

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ КВИНУМ-КУВАЛОРОГСКОЙ НИКЕЛЕНОСНОЙ ЗОНЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПЛОТНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (СРЕДИННЫЙ МАССИВ, КАМЧАТКА)

© 2018 М.Д. Сидоров

*Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683002; e-mail: nigtc@kscnet.ru*

Исследовано глубинное строение южной части Дукукского рудного района — Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны. Построена трехмерная плотностная модель земной коры до глубины 20 км. Выявлены массивные блоки, содержащие никеленосные интрузии базитового-ультрабазитового состава. Блокам соответствуют локальные аномалии Буге. Установлены форма и глубина залегания неэродированных интрузий. Локальные максимумы силы тяжести в Квинум-Кувалорогской зоне являются перспективными площадями на обнаружение медно-никелевых руд.

Ключевые слова: плотность, модель, аномалия, интрузия, срединный массив, никель.

ВВЕДЕНИЕ

В Срединном хребте Камчатки расположен Камчатский срединный массив (КСМ), известный по литературе также как Срединный Камчатский выступ метаморфических пород, Центрально-Камчатский кристаллический массив (рис. 1а). Срединный массив рассматривается как никеленосная территория с прогнозируемыми ресурсами более 1 млн т. (Трухин и др., 2008). Геологическими исследованиями установлено, что кобальт-медно-никелевое сульфидное оруденение генетически связано с распространенными в срединном массиве интрузиями дукукского габбро-норит-кортландитового плутонического комплекса. На северном фланге массива разведано и эксплуатируется месторождение Шануч, которое по генезису относится к типу регенерированных месторождений, сформированных в процессе магматического и гидротермального переотложения рудного вещества (Лихачев, 2006), выделившегося в промежуточных магматических камерах и каналах проводниках. В КСМ существует два типа рудоносных массивов (Полетаев, 2004). Первый тип — линейные малые интрузии длиной до 1 км и мощностью десятки метров. Ко второму типу относятся относительно крупные (20–30 км²) изометричные в плане интрузии.

Промышленные руды связаны с небольшими интрузиями-апофизами крупных массивов в надинтрузивной зоне, которые в совокупности образуют рудно-магматические системы.

Характерные петрофизические свойства никеленосных интрузий позволяют отличать их от других магматических образований на геофизических картах по соотношению аномалий силы тяжести и магнитного поля. Для КСМ определены геофизические критерии выявления неэродированных интрузий никеленосного комплекса — локальные максимумы силы тяжести и локальные ступени на их границах, отсутствие четко выраженных аномалий магнитного поля, расположение максимумов Δg в региональных зонах горизонтальных градиентов силы тяжести (Сидоров, 2009; Сидоров, Степанов, 2006).

Районирование КСМ по критериям позволило выявить новые перспективные площади для поисков сульфидных кобальт-медно-никелевых руд на севере (Шанучский район), в центральной части (бассейн р. Колпакова) и на юге (Дукукский район). Были локализованы массивные блоки, в которых возможно наличие рудогенерирующих магматических систем подобных месторождению Шануч (Сидоров, 2015, 2017; Сидоров и др., 2016).

Данная работа посвящена изучению глубинного строения одной из перспективных

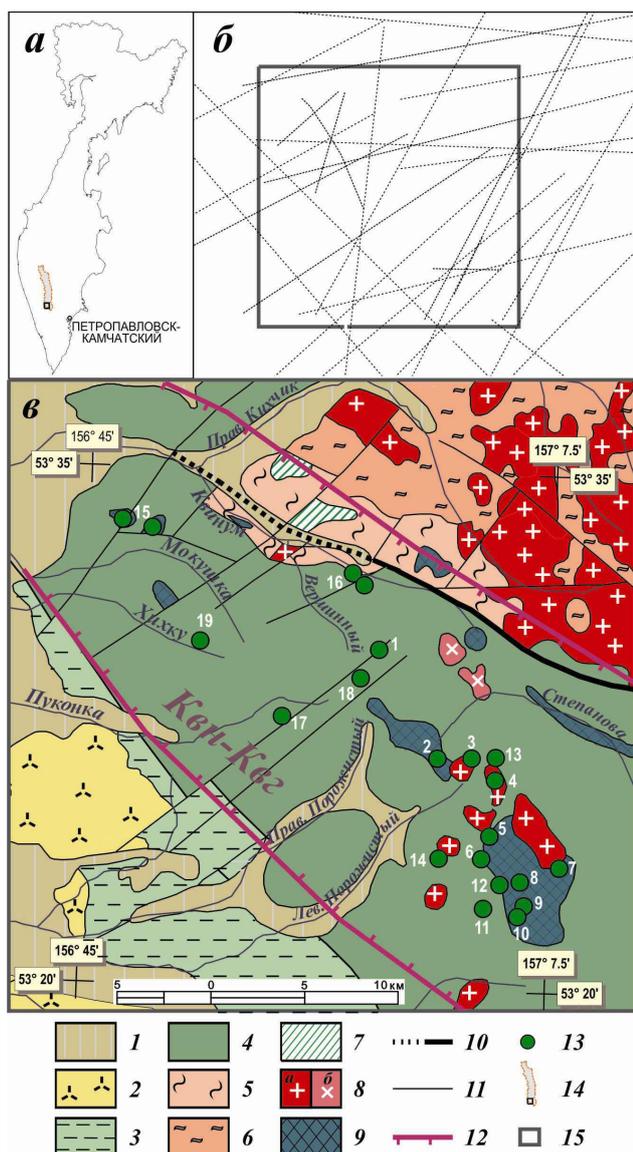


Рис. 1. Местоположение (а), схема опорных геолого-геофизических разрезов (б) и геологическая карта (в) Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны (использована геологическая основа карты полезных ископаемых Камчатской области 1:500000, 1999, с упрощениями): 1 — рыхлые четвертичные отложения; 2 — кайнозойские осадочные и вулканогенные отложения; 3 — хозгонская свита: песчаники, алевролиты; 4 — хейванская свита: метапесчаники, метаалевролиты, сланцы; 5 — камчатская метаморфическая серия: кристаллические сланцы, микрогнейсы; 6 — колпаковская метаморфическая серия: плагиогнейсы, мигматиты; 7 — субвулканические интрузии метапикродолеритов алисторского комплекса; 8 — гранитоиды крутогоровского и кольского магматических комплексов. Интрузии гранитов, гранодиоритов, гнейсогранитов (а), диоритов (б); 9 — базиты дукукского комплекса. Интрузии норитов, габбро, диоритов, горнблендитов, кортландитов; 10 — Квинумский разлом; 11 — прочие разломы; 12 — границы Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны (Квн-Квг); 13 — рудопроявления никеля: Ясное (1), Коба (2), Северное (3), Обвальный (4), Аннабергитовая Щель (5), Снежное (6), Кувалорог (7), Цирковое (8), Россоха (9), Надежда (10), Олень (11), Нижнемедвежье (12), Гранатовый (13), Медвежий Мыс (14), Тундровое (15), Квинум I, II (16), Пуконка (17), Кортландитовое (18), Хихку (19). На схемах а и б: 14 — срединный массив; 15 — контур исследованного участка.

