпадать с точностью в масштабе моделирования разрезов. Это обстоятельство можно рассматривать как внутренний контроль интерпретационных построений. Для объемной модели были использованы разрезы, удовлетворяющие оговоренным условиям. Основным источником информации о плотностных неоднородностях являются аномалии силы тяжести в редукции Буге. В качестве априорных для моделирования отдельных разрезов привлекались данные глубинной сейсморазведки ГСЗ, МОВЗ, электроразведки МТЗ в авторской интерпретации, изложенной в соответствующих отчетах и публикациях. Также

при построении начальных моделей разрезов учтены материалы аэромагнитных съемок, глубокого бурения, геологических и петрофизических исследований проведенных в описываемом районе полуострова Камчатка (см. выше).

Плотностная объемная модель создана в два этапа. Сначала методом подбора построены плотностные модели разрезов по отдельным профилям. Затем результаты расчетов были объединены в общую цифровую базу данных. Эта база данных использована для объемного изображения плотностных неоднородностей в земной коре и верхней мантии. Получаемое трехмерное изображение является результатом интерполирования плотностей подобранных в плоскости разрезов, а не результатом прямых расчетов аномалий от трехмерных тел, слагающих некоторый объем геологической среды. Поэтому получаемое объемное изображение плотностных неоднородностей нельзя считать точным отражением гравитационного эффекта от 3D модели во всех точках исследуемого пространства. Но, цифровые данные такой объемной модели в дальнейшем могут служить основой первичных моделей из трехмерных тел и 3D моделирования по алгоритмам для подбора площадных измерений силы тяжести.

Моделирование глубинных плотностных разрезов. Моделирование в вертикальной плоскости основано на представлениях о слоисто-блоковом строении земной коры и региональном распространении основных границ – кровли и подошвы консолидированной части коры, границ внутри нее, различной плотностью горных пород слагающих отдельные слои и блоки. В моделях разрезов в качестве глубинных границ рассматриваются сейсмические границы и границы между блоками отличающихся электропроводностью. Также в качестве ограничений блоков рассматриваются границы на линиях пересечения с ранее подобранными разрезами. Метод подбора состоит из нескольких последовательных шагов: составление начальной (исходной) плотностной модели разреза, вычисление теоретической аномалии силы тяжести, сравнения ее с наблюдаемой аномалией, корректировкой разреза (изменением входных параметров) и повторным расчетом.

Корректировка параметров разреза проводится в интерактивном режиме до совпадения с заданной точностью теоретических аномалий с фактически наблюдаемыми. Расчетные точки на профилях располагались с интервалом в один км.

Начальная модель в верхней части разреза на каждом профиле представляет собой упрощенный геологический разрез, составленный по данным геологических карт масштаба 1:200000 и 1:1000000. Границы геологических тел на разрезе изображаются ломаными линиями. Линии образуют контуры сечений бесконечных горизонтальных призм расположенных перпендикулярно к плоскости разреза. Каждая призма

отождествляется с конкретным геологическим слоем (блоком). Плотность призм определяется составом преобладающих пород (табл.). Тонкие «внемасштабные» слои объединены в один слой со средневзвешенной по мощности плотностью. Призмы в узких блоках рельефа (хребты) ограничены по простиранию. Призмы, представляющие сечения интрузий тоже ограничены по простиранию. Размер таких призм определен по краевым градиентным зонам аномалий наблюдаемых над интрузиями [Сидоров, 2018].

Для более глубокой части разрезов с гнями призм отождествлялись сейсмические границы и разломы, выделенные на профилях МОВЗ и ГСЗ. Дополнительная информация о разрезе в интервале от дневной поверхности до глубины 15–20 км получена методом деконволюции Эйлера аномалий силы тяжести. Метод определяет координаты особых точек, которые указывают на положение центров тяжести, граней, углов, образующих аномалии геологических тел. Особенность метода в том, что не требуется геологических априорных знаний о возмущающих объектах. Интерпретация проведена в 2D и 3D модификациях [Geosoft Software, 2008]. В 3D варианте расчеты сделаны по данным внутри квадратного скользящего окна с размером стороны 5, 10, 15 и 20 шагов сети. Для интерпретации использована матрица поля силы тяжести с ячейкой 2x2 км. Исходя из того, что форма плотностных неоднородностей образующих аномальное поле в общем случае заранее не известна, то для всех палеток вычисления проведены с различными структурными индексами. Индексами определяется теоретическая форма возмущающих тел: уступ, тонкий и толстый пласты, горизонтальный цилиндр, сфера. Выявленные особые точки при различных заданных индексах позволяют предположить форму и положение плотностных неоднородностей. Такой подход к интерпретации дает возможность учесть весь диапазон возможных геометрических типов возмущающих масс (геологических тел) находящихся на разных глубинных горизонтах. Задаваемыми при интерпретации структурными индексами определяются параметры тел однородных по плотности идеально правильной геометрической формы. В реальной геологической среде таких правильных тел нет, можно только приближенно уподобить геологические тела каким-то графическим примитивам. Для «привязки» особых точек ранее было проведено их сопоставление с глубинными сейсмическими границами на профилях МОВЗ и ГСЗ. Также сопоставлялись проекции точек на дневную поверхность с геологическими картами. В разных структурных зонах Камчатки было установлено, что точки с индексом однородности 2 (графический примитив сфера), полученные в окнах размером более 10 шагов сети тяготеют к сейсмической границе К0, отождествляемой с кровлей консолидированной коры (гранитно-метаморфического слоя) [Сидоров и др., 2020]. Скачек плотности на контакте с вышележащим осадочно-вулканогенным слоем может

достигать 0.2–0.5 г/см³, благодаря чему граница достаточно уверенно выделяется на сейсмических разрезах, а ее морфология оказывает существенное влияние на гравитационное поле. Эта особенность использована для начального представления кровли консолидированной коры на моделях разрезов, где отсутствуют априорные данные сейсморазведки. Для точек, полученных в окнах менее 10 шагов сети с заданным индексом 2, отмечено, что многие из них локализуются на глубинах 2–4 км в осадочно-вулканогенном слое во внутренних частях контрастных по плотности блоков [Сидоров, 2018]. Такие группы точек, вероятно, отражают положение центров масс предполагаемых интрузивных тел. В поле силы тяжести блокам соответствуют локальные максимумы и минимумы с амплитудами 2–6 мГал. Сравнение проекций точек с индексом однородности 0 (графический примитив уступ) с геологическими картами показало, что часто точки группируются на границах геологических структур или вдоль линий разломов. Конечно, однозначно определить геологическую природу для всех точек невозможно. Реальная геологическая среда многообразна и неоднородна. Но в комплексе с другими геологическими и геофизическими данными особые точки дают возможность относительно адекватно представить внутреннее строение исследуемых блоков коры на моделируемых разрезах.

Все особые точки сведены в общую базу данных. Из этой базы точки проецировались на плоскости разрезов в полосе шириной от 100 до 500 м по обе стороны от профиля (рис. 3). Большинство особых точек определено по наблюдаемым аномалиям силы тяжести. В южной части Срединного хребта полуострова Камчатки, расположен выступ метаморфического фундамента [по Сляднев и др., 2007] или Камчатский срединный массив [по Трухин и др., 2008]. На отдельных участках этой структуры для нахождения особых точек кроме наблюдаемых аномалий, использовались локальные (остаточные) аномалии [Сидоров, 2015, 2018]. Остаточные аномалии получены вычитанием из наблюдаемого поля регионального фона в точках квадратной сети.