никеленосных структур КСМ — Квинум-Кувалорогской никеленосной зоне и выявлению плотностных неоднородностей связанных с интрузиями никеленосных базитов — потенциальных рудогенерирующих магматических систем. Одним из эффективных методов нахождения глубинных рудогенерирующих структур является моделирование геологической среды, базирующееся на результатах интерпретации геофизических аномалий. В результате моделирования создается 3D-массив плотности исследуемого участка земной коры.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Геологическая характеристика. Квинум-Кувалорогская никеленосная зона расположена в южной части срединного массива. Зона охватывает территорию верхнего течения р.р. Степанова, Правокихчикская, Лев. Кихчик, Хихку, Мокушка и весь бассейн р. Квинум, до ее впаде-

ния в р. Прав. Кихчик (рис. 1в). Площадь зоны 725 км², простирается северо-западное, ширина 15–20 км. В отмеченной полосе сосредоточено более 30 проявлений и пунктов минерализации никеля. В осевой части зоны находится Квинумский (Квинум-Степановский) разлом. Разлом имеет пологую поверхность сместителя, наклоненную в юго-западном направлении под углом 10–35°. С глубиной разлом приобретает крутое (до 80°) падение. Кристаллические образования фундамента, представляющие в данном случае автохтон, граничат здесь с вышележающими терригенными аллохтонными образованиями. Разлом является магмоподводящим и рудоконтролирующим (Боровцов и др., 2001).

В Квинум-Кувалорогской зоне распространены интрузии дукукского комплекса, несущего сульфидную кобальт-медно-никелевую минерализацию. Зона включает относительно крупный (около 20 км²) массив Кувалорог и несколько небольших интрузий в верховьях р.р. Степанова, Лев. Порожистая, Прав. Порожистая, Квинум, Прав. Кихчик, Мокушка, Хихку, Пуконка. Малые интрузии залегают в виде штоков и субпластовых тел. Кувалорогский интрузив состоит преимущественно из габбро и норитов. Малые интрузии вблизи массива являются его вероятными апофизами (Трухин и др., 2009а, 2009б).

Никеленосность. Оруденение сосредоточено в двух рудных полях — Кувалорогском

и Квинумском. Прогнозные ресурсы никеля предполагаются в размере 476 тыс. т (Сляднев и др., 2007). Однако, принимая во внимание то, что промышленные руды (Трухин и др., 2009б) приурочены к небольшим интрузиям-апофизам в надинтрузивной зоне крупных массивов, прогнозные ресурсы могут быть увеличены, за счет обнаружения новых рудогенерирующих систем. О наличии на глубинах от 0.5 до 5 км, незэрированных относительно крупных интрузий в Квинум-Кувалорогской зоне свидетельствуют локальные аномалии Буге (рис. 2а).

Физические свойства горных пород и геофизические поля Квинум-Кувалорогской зоны. В пределах Срединного массива выделено пять основных петрофизических групп горных пород (Сидоров, Степанов, 2006). Эти породы, распространенные в верхней части земной коры, оказывают существенное влияние на наблюдаемые гравитационные и магнитные аномалии.

Группа 1 — немагнитные и относительно малоплотные породы: ρ до 100×10^{-5} СИ, $\sigma = 2.57-2.65$ г/см³. Эту группу составляют гнейсы, гнейсо-граниты, мигматиты колпаковской и камчатской метаморфических серий, граниты крутогорского и кольского комплексов.

Группа 2 — немагнитные и слабомагнитные породы со средней плотностью: ρ десятки-первые сотни $\times 10^{-5}$ СИ, $\sigma = 2.66-2.80$ г/см³. К этой группе относятся метатерригенные породы хейванской, осадочные хозгонской свиты и кристаллические сланцы камчатской серии.

Группа 3 — магнитные породы средней плотности: $\rho = (1000-3000) \times 10^{-5}$ СИ, $\sigma = 2.66-2.80$ г/см³. В эту группу входят диориты из интрузий кольского комплекса, а также кайнозойские вулканы среднего и основного состава.

Группа 4 — немагнитные и слабомагнитные породы высокой плотности — $\sigma > 2.85$ г/см³. Породы этой группы слагают интрузии дукукского плутонического, субвулканические тела алисторского вулканического комплексов.

Группа 5 — магнитные и сильномагнитные породы высокой плотности: ρ до 3000 и более $\times 10^{-5}$ СИ, $\sigma > 2.85$ г/см³. Группа представлена базитами левоандриановского плутонического комплекса.

В Квинум-Кувалорогской никеленосной зоне широко представлены породы второй (сланцы хейванской свиты и камчатской метаморфической серии) и четвертой (интрузии дукукского и алисторского комплексов) петрофизических групп, причем первые служат вмещающей средой для вторых. Различие по плотности может достигать 0.2–0.5 г/см³, поэтому интрузии, расположенные в самой верхней части земной коры, хорошо выражены локальными максимумами силы тяжести (рис. 2а).

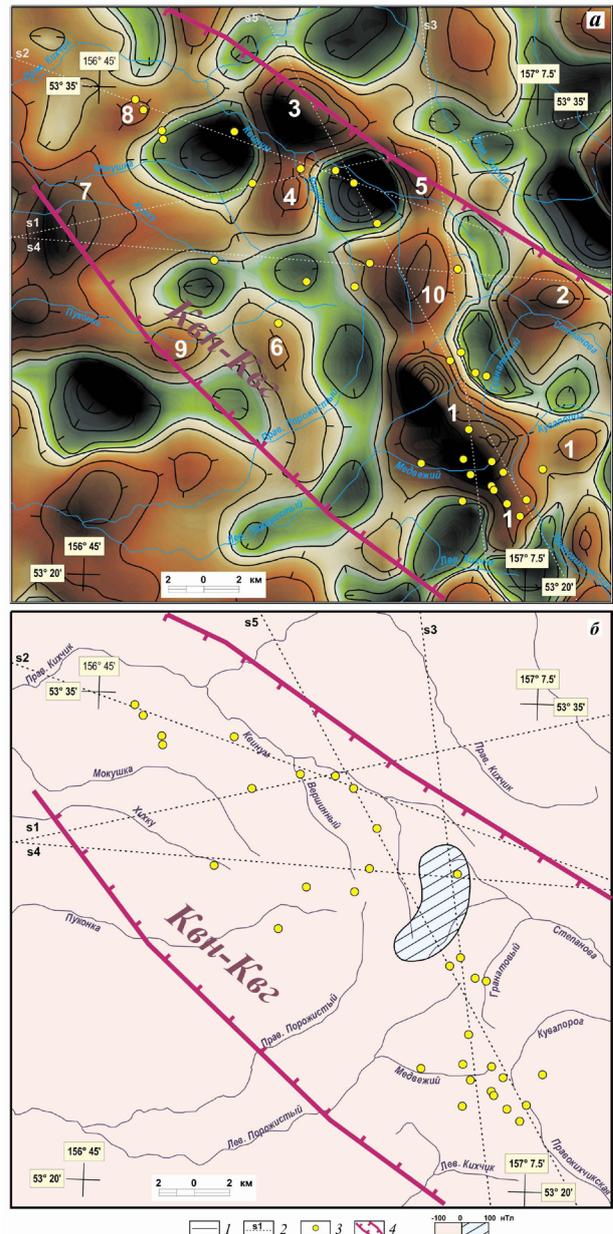


Рис. 2. Схема морфологии локальной составляющей аномалий Буге (а), карта магнитного поля (ΔT) (б) Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны: 1 — изоаномалы, бергштрихи направлены в сторону уменьшения поля; 2 — интерпретационные профили и их номера; 3 — проявления и пункты минерализации никеля; 4 — границы Квинум-Кувалорогской (Квн-Квг) никеленосной зоны. Цифрами указаны номера максимумов силы тяжести.

Низкие магнитные свойства пород никеленосного комплекса выгодно отличают их от других высокоплотных базитов (группа 5). Эта особенность является поисковым критерием (Сидоров, 2009) для относительно крупных (второй тип) интрузий дукукского комплекса. Магнитные свойства пород комплекса резко увеличиваются при появлении в них сульфидных вкраплений. Это свойство рассматривается как локальный поисковый признак.

Территория КСМ исследована гравиметрическими и аэромагнитными съемками масштабов 1:50000, 1:200000. По материалам съемок была составлена электронная база данных, которая использована при интерпретации геофизических аномалий¹.

Камчатский срединный массив с юга ограничен сложной гравиметрической ступенью северо-западного простирания. Ширина ступени около 20 км, амплитуда более 20 мГал (здесь и далее интенсивность аномалий Буге приводится в условном уровне). Сложная морфология аномального поля, обилие «раздувов», «площадок» и высокая изменчивость горизонтальных градиентов свидетельствует о значительной неоднородности в распределении масс. Положение ступени указывает на участок деструкции земной коры — глубинную зону повышенной проницаемости. Квинум-Кувалорогская никеленосная зона в плане соответствует этой гравиметрической ступени. Для выявления массивных тел в верхней части коры из наблюденного поля Δg были выделены локальные аномалии Буге. Трансформация проведена методом осреднения в скользящем окне с радиусами палетки определенные опытным путем (Сидоров, 2006). На рисунке 2а представлена одна из таких карт остаточных аномалий, полученных осреднением с радиусом 4 км. В результате трансформации наблюденного поля выделились контрастные локальные максимумы площадью 5–70 км² и амплитудой 2–6 мГал. Предполагается, что максимумы обусловлены интрузиями базитового состава, в том числе и не эродированными. К аномалиям тяготеет большая часть известных рудопоявлений никеля. Наиболее интенсивный максимум находится в районе интрузии Кувалорог. Эта аномалия сложной формы вытянута в северо-северо-западном направлении и имеет несколько экстремумов, охватывает собственно массив в современном срезе и территорию к северо-западу и востоку от него.

Магнитное поле (ΔT)_a в Квинум-Кувалорогской зоне преимущественно плавное, слабо отрицательное, что закономерно отражает низкие магнитные свойства пород, распространенных здесь геологических образований (рис. 2б). При крупномасштабных аэромагнитных съемках над диоритами и гранодиоритами кольского магматического

комплекса наблюдаются слабые положительные аномалии интенсивностью до 150 нТл.

Локальные участки интенсивной сульфидизации выделяются контрастными положительными магнитными аномалиями при наземных детальными поисковыми съемками. В силу незначительных размеров аэромагнитными исследованиями эти аномалии уверенно не фиксируются.

Глубинных зондирований геофизическими методами в Квинум-Кувалорогской зоне не проводилось. Имеется только один сейсмический профиль методом обменных волн землетрясений МОВЗ (Нурмухамедов и др., 2016), пересекающий Срединный хребет севернее зоны — от р. Пымта до нижнего течения р. Лунтос. На профиле имеется разрыв в наблюдениях около 20 км в осевой части хребта. На остальной части профиля трассируются цепочки из точек обмена, отождествляемые с границами внутри коры. Граница Мохоровичича (М) устанавливается фрагментарно на глубине 33–34 км, граница Конрада (К2), между нижней и верхней корой, определяется на глубине 20–25 км. Эти данные использованы в качестве опорных при моделировании глубинных разрезов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Плотность пород интрузий дукукского комплекса значительно превышает плотность пород вмещающей среды. Эта особенность является главной предпосылкой применения гравиразведки для определения пространственных параметров залегания крупных массивных интрузивных тел. Кроме большой избыточной плотности предпосылками являются: расположение интрузий в верхней части коры и их размер 2–7 км в поперечнике (Сидоров, Степанов, 2006). Поэтому аномалии над интрузивными телами выражаются контрастными максимумами в локальной компоненте поля силы тяжести.

Для решения задачи была рассчитана воксельная (объемная) модель распределения плотности для верхней коры в Квинум-Кувалорогской зоне. Модель состоит из кубических ячеек с определенной плотностью. Воксельное изображение позволяет прогнозировать положение массивных тел, которые не имеют выхода на поверхность, определять их форму и объем. Плотностная модель — это результат геологической интерпретации аномалий силы тяжести. В качестве априорных знаний используются геологические исследования, данные бурения, результаты глубинных зондирований геофизическими методами.

Создание воксельной модели состоит из двух этапов. Сначала рассчитываются плотностные глубинные геолого-геофизические разрезы по

¹ Сидоров М.Д. Отчет о работах по созданию дистанционной, геохимической и геофизической основ Госгеолкарты-1000 3-го поколения листов N-(56), 57, (58); M-57 (опережающий этап) в 3-х книгах. Книга 2. Геофизическая основа. П-Камчатский: КПСЭ, 2001. 150 с.

отдельным профилям в 2D-варианте. Затем формируется объемное изображение по сумме всех профилей (рис. 1б). Для Квинум-Кувалорогской зоны было рассчитано 12 профилей и к ним добавлены данные о плотности из 12 разрезов, построенных ранее (Сидоров, 2016, 2017). Сходимость расчетов контролируются в точках взаимных пересечений профилей.