Региональный фон рассчитан осреднением аномалий силы тяжести в скользящем окне. Нахождение оптимальных размеров фильтров проведено опытным осреднением в отдельных точках площади. Точки выбирались в центре участков поля отличающихся от смежной площади характерными чертами – амплитудой, знаком, изменчивостью, формой, градиентами, простираемостью изолиний поля. Параметры трансформации определены по графикам зависимости амплитуды осредненного поля от размера фильтра:

$$\Delta'G=f(R) ,$$

где: $\Delta'G$ – средняя амплитуда аномалии внутри квадратной палетки со стороной R .

Размер палетки R увеличивался до выхода графиков на асимптоту либо до достижения внешних границ анализируемого участка. На графиках находились характерные точки

перегиба по смене знака второй производной. Абсциссы точек перегиба указывают на оптимальные размеры палеток для осреднения внутри рассмотренного участка. Срединный массив выделяется как дифференцированная область низких значений Δg вытянутая в меридиональном направлении [Трухин и др., 2008]. На графиках в северной и южной частях массива установлены характерные точки в интервале 4–5 км, а в центральной части две точки – 3 и 6.5 км. Нахождение особых точек по остаточным аномалиям проводилось только в пределах изолированных участков, перспективных для поисков сульфидных медно-никелевых месторождений, генетически связанных с интрузиями базитов. На этих участках объектами моделирования являлись никеленосные интрузии, а особые точки использовались для нахождения их пространственного положения и формы. Сводные карты трансформированных полей (остаточных и регионального фона) на площадь всей структуры срединного массива не составлялись.

Модели плотностных разрезов построены для масс расположенных в диапазоне от дневной поверхности до глубины 50 км. Для Камчатки этот интервал охватывает всю кору и часть верхней мантии. Подбор параметров разрезов выполнялся до достижения удовлетворительной сходимости графиков теоретических и наблюдаемых аномалий. Точность подбора зависела от сложности наблюдаемого поля и моделируемых разрезов. На большинстве профилей достигнуты среднеквадратичные отклонения аномалий от 0.8 до 2 мГал, что сопоставимо с точностью интерполированных гравиметрических карт наземных съемок масштаба 1:200000. Для морских отрезков профилей подбор прекращался при достижении среднеквадратичных отклонений 2.5–4 мГал. Для учета влияния масс за пределами расчетного отрезка профиля по обе стороны в модели включены полубесконечные горизонтальные слои, имитирующие вулканогенно-осадочный, верхний и нижний слои консолидированной коры, верхнюю мантию с типичными для них плотностями.

Большая часть разрезов подобрана в программе GM-SYS [Geosoft Software, 2008]. Программа рассчитывает аномалии от двумерных тел, у которых форма поперечного сечения аппроксимирована многоугольниками. Методы, используемые для расчета гравитационного и магнитного отклика модели в GM-SYS основаны на работах M. Talwani и R. Rasmussen [Talwani et al., 1959, Talwani and Heitzler, 1964, Rasmussen, R., and Pedersen, L. B., 1979], используют алгоритм описанный в работе [Won and Bevis, 1987]. Так, как для подбора использованы аномалии Буге, то для учета вклада рельефа над уровнем моря плотность "воздушного блока" определена равной плотности промежуточного слоя гравиметрических карт (2.67 г/см^3). По этой же причине, на морских отрезках профилей плотность слоя воды на разрезах определялась как $2,67 \text{ г/см}^3$, вместо реальной 1.03 г/см^3 .

В общую базу данных также частично вошли плотности, подобранные на глубинных разрезах, которые моделировались в 90-е годы прошлого века на этапе подготовки листов госгеолкарты-200 (см. выше). Моделированием решались задачи картирования структурных поверхностей – кровли консолидированной коры и кровли мезозойского фундамента в районах кайнозойского вулканизма. Для моделирования разрезов на этих профилях была применена программа PRIMA. Программа рассчитывает аномалии от призм произвольного сечения по формуле наклонной ступени. В расчетах использованы эффективные плотности, которые для каждой из призм (тел) определялись относительно средневзвешенной плотности всего моделируемого разреза. В качестве весовой функции принята площадь сечения призм. Схема вычисления аномалий приведена в публикации [Сидоров, 1994].

Пример одного из подобранных в GM-SYS глубинных плотностных разрезов приведен на рис. 4 [по Нурмухамедов и др., 2020].

После подбора разрезов следующим шагом было создание базы данных плотностей. База данных представляет собой цифровой массив точек с координатами X, Y, Z и плотностью D в каждой из них. Для нахождения координат и плотности на плоскость разрезов накладывалась квадратная сетка. Искомые параметры определялись в узлах сетки. 2D координаты вертикальных разрезов пересчитывались в плановые прямоугольные координаты СК-42. Вертикальная координата на разрезе является координатой Z в системе плоских плановых координат. Размер сетки выбирался в зависимости от детальности разрезов и его частей. От дневной поверхности до глубины 5 км ниже уровня моря расстояние между узлами сетки составляет 0.2 км, в интервале от -5 км до -10 км – 0.5 км, в интервале от -10 км до -20 км – 1 км. Глубже 20 км узлы расположены на расстоянии 2 км. Дифференцированный размер сетки для разных глубинных уровней обеспечивает достаточное количество точек для плотностной характеристики разреза, одновременно не перегружая излишними данными крупные блоки.

Данные по всем разрезам слиты в единый файл и были преобразованы в 3D-матрицу для создания объемного изображения в виде элементарных кубических ячеек объема (voxel) с уникальной плотностью для каждого куба. Этот способ изображения хорошо подходит для функций, непрерывно распределенных в пространстве, таких как плотность геологической среды. Интерполяция нерегулярных данных профилей в регулярную 3D сеть точек проведена методом 3D Кригинг в Oasis Montaj (Geosoft) [Geosoft Software, 2008]. Для визуализации данных использован вьюер Oasis Montaj. Размер кубических ячеек зависит от пространственной плотности сети исходных данных. Профили глубинных разрезов неравномерно расположены по территории. Расстояние

между смежными разрезами различно на разных участках, иногда достаточно велико. В таких местах при 3D интерполяции в матрице образуются лакуны – «пустые» фрагменты. Чтобы заполнить межпрофильное пространство недостающими данными были построены карты изолиний по глубинным горизонтам. Для этого из базы данных разрезов извлекались точки с заданной глубиной. Проводилась интерполяция в регулярную сеть 1x1 км. Интерполяция проведена методом одинарного Кригинга. Кригинг относится к геостатистическим методам интерполяции. Он базируется на статистических моделях пространственной корреляции всех измеренных значений, на основании которых прогнозирует новые значения в узлы заданной регулярной сети и дает возможность оценить точность прогнозов. Отклонения прогнозируемых значений плотности от измеренных (модельных на разрезах) в большей части точек невелики, в диапазоне 0.01–0.001 г/см³. Среднеквадратичное отклонение для разных глубинных горизонтов составило 0.005–0.031. Наибольшие погрешности наблюдались в точках верхней части разрезов, вблизи границ между телами значительно отличающихся по плотности. Из узлов грид-файла интерполированные данные (X, Y, Z, D) добавлялись в базу разрезов. Погоризонтные карты построены с шагом по глубине в 1 км.