На этапе плотностного 2D-моделирования, на расчетных профилях составлялись геологические разрезы до глубины 1–2 км. Границы геологических тел изображались ломаными линиями, которые образуют контуры сечений горизонтальных бесконечных призм, расположенных перпендикулярно к профилю. Призмы отождествлялись с конкретным геологическим телом с типичной для слагающих его пород плотностью. Тонкие, немасштабные слои объединялись в единый структурно-вещественный комплекс с усредненной плотностью. На призмы, описывающие узкие блоки рельефа (хребты) наложено ограничение (3/4D) по простиранию. Призмы, аппроксимирующие сечения интрузий ограничены по максимальным градиентам в краях соответствующих аномалий. В более глубокой части начальная модель разреза строилась с учетом расположения особых точек, которые указывают на положение граней, углов, центров (тяжести) образующих аномалии тел. Координаты особых точек определены методом деконволюции Эйлера по аномалиям Δg . Были использованы аномалии как наблюдаемые, так и локальные (остаточные). Метод не требует априорных геологических знаний о возмущающих объектах. Расчеты сделаны в профильном и 3D-вариантах, в скользящем окне палетками разного размера для различных структурных индексов. Это позволило учесть весь диапазон возможных геометрических типов возмущающих масс (геологических тел). Результаты интерпретации синтезированы в единый массив, из которого точки, в полосе шириной 100–200 м по обе стороны от профиля, проецировались на плоскости разрезов. Большинство особых точек в Квинум-Кувалорогской зоне сосредоточено в интервале от 0 до 5 км, а некоторые на глубине 10–15 км ниже уровня моря.

Более глубокие горизонты коры являются «фоновыми» и на моделях разрезов изображались обобщенными слоями-блоками по данным МОВЗ (Нурмухамедов и др., 2016) и плотностной модели срединного массива (Сидоров, 2016). Плотность блоков для нижней коры принята 2.9–3.0 г/см³, верхней 2.75–2.85 г/см³, плотность мантии 3.2–3.3 г/см³.

После составления первичных моделей разрезов рассчитывались теоретические аномалии

и их графики сравнивались с графиками наблюдаемых при съемке. На участках расхождения кривых корректировались геометрия сечений и плотность призм и расчет повторялся. Подбор продолжался до достижения средней относительной погрешности 3–5%. Большинство разрезов подобрано по наблюдаемому полю, часть (локальные профили на интрузиях Кувалорог и рудопроявления Тундровое) подбирались по графикам остаточных аномалий.

После подбора создана объединенная база данных плотности (БДП) по всем профилям для блока коры с Квинум-Кувалорогской зоной. БДП содержит плановые координаты X, Y, Z точек на разрезах и подобранную в них плотность D. Точки БДП — это узлы квадратной сетки наложенной на плоскость разреза. Шаг сетки зависит от детальности разреза, он изменялся от 2×2 км в низах коры до 0.2×0.2 км в самой верхней ее части. Данные БДП интерполированы в 3D-матрицу, которая и визуализируется в виде объемного (воксельного) изображения. Ребра кубических ячеек, в зависимости от густоты данных, составили 2, 1 и 0.5 км. Нахождение особых точек в 3D-варианте проведено с помощью программы Euler 3D (Geosoft), в профильном — программой OSG (Рудгеофизика). Для подбора разрезов использованы программы GM-SYS (Geosoft) и PRIMA (Сидоров, 1994). Интерполяция БДП в 3D-матрицу и ее визуализация осуществлена стандартными инструментами Oasis Montaj (Geosoft). Пространственные преобразования и вычисление координат проведены с помощью геоинформационных пакетов ArcGis, ArcView (ESRI)².

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Плотностная модель. Квинум-Кувалорогской зону до глубины 2 км слагают породы с плотностью 2.6–2.7 г/см³ (рис. 3–6). Такие значения соответствуют плотности сланцев хейванской свиты. Ниже этого слоя, примерно до 10–15 км преобладает плотность, характерная для кристаллосланцев камчатской и колпаковской метаморфических серий (2.7–2.8 г/см³). Еще глубже в модели плотность возрастает до 2.9 г/см³ и более, что типично для пород гранулитово-базитового слоя нижней коры. На всех отмеченных горизонтах выделяются плотностные неоднородности. Наиболее контрастно они проявлены в верхнем слое в виде изометричных блоков (здесь и далее под блоками понимается локализованная, компактная часть геосреды с характерной плотностью) размером от 2 до 5 км в поперечнике.

² Описание используемых алгоритмов приводятся в технической документации соответствующих программных комплексов.

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ

Блоки с повышенной плотностью (более 2.8 г/см^3) содержат интрузии базитов, им соответствуют локальные максимумы силы тяжести. Подтверждением этому является интрузия Кувалорог, которая в модели представлена группой таких блоков расположенных в несколько ярусов — от дневной поверхности до глубины 5 км (рис. 3, 5а, 5в). Внутреннее строение Кувалорогской интрузии очень сложное. Интрузия состоит из крупных блоков, отличающихся друг от друга вещественным составом, что отражается на их средней плотности. Наиболее погруженные и массивные блоки располагаются на северном фланге интрузии. Здесь они располагаются в три этажа и разделены между собой блоками с плотностью менее 2.6 г/см^3 (рис. 3). Такой плотностью обладают породы гранитоидного ряда, поэтому можно предположить в этих блоках интрузии кислого состава. Косвенно об этом свидетельствуют обнажения гранитов вблизи северного края массива Кувалорог. Блоки с плотностью $> 3.0 \text{ г/см}^3$ сложены преимущественно габброи-

дами. Средняя плотность в интрузивных блоках может уменьшаться из-за их раздробленности, и содержащихся в них ксенолитов вмещающих толщ. Бурение глубоких скважин (Зотов, 1982³) показало, что в разрезах часто встречаются участки катаклазированных, передробленных пород. Это свидетельствует о напряженной разрывной тектонике внутри интрузии. Также известно (Трухин и др., 2009а), что блоки с преимущественно лейкократовыми разновидностями пород имеют меньшую плотность по отношению к блокам с преобладанием меланократовых. Поэтому надо считать, что плотности $2.8\text{--}2.85 \text{ г/см}^3$ в модели соответствуют интрузиям базитов. Этими особенностями объясняется сложная форма максимума Δg над

³ Зотов В.П., Аврамова Н.Н. Отчет о результатах поисковых работ на участке Медвежьем в Дукук-Кувалорогской рудной зоне, проведенных Кувалорогской поисковой партией в 1979–1982 гг. Кувалорогская поисковая партия. П-Камчатский: КПСЭ, 1982. 145 с.

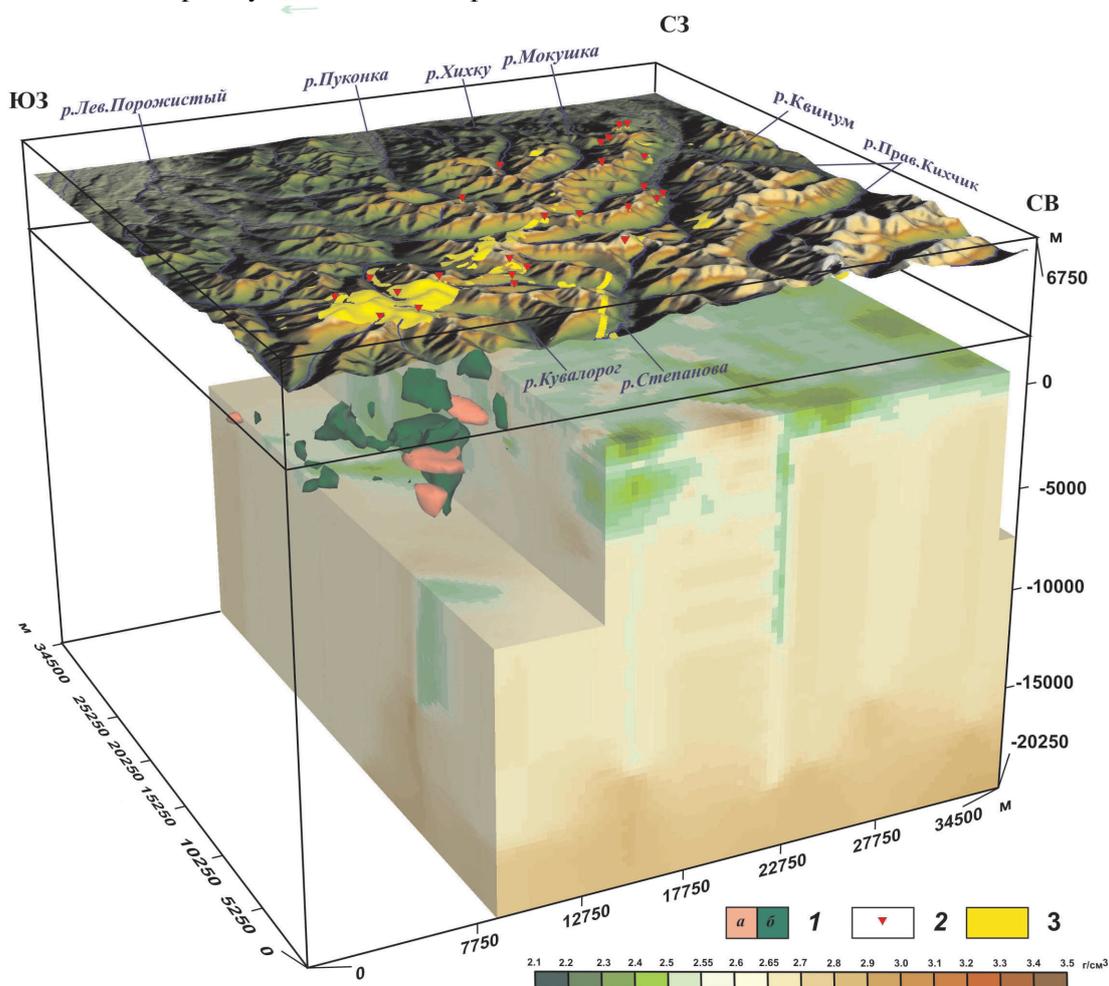


Рис. 3. Воксельная плотностная модель земной коры Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны, вид с юго-востока. Часть ячеек погашена, чтобы показать изоповерхности, масштаб рельефа увеличен в два раза и его поверхность поднята на 5 км: 1 — изоповерхности с плотностью 2.6 г/см^3 (а) и 2.9 г/см^3 (б); 2 — проявления и пункты минерализации никеля; 3 — выходы интрузий никеленосного комплекса на дневную поверхность.

Кувалорогским массивом. Наиболее плотные блоки интрузии расположены в районе проявления Аннабергитовая Щель. Само проявление находится в апофизе главного массива, который прослеживается вглубь коры. В этом месте, на горизонтальных срезах и разрезе (рис. 5а, б) хорошо виден блок с возрастающей на глубину плотностью, а на уровне 15–20 км наблюдается вертикальный «выступ» плотного нижнекорового слоя, который показывает положение вероятных каналов, связывающих интрузии верхней коры с глубинным магматическим очагом.

В модели подобные «выступы» имеются и в других местах Квинум-Кувалорогской зоны: в нижнем течении руч. Вершинный (рис. 4б, 5б), между р. Хихку–р. Мокушка (рис. 4а, 5б) р. Прав. Кихчик–р. Квинум, р. Квинум–р. Степанова (рис. 5в), р. Мокушка–р. Прав. Кихчик–р. Квинум (рис. 4а) и в верховьях р. Пуконка, р. Прав. Порожистый, руч. Вершинный (рис. 5б). В приповерхностном слое этим столбообразным «выступам» соответствуют блоки с повышенной плотностью. Данное обстоятельство позволяет предположить увеличение плотности блоков за счет внедренных интрузий базитов. Плотность базитов близка плотности нижнекорового слоя, но заметно превышает плотность пород, слагающих верхнюю часть коры. Некоторые из интрузий частично обнажены, но многие не выходят на дневную поверхность. Глубина залегания массивных блоков с интрузиями постепенно увеличивается по простиранию зоны в северо-западном направлении.

Небольшие пластинообразные интрузии рудопоявления Тундровое, вероятно соединяются с магматической камерой, расположенной на глубине 0.5–1 км ниже уровня моря (рис. 4б, 6б). Предполагаемая интрузия по форме подобна вытянутому вдоль зоны сильно уплощенному горизонтальному эллипсоиду. Судя по плотности и небольшой амплитуде максимума Δg (рис. 2а), в блоке с интрузией значительную долю составляют ксенолиты вмещающих сланцев.

На северо-западном фланге зоны привлекает внимание участок, находящийся вблизи ее юго-западного края, на водоразделе р. Хихку и р. Мокушка. В этом месте расположен интенсивный (~5 мГал) локальный максимум Δg (рис. 2а, аномалия 7), которому в модели соответствует плотный блок (рис. 4а, 6в, 6з) на глубине от 1 до 3.5 км ниже уровня моря. В плане блок вытянут по простиранию зоны. Модельная плотность в нем превышает 2.9 г/см³, что дает основание предположить здесь относительно крупную интрузию основного состава — промежуточной камеры для малых тел, подобных интрузиям проявления Тундро-