Полученная таким образом общая база данных была использована для построения 3D матриц кубов значений плотности. Вначале было построено изображение в виде блок-диаграммы с размерами элементарного куба 4x4x4 км. Блок-диаграмма всей исследованной территории дает общее представление о распределении плотности (рис. 5). Но, для более детальной характеристики плотностных неоднородностей, особенно для верхней части земной коры, размера элементарного куба 4x4x4 км явно недостаточно. Поэтому была проведена детализация объемного изображения последовательным уменьшением размеров элементарных кубов плотности. Для этого воксельный файл (*.vox) полученный при 3D интерполяции экспортирован в текстовый файл (*.xyz), который содержит координаты центров и интерполированную плотность в кубах с ребром 4 км. Потом этот файл был объединен с первичной базой данных разрезов (без погоризонтных карт) и снова проведена 3D интерполяция с уменьшенным размером элементарной кубической ячейки 2x2x2 км. На вновь полученной блок-диаграмме появляются лакуны в местах, где недостаточно данных для изображения с заданным размером. Для дальнейшей детализации на полученном изображении визуально выбирается прямоугольный в плане участок с отсутствием лакун. Воксельный файл с ячейкой 2 км экспортируется в текстовый и из него удаляются данные кубических ячеек, находящиеся за пределами выбранного участка. Оставшаяся часть снова объединяется с первичной базой разрезов, и вся процедура повторяется уже с новым размером кубов. Чем меньше размер вокселей, тем более плавное получается изображение. Также, более

адекватно отражается форма плотностных неоднородностей вблизи разрезов. Конечно, в построенных таким образом объемных моделях не находят отражение плотностные неоднородности, аномалии от которых имеют размер меньше расстояния между смежными разрезами. Чем больше это расстояние, тем более «упрощенную» картину распределения плотности отражает объемная модель в межпрофильном пространстве.

Описанным выше способом были последовательно построены модели с элементарными кубами 2x2x2 км, 1x1x1 км (рис. 6) и 0.5x0.5x0.5 км (рис. 9) для выбранных участков. Наименьшими кубами и, соответственно, более подробно изображены плотностные неоднородности в районе Толмачевского активного магматического центра (ТАМЦ), где пересекается несколько региональных геофизических профилей. По 3D матрицам построены изоповерхности с различной плотностью. Так, форму границы между корой и верхней мантией характеризуют изоповерхности с плотностью более 3.2 г/см³, между верхней и нижней частями коры изоповерхности с плотностью от 2.9 до 3.1 г/см³. Представление о морфологии кровли консолидированной части коры дают поверхности с типичной для кристаллических сланцев плотностью 2.74—2.8 г/см³, а в районе гранито-гнейсовых куполов изоповерхности 2.50—2.65 г/см³. В средней–верхней коре изоповерхности плотностью свыше 2.85 г/см³ отображают форму блоков содержащих интрузии базитов [Сидоров, 2016б, 2018]. Выделяя и визуализируя из 3D матриц поверхности с различной плотностью можно получить представление о форме геологических структур на глубине, их объеме и металлогеническом потенциале [Сидоров, Кунгурова, 2019].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наибольшую наглядность представляют результаты моделирования в виде блок-диаграмм, причем количество видов изображений не ограничено. Современные 3D вьюеры позволяют разворачивать в пространстве блок с моделью по желанию исследователя как угодно, под любым углом, вплоть до видов снизу и сверху. Также имеется возможность «гасить» часть ячеек, из которых построена модель, изменять освещение и цветовую гамму, что улучшает восприятие плотностных структур внутри блока модели. Воксельная модель позволяет выделять и изображать поверхности равной плотности по заданной величине, вычислить объемы структур охваченных этими изоповерхностями. Кроме 3D видов модель можно представить в горизонтальных и вертикальных срезах на выбранной глубине и заданному азимуту. Ниже на рисунках 5–9 иллюстрируются примеры воксельных моделей с последовательной детализацией кубов плотности, дается их возможная геологическая расшифровка.

Представление о плотности коры и верхней мантии для Камчатки (к югу от 56° сш.) можно получить из обзорной модели с ребром элементарного куба 4 км (рис. 5). На блок-диаграмме показана изоповерхность с плотностью 3.2 г/см³. Такая плотность характерна для зоны перехода от коры к мантии. На многих отрезках плотностных моделей сейсмических разрезов эта плотность соответствует блокам ниже сейсмической границы М. На рисунке отчетливо видно ступенеобразное воздымание поверхности в сторону океана. Наибольшую глубину залегания, поверхность имеет под сушей, в западной половине полуострова, а наименьшую к востоку от глубоководного Курило-Камчатского желоба. Промежуточные глубины наблюдаются под материковым склоном, между желобом и восточным берегом полуострова. На участке погружения, в прибрежной полосе шириной 70–80 км, как со стороны суши, так и со стороны океана поверхность осложнена многочисленными выступами и впадинами. Этими морфологическими элементами в изоповерхности отражаются фрагменты структур, расположенных в нижней коре и верхней мантии. Впадины, возможно, показывают положение глубинных (мантийных) очагов современных стратовулканов вулканического пояса, и очагов питания ареальных вулканов на юго-востоке Камчатки. Выступам могут соответствовать мантийные блоки с плотным субстратом, например локальные области эклогитизации перидотитов. Конечно, геологическая интерпретация должна базироваться на комплексе разнородных данных: геологических, геофизических, геохимических, петрологических и др. Объемное плотностное моделирование является одним из методов этого комплекса. Главная задача, решаемая моделированием, это выявление в реальной геологической среде положение тех или иных скрытых структурных форм и установление их связи с геологическими объектами, наблюдаемыми на поверхности. Модели, охватывающие крупные блоки литосферы полезны при геодинамических реконструкциях. Уменьшение размера элементарной кубической ячейки модели дает возможность детализировать плотностные неоднородности внутри исследуемого блока. В качестве примера на рис. 6 приведена блок- диаграмма модели с размером элементарного куба плотности 1x1x1 км.

На диаграмме показаны изоповерхности характеризующие зону перехода между кристаллическим фундаментом и перекрывающей его вулканогенно-осадочной толщей (изоповерхность 2.75 г/см³), поверхность в пограничной зоне между нижней и верхней корой (2.9 г/см³) и у границы кора – верхняя мантия (3.2 г/см³). Максимальную неровность имеет поверхность с плотностью 2.75 г/см³. Наиболее глубокие локальные впадины отмечаются в полосе вулканов: соп. Асача – Мутновская Сопка – соп. Горелая – Вилючинская Сопка. Впадины образуют единую «депрессивную» зону, вытянутую в северо-восточном направлении. «Депрессия» видна и в форме изоповерхности 2.9 г/см³ и менее отчетливо в изоповерхности 3.2 г/см³. Амплитуда прогибов постепенно

уменьшается вниз по разрезу. Описанная структура хорошо отображается на горизонтальных картах-срезах, построенных по плотностной модели (рис. 7, 8). Наиболее контрастно «депрессия» проявлена на глубине 3 км ниже уровня моря (рис. 7б). На этом срезе структура выделяется цепочкой локальных минимумов плотности северо-восточного простирания. Перепад плотности смежных участков составляет 0.1–0.15 г/см³. Наиболее интенсивный минимум находится в истоках р. Жировая. По периферии этого минимума, в градиентных краях расположены вулканы: на западе – соп. Горелая, на северо-востоке – Вилючинская Сопка, а на юго-востоке – Мутновская Сопка.

Линейная северо-восточная зона пониженной плотности прослеживается и на более глубоких срезах 7, 10 км ниже уровня моря. В интервале между вулканом Вилючинская Сопка и селом Паратунка на разных глубинах происходит выклинивание этой полосы аномалий. Участок выклинивания совпадает с юго-западным флангом Малкинско-Петропавловской (Начикинской) складчато-глыбовой зоны поперечных дислокаций [Шеймович, 2000]. На юго-восток полоса минимумов продолжается за пределы рассматриваемого блока. Природа отмеченной полосы относительного разуплотнения связана с деструкцией геологической среды вдоль глубинного коровомантийного разлома, перекрытого на поверхности вулканогенными образованиями. Разлом достаточно уверенно выделяется по данным МОВЗ на профиле бух. Ходутка–с. Николаевка. Деструкция коры является одним из определяющих факторов миграции к поверхности глубинных магм и флюидов. В линейной проницаемой зоне находятся питающие системы вулканов.

Повышенная проницаемость коры отмечается и в области ареального вулканизма западнее описанной линейной структуры. Об этом свидетельствуют локальные впадины в изоплотностных поверхностях на различных глубинных уровнях (рис. 6). Форма этих структур преимущественно изометрическая. На глубинных срезах (рис. 7, 8) впадины отражаются локальными минимумами плотности с амплитудой 0.04–0.1 г/см³ по отношению к разделяющим их участкам.

В центральной части модели с элементарными кубами 1x1x1 км в горизонтальных сечениях на уровне моря (рис. 7а) и –3 км (рис. 7б) локальные плотностные минимумы располагаются вокруг блока с относительно повышенной плотностью, образуя своеобразную кольцевую структуру. Сопоставление с геологической картой (рис. 1) среза на уровне моря показывает, что на площади охватываемой минимумами на дневной поверхности развиты осадочные толщи и вулканические комплексы с преобладающими породами невысокой плотности (кислого состава).

Один из обширных и контрастных на уровне моря (см. рис. 7а) минимумов расположен к югу от озера Начикинского, примерно до широты р. Карымчина (в северо-

восточном углу модели с ребром элементарного куба 0.5 км). Центральная часть минимума находится в междуречье Банной и Карымчиной, в их верхнем течении и в плане соответствует палеовулкану, в центре которого расположена г. Горячая. [Геологическое строение..., 1980; Нурмухамедов, 2017]. По данным госгеолкарты масштаба 1:200000 [Боровцов и др., 2013] в центре минимума наблюдаются выходы липаритов питающей системы [Электронный каталог..., 2020а, 2020б] (экструзивно-жерловые образования) Крохченковского палеовулкана [Электронный каталог..., 2020в, 2020д]. А в целом, отмеченный минимум близок по форме к Банной депрессионной вулcano-тектонической структуре II-го порядка [Электронный каталог..., 2020г, 2020д]. На срезе –3 км (рис. 7б) этот контрастный минимум «исчезает», превращаясь во фрагмент кольцеобразной зоны относительно пониженной плотности геосреды на этой глубине. Исчезновение минимума свидетельствует о том, что малоплотные породы, слагающие вулcano-тектоническую структуру и палеовулкан, сосредоточены от дневной поверхности до глубины –3 км.

Отмеченная выше кольцевая структура с плотным участком в центре (рис. 7) охватывает территорию Толмачевского активного магматического центра (ТАМЦ) [Нурмухамедов, 2017], описанного ранее при анализе глубинных разрезов вдоль профилей МОВЗ влк. Сопка Опала – р. Вахиль [Nurmukhamedov and Sidorov, 2019] и профиля п. Апача - бух. Мутная [Нурмухамедов и др., 2020]. На отрезках профилей пересекающих данный район в плотностных моделях разрезов выделяются блоки с повышенной плотностью относительно смежных участков (см. рис 4). Избыточная плотность изменяется от 0.08 г/см³ до 0.25 г/см³. По вертикали аномальная плотность в блоках прослеживается от подошвы коры до глубины 2-3 км ниже уровня моря. Предполагается, что увеличение плотности в этих блоках, связано с наличием в них интрузивных масс основного и возможно ультраосновного состава [Нурмухамедов и др., 2020; Nurmukhamedov and Sidorov, 2019]. По отдельным разрезам трудно представить реальное положение в пространстве и форму этой насыщенной интрузиями области геологической среды. Бóльшую наглядность дает объемная плотностная модель.

Для уточнения внутреннего строения ТАМЦ была построена модель с элементарным кубом 0.5x0.5x0.5 км (границы модели показаны на рис. 1, 2, 3, 6, 7, 8). В модели интерполирована изоповерхность с плотностью 2.85 г/см³, которая дает представление о форме и расположении массивных блоков с интрузиями (рис. 9). Например, в Камчатском срединном массиве (площадь, примыкающая с севера к рассматриваемой) такая объемная плотность характерна для блоков, состоящих из магматических пород основного ряда с «примесью» некоторой доли матрикса пород вмещающих толщ [Сидоров, Кунгурова, 2019].

На блок-диаграмме видно, что область повышенной плотности расположена северо-западнее оз. Толмачева, имеет столбообразную форму, похожую на ассиметричный гриб. Наиболее контрастно выделяется в верхней коре. Верхняя кромка в отдельных выступах поднимается до глубины 2-3 км ниже уровня моря. На срезах 7 и 10 км ниже уровня моря (рис. 8) видно, что столбообразная часть структуры незначительно вытянута в северо-восточном направлении. В интервале 4-8 км ниже уровня моря наблюдается субгоризонтальное ответвление от главной столбообразной зоны, которое постепенно выклинивается в юго-западном направлении на расстоянии 5-6 км от нее. Судя по форме области с аномальной плотностью здесь можно предполагать наличие пластовых базитовых интрузий.

В изоповерхности 3.2 г/см^3 на глубине около -40 км , в зоне перехода от коры к верхней мантии, виден прогиб поверхности круглой формы прямо под столбом из плотных коровых блоков. Ранее, при рассмотрении материалов МОВЗ и моделей плотностных разрезов было предположено, что образование массивной структуры в коре связано с наличием активной проницаемой зоны между земной корой и верхней мантией [Nurmukhamedov and Sidorov, 2019]. Отмеченный в поверхности 3.2 г/см^3 прогиб показывает, как выглядит проницаемая зона на этом глубинном уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Описана методика построения объемной модели распределения плотности в коре и верхней мантии на примере крупного блока коры в южной части полуострова Камчатка. Основой модели служат результаты количественной интерпретации аномалий Буге.

2. Создание объемного изображения плотностной модели состоит из нескольких этапов. На первом этапе моделируются глубинные плотностные разрезы на отдельных профилях. В качестве априорных данных привлекаются материалы геологических, геофизических, петрофизических исследований, а также результаты определения глубины до особых точек по аномалиям силы тяжести. Методом подбора рассчитываются глубинные разрезы, состоящие из смежных блоков, в которых определена модельная плотность. Интерпретация проводится на исследуемой территории по сети пересекающихся профилей. Результаты интерпретации на отдельных профилях контролируются в местах их взаимных пересечений.

3. На следующем этапе из моделей глубинных разрезов создается объемное изображение в виде блок-диаграмм состоящих из кубов значений плотности разного размера. Координаты и модельная плотность в плоскости разрезов определяются в узлах квадратной сетки. Координаты из вертикальной плоскости разрезов пересчитываются в плановые прямоугольные координаты СК-42. Создается база (БДП) нерегулярных данных

(файл) глубинных разрезов, в которой хранятся координаты точек X, Y, Z и значение плотности D в них. На участках с увеличенным расстоянием между соседними разрезами создается дополнительная база данных. Для этого интерполируются карты плотности на различных глубинных горизонтах. Из узлов созданных грид-файлов интерполированные данные добавляются в базу разрезов. Затем нерегулярные данные профилей преобразуются в регулярную 3D сеть точек для объемного изображения в виде элементарных кубических ячеек плотности (voxel) геосреды размером 4x4x4 км. Для локализации плотностных неоднородностей на отдельных участках исследуемого блока земной коры проводится последовательное уменьшение размеров элементарных кубических ячеек плотности. Построены блок-диаграммы с ребром элементарного куба плотности 2, 1 и 0.5 км.

4. Результаты объемного моделирования представлены в виде блок-диаграмм и карт изолиний плотности в горизонтальных срезах на разной глубине. Блок-диаграммы состоят из кубических ячеек с различной плотностью и размера. На блок-диаграммах также изображены изоповерхности с плотностью типичной для границ верхней части литосферы. Например, на рассмотренной территории изоповерхность 2.75 г/см^3 характеризует морфологию кровли кристаллического фундамента на участках, где он представлен метаморфическими породами высоких фаций регионального метаморфизма. Изоповерхность 2.9 г/см^3 дает представление о границе между нижней и верхней корой, а изоповерхности 3.2 г/см^3 и 3.33 г/см^3 вероятную форму раздела кора - верхняя мантия.