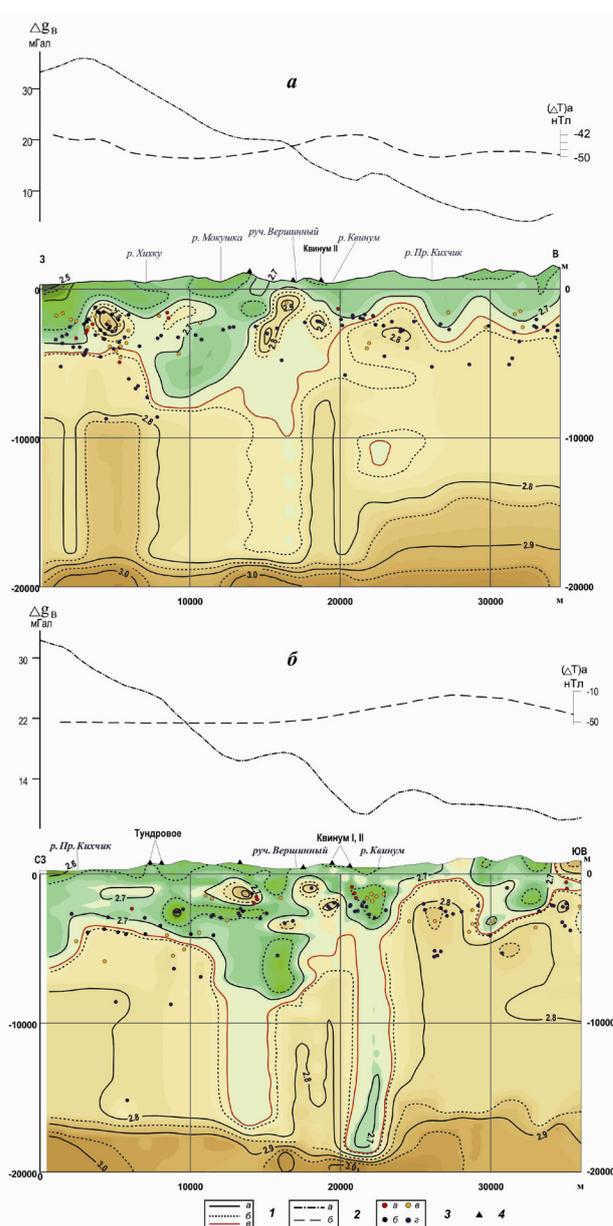


Рис. 4. Вертикальные сечения плотностной модели по линиям s1 (а), s2 (б): 1 — изоденсы основные (а), промежуточные (б), с плотностью 2.74 г/см³ (в); 2 — графики аномалий Буге (а), оцифровка условная и $(\Delta T)_a$ (б); 3 — проекции особых точек на плоскость разреза в полосе ± 200 м вдоль него и их геометрическая модель: вертикальный контакт (а), горизонтальный контакт (б), горизонтальный цилиндр (в), сфера (з); 4 — проявления и пункты минерализации никеля. Местоположение профилей представлено на рис. 2.

вого. Контур остаточной аномалии (рис. 2а, 6а) можно считать перспективной площадью для поисков новых рудопоявлений никеля.

Интерес представляет центральная часть Квинум-Кувалорогской зоны, охватывающая бассейн руч. Вершинный и водораздельную часть в истоках р.р. Мокушка, Хихку, Пуконка, Прав. Порожистый. В этом месте выделяется крупная сферическая область (8×10 км) повышенной плотности от уровня моря до глубины

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ

4.5–5 км ниже него (рис. 4а, 5б, 6). В средней и нижней коре ему соответствует уплотнение выраженное формой изоденс (рис. 5б). В краях отмеченной области расположены компактные блоки, в которых плотность превышает 2.8 г/см^3 . Их можно отождествить с интрузиями базитов. Плановое положение интрузий хорошо видно на глубине 3 км (рис. 6з). В остаточных аномалиях силы тяжести (рис. 2а) блоки отмечены максимумами 3, 4, 5, и 10. Максимум 3 имеет самую большую интенсивность — свыше 5 мГал. На дневной поверхности среди кристаллосланцев камчатской серии обнажаются субвулканические тела алисторского комплекса, породы которого по физическим свойствам относятся к одной группе с дукукскими. При подборе разрезов выяснилось, что массы этих тел недостаточно для компенсации наблюдаемой аномалии. Кроме того, особые точки показали наличие неоднородности на глубине от 1.3 до 6 км ниже уровня моря (рис. 6в). Подобранная плотность в этом интервале превышает 2.85 г/см^3 . Поэтому, с большой долей вероятности, можно предположить здесь крупную интрузию базитового состава. Подобный, недостаточный для компенсации, гравитирующий эффект от обнажающихся на поверхности плотных субвулканических тел алисторского комплекса наблюдается при подборе разрезов и в других районах КСМ (Сидоров, 2017; Сидоров и др., 2016). Только после введения в разрезы массивных блоков ниже обнажающихся тел достигается совпадение теоретических и практических аномалий Δg . Эти добавленные блоки могут быть интрузиями базитов никеленосного комплекса. Возможно, что интрузия дукукского комплекса среди сланцев камчатской серии в тектоническом блоке по левому борту р. Квинум являются апофизой от магматической камеры аномалии № 3 (рис. 1в). Таким образом, обнажения алисторских субвулканических тел можно рассматривать как своеобразный косвенный поисковый признак неэродированных интрузий никеленосного комплекса.

В среднем и нижнем течении руч. Вершинный расположен еще один локальный максимум Δg (рис. 2а, 6а, аномалия 4). В районе этой аномалии выделяется группа сближенных плотных блоков (рис. 4а, 4б) в интервале глубин от 0.5 до 4 км ниже уровня моря. К центру блоков плотность возрастает до $2.85\text{--}2.9 \text{ г/см}^3$ и более. Максимальные плотности наблюдаются на срезе -1.5 км (рис. 6в). Эти блоки содержат интрузии базитов. Подтверждением служат небольшие штоки и дайки дукукского комплекса, обнаженные в ареале аномалии и по ее периферии. Мелкие тела, вероятно, являются апофизами интрузий

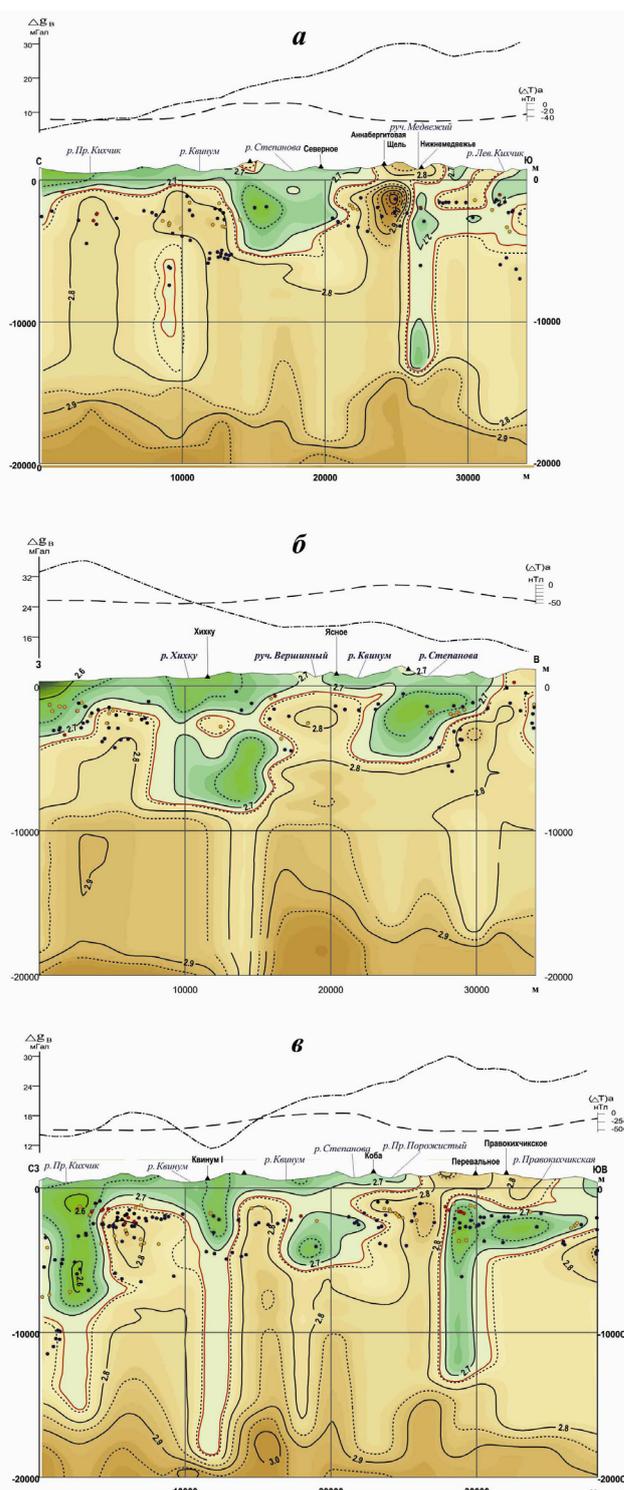


Рис. 5. Вертикальные сечения плотностной модели по линиям s3 (а), s4 (б), s5 (в) (см. рис. 2). Условные обозначения приведены на рис. 4.

в блоках, также как и плитообразные интрузии гипербазитов проявлений Квинум I и Квинум II, имеющих мощность от первых до 20–200 м и пологое падение на юго-запад в направлении аномалии (рис. 4). Комплексными наземными геофизическими работами установлено, что интрузии и вмещающая их тектоническая зона полого ($10\text{--}20^\circ$) падают на юг-юго-запад, про-

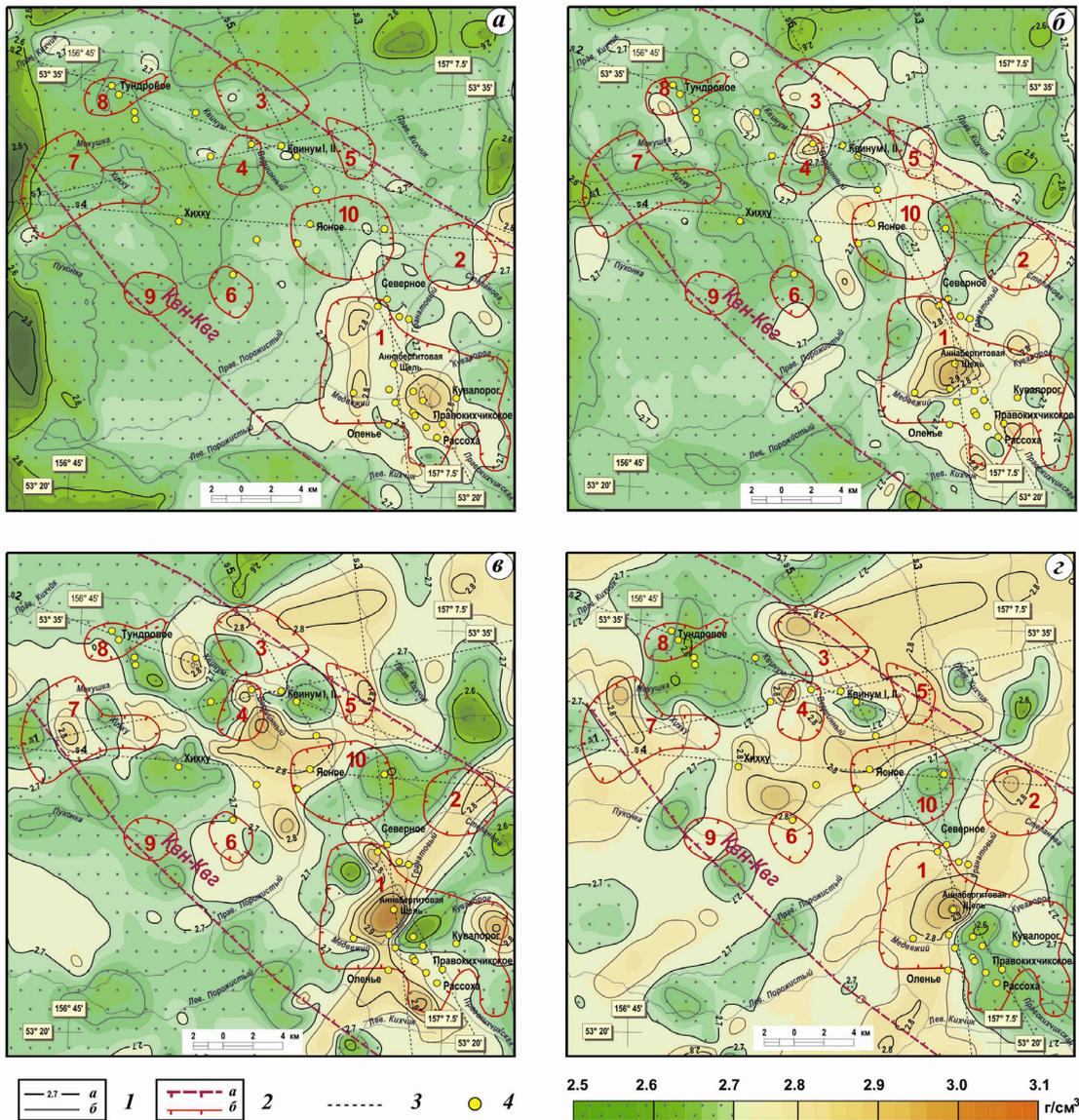


Рис. 6. Сечения плотностной модели на глубине: *а* — 0 км, *б* — 0.5 км, *в* — 1.5 км, *г* — 3.0 км. Изоденсы проведены через 0.5 г/см³: 1 — изоденсы основные (*а*), промежуточные (*б*); 2 — границы Квинум-Кувалорогской (Квн-Квг) никеленосной зоны (*а*), перспективных аномалий силы тяжести (*б*), цифрой указан номер аномалии; 3 — линии вертикальных сечений плотностной модели; 4 — проявления и пункты минерализации никеля.

слеживаясь по падению на 1.6 км (Дзюба и др., 1982⁴, 1985⁵).

Перспективен участок между р. Пуконка (верхнее течение) и истоками р.р. Хихку, Мокушка. В локальной компоненте поля силы

тяжести выделяется кольцеобразная положительная аномалия с двумя экстремумами (рис. 2*а*, 6*а*, №№ 6, 9). Амплитуда максимумов относительно окружающих их локальных минимумов невелика (около 2 мГал). В модели плотный блок, который можно сопоставить с интрузией базитов никеленосного комплекса, выделяется в районе максимума № 6 и к северо-западу от него. Верхняя кромка блока залегает на 2 км ниже уровня моря. На площади, охватываемой максимумом, обнажаются несколько даек и небольшой штук (менее 1 км²) амфиболизированных габброидов, с которым связано вкрапленное сульфидное рудопроявление р. Пуконка (рис. 1). Эти малые интрузии являются апофизами крупного тела (более 10 км²), расположенного на глубине 2–4 км

⁴ Дзюба Б.М., Иванов Б.П. Отчет о результатах поисковых геолого-геофизических работ, проведенных в пределах Кувалорог-Квинумской рудной зоны и Дукукского массива Квинумской партией в 1981–1982 гг. Елизово: ЕГФЭ, 1982. 147 с.