5. В объемной модели с размером ребра элементарного куба 1 км вдоль восточного берега полуострова выделяется линейная зона пониженной плотности северо-восточного простирания. В этой зоне расположены активные в недавнем прошлом и ныне действующие вулканы: соп. Асача, влк. Мутновская Сопка, соп. Горелая, влк. Вилючинская Сопка и др. Пониженная плотность прослеживается на всю мощность коры и объясняется деструкцией геологической среды вдоль глубинного разлома, перекрытого на поверхности вулканогенными образованиями. В линейной проницаемой зоне находятся питающие системы вулканов.

В детализированной части модели (ребро элементарного куба 0.5 км) выделена изоповерхность с плотностью 2.85 г/см^3 , которой оконтурена область блоков повышенной плотности столбообразной формы в земной коре. Предполагается, что повышенная плотность этой части геосреды связана с интрузиями базитового состава. В интервале 4-8 км ниже уровня моря наблюдается субгоризонтальное ответвление от основной магматической колонны в юго-западном направлении, в котором можно предполагать наличие пластовых интрузий.

Объемные плотностные модели дают полезную информацию для геодинамических реконструкций позволяют приближенно определять форму геологических структур, их объемы. Объемные модели, являясь результатом интерполирования данных плотностных моделей плоских вертикальных разрезов, могут служить основой для создания первичных моделей состоящих из трехмерных тел и 3D моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

- Аносов Г. И., Биккенина С. К., Попов А. А., Сергеев К. Ф., Утнасин В. К., Федорченко В. И.** Глубинное зондирование Камчатки. М., Наука, 1978, 134 с.
- Балеста С. Т.** Земная кора и магматические очаги современного вулканизма. М., Наука, 1981, 134 с.
- Боровцов А. К., Сидоренко В. И., Щенко В. И.** Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Хангарская. Лист N-57-XX (Ганалы). Объяснительная записка. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 2001, 147 с.
- Боровцов А. К., Ярыш Г. В., Бархатов Ю. В.** Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Хангарская. Лист N-57-XXVI (Дальний). Объяснительная записка. М., МФ ВСЕГЕИ, 2013, 181 с.
- Геологическое строение, новейший вулканизм и современная структура Южной Камчатки. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки / **Отв. ред. Масуренко Ю. П.** М., Наука, 1980, с. 7—78.
- Мишин В. В.** Глубинное строение и типы земной коры юга Камчатки // Тихоокеанская геология, 1996, № 1, с. 110—119.
- Мишин В. В.** Геолого-геофизическое строение юга Камчатки. // Тихоокеанская геология, 1997, № 4, с. 64—70.
- Нурмухамедов А. Г.** Банные и Карымчинские гидротермальные системы – источники энергии на юге Камчатки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2017, № 12, Камчатка-5, М., Горная книга, Специальный выпуск 32, с. 347—367.
- Нурмухамедов А. Г., Сидоров М. Д., Мороз Ю. Ф.** Модель глубинного строения земной коры и верхней мантии в районе Карымшинского золоторудного узла по геофизическим данным (Южная Камчатка). // Георесурсы, 2020, № 22(1), с. 63—72. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.63-72>
- Потапьев С. В.** Рекогносцировочные исследования ГСЗ на Западной Камчатке // Труды Сах.КНИИ, сб. №5, 1974, вып. 37, с.49—61.
- Попов А. А., Аносов Г. И., Аргентов В. В. и др.** Строение земной коры по сейсмическим данным // Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы / Ред. Сергеев К. Ф., Красный М. Л. Л.: ВСЕГЕИ, 1987, л. 18.
- Сидоров М.Д.** Картирование мезозойского фундамента Авачинско-Корякской группы вулканов (Камчатка) методом плотностного моделирования // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4–5. С. 99—105.
- Сидоров М. Д., Степанов В. А.** Геофизические поля и никеленосность Камчатского срединного массива // Вестн.КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. Петропавловск-Камчатский, 2006, вып. 8, № 2, с. 140—150.
- Сидоров М.Д.** Плотностное моделирование магматических структур в Колпаковском перспективном никеленосном районе (срединный массив, Камчатка) // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. № 3. С. 31—41.
- Сидоров М. Д.** Технология объемного изображения результатов глубинного плотностного моделирования геологических структур // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал), Камчатка-3, Специальный выпуск 31, 2016, № 11, с. 9—12.

Сидоров М. Д. Плотностная модель Камчатского срединного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), Камчатка-3, Специальный выпуск 31, 2016, № 11, с. 83—87.

Сидоров М. Д. Глубинное строение Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны по результатам плотностного моделирования (срединный массив, Камчатка) // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле, 2018, № 2. Выпуск 38, с. 34—44. DOI: 10.31431/1816-5524-2018-2-38-34-44.

Сидоров М. Д., Кунгурова В. Е. Определение продуктивности рудно-магматических систем Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны по плотностной модели (камчатский срединный массив) // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН, 2019, № 2, с. 3—10. DOI: [10.34078/1814-0998-2019-2-3-10](https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-2-3-10).

Сидоров М. Д., Разумный А. В., Исаева Е. П. Модель земной коры и тектоническое районирование переходной зоны континент – океан Чукотско-Корякско-Камчатского сектора Тихоокеанского складчатого пояса // Региональная геология и металлогения, 2020, № 82, с. 69—82.

Сляднев Б. И., Шаповаленко В. Н., Крикун Н. Ф. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист N-57. Петропавловск-Камчатский. Объяснительная записка. СПб., Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2007, 206 с.

Трухин Ю.П., Степанов В.А.Сидоров М.Д. Камчатская никеленосная провинция // ДАН, Т.418, №6, 2008, с 802-805. DOI:10.1134/S1028334X08020050

Шеймович В. С. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Южно-Камчатская. Листы N-57-XXI (Северные Коряки), N-57-XXVII (Петропавловск-Камчатский), N-57-XXXIII (сопка Мутновская). Объяснительная записка. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2000, 302 с.

Электронный каталог ГГК-200. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-57/n-57-26/1/index.html#zoom=13&lat=52.8389&lon=157.8404> (Accessed 2020/11/03).

Электронный каталог ГГК-200. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-57/n-57-26/11/index.html#zoom=14&lat=0.45742&lon=158.09892> (Accessed 2020/11/03).

Электронный каталог ГГК-200. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-57/n-57-26/17/index.html#zoom=12&lat=52.8346&lon=157.6496> (Accessed 2020/11/03).

Электронный каталог ГГК-200. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-57/n-57-26/17/index.html#zoom=10&lat=52.925&lon=157.645> (Accessed 2020/11/03).

Электронный каталог ГГК-200. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-57/n-57-26/18/index.html#zoom=13&lat=-0.1285&lon=157.5039> (Accessed 2020/11/03).

Geosoft Software: Oasis montaj, GM-SYS, Euler 3D. URL: <http://www.geosoft.com/ru> (Accessed 2008/01/28).

Nurmukhamedov A. G. and Sidorov M. D. Deep structure and geothermal potential along the regional profile set from Opala Mountain to Vakhil' River (Southern Kamchatka). 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 249, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012041>.

Rasmussen, R., and Pedersen, L. B., 1979, End collections in potential field modeling: Geophysical Prospecting, 27, 749—760.

Talwani, M., Worzel, J. L., and Landisman, M., 1959, Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone: J. Geophys. Res., 64, 49—59.

Talwani, M., and Heirtzler, J. R., 1964, Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional bodies of arbitrary shape, in Parks, G. A., Ed., Computers in the mineral industries, Part 1: Stanford Univ. Publ., Geological Sciences, 9, 464—480.

Won. I. J., and Bevis, M., 1987, Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines: Geophysics. 52, 232—238.

REFERENCES

- Anosov G. I., Bikkenina S. K., Popov A. A., Sergeev K. F., Utnasin V. K., Fedorchenko V. I. Glubinnoe zondirovanie Kamchatki. M., Nauka, 1978, 134 p. (In Russ.)
- Balesta S. T. Zemnaya kora i magmaticheskie ochagi sovremennogo vulkanizma. M., Nauka, 1981, 134 p. (In Russ.)
- Borovtsov A. K., Sidorenko V. I., Shchenko V. I. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200 000. Seriya Khangarskaya. List N-57-XX (Ganaly). Ob'yasnitel'naya zapiska. SANKT-PETERBURG, 2001, 147 p. (In Russ.)
- Borovtsov A. K., Yarysh G. V., Barkhatov Yu. V. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200 000. Seriya Khangarskaya. List N-57-XXVI (Dal'niy). Ob'yasnitel'naya zapiska. M., MF VSEGEI, 2013, 181 p. (In Russ.)
- Geologicheskoe stroenie, noveyshiy vulkanizm i sovremennaya struktura Yuzhnoy Kamchatki. Dolgozhivushchiy tsentr endogennoy aktivnosti Yuzhnoy Kamchatki / Otv. red. Masurenko Yu. P. M., Nauka, 1980, pp. 7—78. (In Russ.)
- Mishin V. V. Glubinnoe stroenie i tipy zemnoy kory yuga Kamchatki // Tikhookeanskaya geologiya, 1996, № 1, pp. 110—119.
- Mishin V. V. Geologo-geofizicheskoe stroenie yuga Kamchatki. // Tikhookeanskaya geologiya, 1997, № 4, pp. 64—70.
- Nurmukhamedov A. G. Bannye i Karymchinskie gidrotermal'nye sistemy – istochniki energii na yuge Kamchatki // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), 2017, № 12, Kamchatka-5, M., Gornaya kniga, Spetsial'nyy vypusk 32, pp. 347—367.
- Nurmukhamedov A. G., Sidorov M. D., Moroz Yu. F. Model' glubinnogo stroeniya zemnoy kory i verkhney mantii v rayone Karymshinskogo zolotorudnogo uzla po geofizicheskim dannym (Yuzhnaya Kamchatka). // Georesursy, 2020, № 22(1), pp. 63—72. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.63—72>.
- Potap'ev S. V. Rekognostsirovocnyye issledovaniya GSZ na Zapadnoy Kamchatke // Trudy Sakh.KNII, sb. №5, 1974, vyp. 37, pp.49—61
- Popov A. A., Anosov G. I., Argentov V. V. i dr. Stroenie zemnoy kory po seysmicheskim dannym // Geologo-geofizicheskiy atlas Kurilo-Kamchatskoy ostrovnnoy sistemy / Red. Sergeev K. F., Krasnyy M. L. L.: VSEGEI, 1987, l. 18.
- Sidorov M.D. Mapping Mesozoic basement of the Avachinsky-Koryaksky group of volcanoes (Kamchatka) by the method of density modeling // Vulkanologiya i seysmologiya. 1994. No 4–5, pp 99—105. (In Russian).
- Sidorov M. D., Stepanov V. A. Geofizicheskie polya i nikelenosnost' Kamchatskogo sredinnogo massiva // Vestn.KRAUNTS. Ser. Nauki o Zemle. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2006, vyp. 8, № 2, pp. 140—150.
- Sidorov M. D. Tekhnologiya ob'emnogo izobrazheniya rezul'tatov glubinnogo plotnostnogo modelirovaniya geologicheskikh struktur // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), Kamchatka-3, Spetsial'nyy vypusk 31, 2016, № 11, pp. 9—12.

Sidorov M. D. Plotnostnaya model' Kamchatskogo sredinnogo massiva // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), Kamchatka-3, Spetsial'nyy vypusk 31, 2016, № 11, pp. 83—87.

Sidorov M. D. Glubinnoe stroenie Kvinum-Kuvalorogskoy nikelenosnoy zony po rezul'tatam plotnostnogo modelirovaniya (sredinnyy massiv, Kamchatka) // Vestnik KRAUNTS, Nauki o Zemle, 2018, № 2. Vypusk 38, pp. 34—44. DOI: 10.31431/1816-5524-2018-2-38-34-44.

Sidorov M. D., Kungurova V. E. Opredelenie produktivnosti rudno-magmaticeskikh sistem Kvinum-Kuvalorogskoy nikelenosnoy zony po plotnostnoy modeli (kamchatskiy sredinnyy massiv) // Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN, 2019, № 2, pp. 3—10. DOI: 10.34078/1814-0998-2019-2-3-10.

Sidorov M. D., Razumnyy A. V., Isaeva E. P. Model' zemnoy kory i tektonicheskoe rayonirovanie perekhodnoy zony kontinent $\frac{3}{4}$ okean Chukotsko-Koryaksko-Kamchatskogo sektora Tikhookeanskogo skladchatogo poyasa // Regional'naya geologiya i metallogeniya, 2020, № 82, pp. 69—82.

Slyadnev B. I., Shapovalenko V. N., Krikun N. F. i dr. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). List N-57. Petropavlovsk-Kamchatskiy. Ob'yasnitel'naya zapiska. SPb., Izd-vo SPb kartfabriki VSEGEI, 2007, 206 p. (In Russ.)

Yu.P. Trukhin, V.A. Stepanov, M.D. Sidorov, 2008, The Kamchatka Nickel-Bearing Province // published in Doklady Akademii Nauk, 2008, Vol. 418, No. 6, pp. 802—805. DOI:10.1134/S1028334X08020050

Sheymovich V. S. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy federatsii masshtaba 1:200 000. Seriya Yuzhno-Kamchatskaya. Listy N-57-XXI (Severnye Koryaki), N-57-XXVII (Petropavlovsk-Kamchatskiy), N-57-XXXIII (sopka Mutnovskaya). Ob'yasnitel'naya zapiska. SPb.,Izd-vo VSEGEI, 2000, 302 p. (In Russ.)

Elektronnyy katalog GGK-200. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-57/n-57-26/1/index.html#zoom=13&lat=52.8389&lon=157.8404> (Accessed 2020/11/03).

Elektronnyy katalog GGK-200. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-57/n-57-26/11/index.html#zoom=14&lat=0.45742&lon=158.09892> (Accessed 2020/11/03).

Elektronnyy katalog GGK-200. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-57/n-57-26/17/index.html#zoom=12&lat=52.8346&lon=157.6496> (Accessed 2020/11/03).

Elektronnyy katalog GGK-200. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-57/n-57-26/17/index.html#zoom=10&lat=52.925&lon=157.645> (Accessed 2020/11/03).

Elektronnyy katalog GGK-200. URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/n-57/n-57-26/18/index.html#zoom=13&lat=-0.1285&lon=157.5039> (Accessed 2020/11/03).

Geosoft Software. Oasis montaj. URL: <http://www.geosoft.com/ru> (Accessed 2008/01/28).

Rasmussen, R., and Pedersen, L. B., 1979, End collections in potential field modeling: Geophysical Prospecting, 27, 749—760.

Talwani. M., Worzel, J. L., and Landisman. M., 1959, Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone: J. Geophys. Res., 64, 49—59.

Talwani, M., and Heirtzler, J. R., 1964, Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional bodies of arbitrary shape, in Parks. G. A., Ed., *Computers in the mineral industries, Part 1: Stanford Univ. Publ., Geological Sciences*, 9, 464-480.

Won. I. J., and Bevis, M., 1987, Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines: *Geophysics*. 52, 232—238.

Nurmukhamedov A. G. and Sidorov M. D. Deep structure and geothermal potential along the regional profile set from Opala Mountain to Vakhil' River (Southern Kamchatka). 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 249, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012041>.

Рис. 1. Схематическая обзорная геологическая карта южной части полуострова Камчатка (по материалам ГГК-1000 [Сляднев и др., 2007] с упрощениями и дополнениями авторов). Расположение площади в регионе показано на рис. 2.

1 □ квартал. Рыхлые аллювиальные, пролювиальные, ледниковые, гляциофлювиальные, болотные отложения. Галечники, пески, гравийники, валунники, глины, суглинки, супеси, илы, торф; 2—3 □ квартал. Покровные фации вулканических комплексов преимущественно кислого (2), средне-основного и основного (3) состава. Риолиты, дациты, игнимбриты, базальты, андезибазальты, андезиты, туфы, лавобрекчии, шлаки; 4 □ 5 □ кайнозой, олигоцен-плиоцен. Покровные фации вулканических комплексов преимущественно кислого (4), средне-основного и основного (5) состава. Игнимбриты кислого состава, базальты, андезибазальты, андезиты, их туфы, туффиты; 6 □ кайнозой, эоцен □ плиоцен. Осадочные толщи. Песчаники, туфопесчаники, алевролиты, туфоалевролиты, конгломераты, гравелиты, туффиты, аргиллиты, каменные угли; 7 □ мезозой, верхний мел □ палеоген, палеоцен. Покровные фации вулканических комплексов. Туфы базальтов, андезибазальтов, андезитов, трахибазальтов, кремни, базальты, андезиты, песчаники, туфопесчаники; 8 □ мезозой, нижний □ верхний мел. Алевролиты, аргиллиты, песчаники, аспидные сланцы, метапесчаники, метаалевролиты, филлиты, кварц-хлоритовые сланцы, в локальных зонах гранат-биотитовые сланцы; 9—11 □ Северо-западно-Тихоокеанский мегабассейн: 9 □ плиоцен □ квартал. Кроноцкий сейсмокомплекс. Туфодиазомиты, туффиты, конгломераты, брекчии, гравелиты, песчаники, глины; 10 □ средний эоцен □ верхний миоцен. Ольгинский сейсмокомплекс. Песчаники, туфопесчаники, туфодиазомиты, алевролиты, туфы, конгломераты; 11 □ нижний мел □ эоцен. Акустический фундамент. Сложнодислоцированные кремнисто-вулканогенные, осадочные и интрузивные образования; 12—13 □ субвулканические образования кислого (12), среднего и основного (13) состава. Риолиты, дациты, андезиты, андезибазальты, диорит-порфириды, базальты, долериты; 14—15 □ плутонические образования кислого (14), среднего и основного (15) состава. Граниты, гранодиориты, кварцевые диориты, диориты, кварцевые монзониты, габбро, нориты, пироксениты; 16 □ геологические границы между разновозрастными образованиями (а), несогласного залегания (б); 17—18 □ разрывные нарушения: 17 □ главные (структурообразующие) выходящие на дневную поверхность (а), скрытые под вышележащими образованиями (б); 18 □ второстепенные разломы выходящие на дневную поверхность (а), скрытые под вышележащими образованиями (б); 19—20 □ прочие обозначения: 19 □ кратеры действующих вулканов не выражающиеся в масштабе карты (а), шлаковые конусы (б), гейзеры и фумаролы (в); 20 □ границы 3D плотностной модели с размером элементарной ячейки 0.5x0.5x0.5 км; 21 □ юго-западная граница Малкинско-Петропавловской (Начикинской) складчато-глыбовой зоны поперечных дислокаций.

Рис. 2. Обзорная схема (а) и схема расположения опорных глубинных разрезов (б).

1 □ 3 опорные глубинные разрезы: 1 □ профили ГСЗ; 2 □ пункты МОВЗ-МТЗ и линии разрезов (О-В □ влк. Сопка Опала □ р. Вахиль, А-К □ п. Апача □ п. Крапивная, К-К □ р. Коль □ мыс Калыгирь, А-М □ п. Апача □ бух. Мутная, Х-Н □ бух. Ходутка □ п. Николаевка, О-А □ с. Нижн. Облуковина □ г. Андриановка; 3 □ прочие глубинные разрезы с 2D плотностным моделированием; 4 □ границы 3D плотностных моделей с размерами элементарной ячейки 4x4x4 км (а), 1x1x1 км (б) и 0.5x0.5x0.5 км (в).

Рис. 3. Проекции особых точек типа «уступ, дамба» (а) и «сфера» (б) на дневную поверхность в районе ТАМЦ в южной части полуострова Камчатка.

1 □ линии глубинных плотностных разрезов; 2 □ особые точки: а □ структурный индекс 0 (уступ), б □ структурный индекс 2 (сфера), в □ точки, использованные для построения первичных моделей разрезов; 3 □ вулканы. Теневое изображение рельефа приведено в границах модели с ребром элементарной ячейки 0.5 км.

Рис. 4. Плотностная модель вдоль профиля п. Апача □ бух. Мутная [Нурмухамедов и др., 2020] с дополнениями.

1 □ сейсмические границы по данным МОВЗ (а □ граница Мохоровичича; б, в □ другие сейсмические границы, выделенные в земной коре); 2 □ точки МОВЗ и их номера; 3 □ границы блоков и среднее для них значение плотности (г/см^3), 4 □ узлы сетки, в которых определялись 2D координаты и модельная плотность.

Рис. 5. Блок-диаграмма плотностной модели земной коры южной части полуострова Камчатка. Вид с юго-запада. Размер элементарной ячейки 4x4x4 км. Вертикальный масштаб увеличен в два раза, часть ячеек в модели погашена. Рельеф поднят на 5 км, истинный уровень моря показан линией голубого цвета.

1 □ изоповерхность с плотностью 3.2 г/см^3 .

Рис. 6. Блок-диаграмма плотностной модели земной коры южной части полуострова Камчатка. Вид с юга. Размер элементарной 3D ячейки 1x1x1 км. Вертикальный масштаб рельефа земной поверхности увеличен в два раза, часть ячеек в модели «погашена». Рельеф поднят на 10 км, истинный уровень моря показан линией голубого цвета. Красным контуром на дневной поверхности показаны границы блока с размером элементарной ячейки 0.5x0.5x0.5 км.

1 □ морфология изоплотностных поверхностей выделенных по модели: с плотностью 2.75 г/см^3 (1); 2.9 г/см^3 (2); 3.2 г/см^3 (3); 3.33 г/см^3 (4).

Рис. 7. Карты-срезы плотностной 3D модели земной коры южной части полуострова Камчатка с размером элементарной ячейки 1x1x1 км на уровне моря (а) и глубине 3 км ниже уровня моря (б). Изоденсы проведены через 0.2 г/см^3 на рисунке а и через 0.1 г/см^3 на рисунке б.

1 □ изоденсы основные; 2 □ изоденсы промежуточные; 3 □ граница блока плотностной модели с размером элементарной ячейки 0.5x0.5x0.5 км; 4 □ вулканы действующие (а), потухшие (б).

Рис. 8. Карты-срезы плотностной 3D модели земной коры южной части полуострова Камчатка с размером элементарной ячейки 1x1x1 км на глубине 7 км (а) и 10 км (б) ниже уровня моря. Изоденсы проведены через 0.1 г/см³. Условные обозначения на рис. 7.

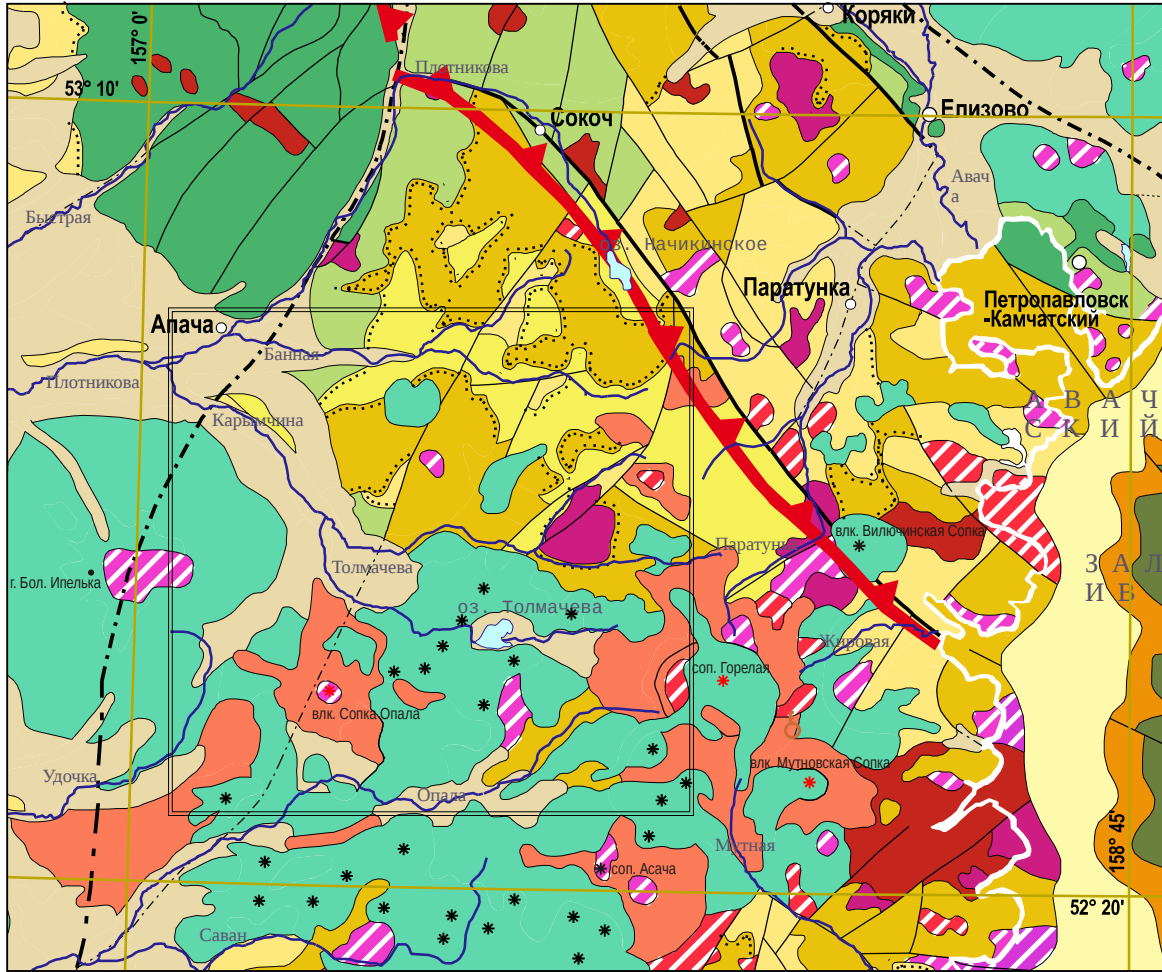
Рис. 9. Блок-диаграмма плотностной модели земной коры в южной части полуострова Камчатка. Вид с юго-востока. Размер элементарной 3D ячейки 0.5x0.5x0.5 км. Вертикальный масштаб рельефа земной поверхности увеличен в два раза, часть ячеек в модели «погашена». Рельеф поднят на 10 км, истинный уровень моря показан линией голубого цвета.

1 □ морфология изоплотностных поверхностей выделенных по модели: с плотностью 2.85 г/см³ (1); 3.2 г/см³ (2).

Таблица. Плотность горных пород района. [Боровцов и др., 2001, 2013; Сляднев и др., 2007; Шеймович, 2000].

Стратиграфическая группа, тип образований	Серии, свиты, толщи, вулканические (ВК) и плутонические (ПК) комплексы	Преобладающие породы	Плотности: курсивом средние, в скобках миним. и максим. значения, г/см ³
1	2	3	4
Четвертичные вулканогенные образования	тундровский ВК	базальты и их шлаки	2.44 (1.0—2.8)
	толмачёвский ВК, паужетский ВК	игнимбриты, спекшиеся туфы дацитов, дациандезитов, риолиты	2.34 (2.1—2.48)
	левоопалинский ВК, веселовский ВК, большеипелькинский ВК	базальты, андезибазальты, андезиты, туфы, лавобрекчии, шлаки, трахибазальты, трахиандезиты	2.64 (1.88—2.84)
	балаганчиковский ВК	риолиты, дациты, игнимбриты	2.27, 2.44, 2.34
Эоцен–плиоценовые осадочные образования	беляевская, попереченская, асачинская толщи	песчаники, алевролиты, конгломераты, туффиты туфопесчаники, туфоалевролиты, туфоконгломераты	2.49 (2.1—2.53)
	мутновская, жировская толщи		2.50 (2.3—2.65)
	васильевская, пресновская толщи		2.60 (2.20—2.70)
Эоцен–плиоценовые вулканогенные образования	голыгинский (начикинский) ВК	андезиты, андезибазальты, базальты, дациты	2.55 (2.15—2.85)
	вичаевский ВК	андезиты, андезибазальты, дациты, риолиты	2.46 (2.20—2.70)
	карымшинский ВК	игнимбриты, риолиты, дациты, туфы	2.51, 2.20, 2.52, 2.41
	ахомтенский ВК	игнимбриты, туфы, андезиты, базальты	2.54 (2.44—2.84)
	южнобыстринский ВК, прибрежный ВК	андезиты, базальты, андезибазальты, туфы	2.77 (2.71—2.79)
Мел–палеоценовые вулканогенные образования	кирганикский ВК	туфы, трахибазальты, туффиты,	2.71, 2.88, 2.79
Меловые вулканогенные образования	ирунейский ВК, никольский ВК	кремнистые сланцы, туфы, туффиты, базальты	2.70 (2.66—2.80)
	алисторский ВК	метапикриты, метабазальты,	2.90 (2.70—3.09)

Меловые осадочные образования	никольская толща, химкинская, хозгонская, хейванская свиты	филлиты, метапесчаники, метаалевролиты, хлоритовые, серицитовые сланцы,	2.66 (2.57—2.75)
	стеновая серия	зеленые сланцы	2.79 (2.47—3.00)
Домеловые метаморфические подразделения	ганальская метаморфическая серия	амфиболиты и амфиболовые гнейсы	2.78 (2.64—3.05)
		слюдяные гнейсы и кристаллические сланцы	2.89 (2.79—2.94)
	камчатская, колпаковская метаморфические серии	плагиогнейсы	2.64 (2.57—2.71)
		кристаллосланцы	2.74 (2.64—2.84)
		мигматиты	2.65 (2.51—2.73)
		амфиболиты	2.91 (2.63—3.09)
Плутонические образования	плотниковский ПК	диориты, гранодиориты	2.70 (2.35—2.98)
	ахонтенский ПК		2.69 (2.30—2.85)
	кусапакский ПК	диориты	2.63 (2.60—2.76)
	юрчикский ПК	габбро	2.86 (2.68—3.05)
	левоандриановский ПК	кварцевые монцониты	2.71 (2.58—2.81)
	камешковский ПК	лампрофиры	2.73 (2.68—2.76)
	кольский ПК	граниты, плагиограниты, кварцевые диориты	2.64 (2.54—2.71)
		гранодиориты	2.75 (2.63—2.81)
	дукукский ПК	диориты, габбро, нориты, пироксениты	2.90 (2.80—3.03)
карагинский (вахталкинский) ПК	серпентинизированные дуниты, гарцбургиты, габбро	2.89 (2.69—3.30)	



10 0 10 20 км