⁵ Дзюба Б.М., Евтихов И.В., Иванов Б.П. Отчет о результатах общих поисков геолого-геофизическими методами, проведенных в пределах проявлений медно-никелевых руд «Гольцовское» и медно-порфиновых руд «Юртинное» Верхне-Кирганской партией в 1983–1985 гг. Елизово: ЕГФЭ, 1985. 269 с.

ниже уровня моря (рис. 6а). Глубоким залеганием объясняется небольшая амплитуда аномалии. Блок разбит на две части. Одна из них находится в истоках р. Хихку, где на водоразделе с р. Пуконкой обнажено небольшое тело габброидов дукукского комплекса. В этом же районе обнаружена глыба интенсивно сульфидизированных ультраосновных пород, что прямо свидетельствует о перспективности описанной территории.

Природа максимума № 9 не ясна. В модели на глубине от 2 до 7 км имеется относительное, по отношению к окружающей среде, уплотнение на $0.1-0.15 \text{ г/см}^3$. В подобранном разрезе, в этом месте расположены два блока с плотностью типичной для кристаллических сланцев, а окружающие их блоки имеют более низкую плотность гранито-гнейсов. Аномалия, вероятно, этим и обусловлена. В районе максимума признаков скрытых интрузий не установлено.

Максимум № 10 находится в верхнем течении р. Квинум (рис. 2а). По периферии аномалии имеются выходы малых интрузий дукукского комплекса. С ними связаны рудопроявления Ясное и Кортландитовое на левом борту реки. По правому борту, на водоразделе р. Степанова-р. Квинум, тоже обнажается (0.5 км^2) интрузия габбро несущая никелевую минерализацию. Вблизи нее в сланцевую толщу внедрены две небольших интрузии диоритов кольского магматического комплекса, которые кроме повышенной плотности обладают и заметными магнитными свойствами. Поэтому в восточной части гравитационного максимума наблюдается слабая аэромагнитная положительная аномалия (ΔT)_а (рис. 2б). В модели повышенной плотностью обладают два блока, расположенные по разным бортам р. Квинум. Восточный блок находится вблизи поверхности (рис. 5а, 6б). Уплотнение здесь связано с интрузиями диоритов и малой интрузией габбро, которая является, вероятно, апофизой массива Кувалорог или ее тектоническим отторжением. Повышенная плотность западного блока проявлена более глубоко — от поверхности до 4 км ниже уровня моря (рис. 5б, 6). Этот блок «корнями» уходит в описанную выше плотную область в центральной части Квинум-Кувалорогской зоны. Малые интрузии проявлений Кортландитовое и Ясное, скорее всего, связаны с крупной неэродированной интрузией в этой части зоны.

Разрывная тектоника в модели отражается на горизонтальных сечениях в виде линейных участков относительно пониженной плотности. Наиболее отчетливо деструкция проявилась по направлению от устья р. Прав. Порожистая и р. Лев. Порожистая через верховья р. Квинум,

р. Степанова до истоков р. Прав. Кихчик (рис. 6а). По этой линии Квинум-Кувалорогская зона разделяется на два крупных блока — Кувалорогский и Квинумский, отличающихся глубиной залегания массивных неоднородностей (интрузий базитов). На разрезах (рис. 4, 5) показано, что для участков разуплотнений в верхней коре преобладает наклонная на запад направленность, а в средней и нижней коре преобладает субвертикальное положение.

Для Квинумского блока зоны характерны небольшие (~2 км в поперечнике) остаточные максимумы силы тяжести, которым в плотностной модели соответствуют массивные блоки с интрузиями базитов. Внутри этот блок разделен северо-восточными разломами на несколько более мелких.

ВЫВОДЫ

Интерпретация материалов геофизических съемок и построенная плотностная модель Квинум-Кувалорогской зоны позволяют заключить что, основной объем магмы, из которой формировались интрузии дукукского комплекса, поступал в верхнюю часть коры из мантийного очага в юго-восточной части зоны, в районе современного положения Кувалорогской интрузии. Здесь наблюдаются наиболее крупные тела и, соответствующие им, аномалии силы тяжести. Далее к северо-западу по простиранию зоны заметно уменьшаются размеры и интенсивность локальных аномалий силы тяжести, размеры эродированных тел, увеличивается глубина залегания неэродированных интрузий. Для этой части зоны вероятные глубинные подводящие каналы расположены в истоках р.р. Пуконка, Хихку, Мокушка, руч. Вершинный.

Перспективные площади для поисков месторождений медно-никелевых руд определяются положением рудогенерирующих систем — глубинная магматическая камера и интрузии сателлиты в надинтрузивной зоне. Такие системы прогнозируются в центральной части Квинум-Кувалорогской зоны — бассейне руч. Вершинный и на юго-западном фланге зоны — в среднем течении р. Хихку и р. Мокушка. В отмеченных районах имеются косвенные и прямые признаки рудоносности.

Список литературы

Боровцов А. К., Сидоренко В. И., Щенко В. И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Хангарская. Лист N-57-XX (Ганалы). Объяснительная записка. Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2001. 147 с.

- Лихачев А.П.* Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 496 с.
- Нурмухамедов А.Г., Недядько В.В., Ракитов В.А., Липатьев М.С.* Границы литосферы на Камчатке по данным метода обменных волн землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. № 29. С. 35–52.
- Полетаев В.А.* Камчатская платиноидно-никеленосная зона — геология и рудоносность. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Москва, 2004. 22 с.
- Карта полезных ископаемых Камчатской области / Ред. Литвинов А.Ф., Патока М.Г., Марковский Б.А. 1:500000. СПб: ВСЕГЕИ, 1999.
- 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 // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. № 8. С. 140–150.
- Сидоров М.Д.* Геофизические критерии прогнозирования никеленосных интрузий в Камчатском срединном массиве // Чтения памяти академика К.В. Симакова: Материалы Всероссийской конференции, 25–27 ноября 2009 г., Магадан. 2009. С. 92–93.
- 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.* Плотностная модель Камчатского срединного массива // Горный информаци-
- онно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Камчатка-3. 2016. Специальный выпуск 31. № 11. С. 83–88.
- Сидоров М.Д.* Воксельная (объемная) модель плотности и прогнозирование никеленосных интрузий в Дукукском рудном районе (срединный массив, Камчатка) // Региональная геология и металлогения. 2017. № 70. С. 86–97.
- Сидоров М.Д., Таскин В.В., Вешняков Н.А.* Плотностные неоднородности в верхней коре Шанучского рудного района и проблема выявления нескрытых никеленосных интрузий (срединный массив, Камчатка) // Региональная геология и металлогения. 2016. № 65. С. 104–115.
- 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.
- Трухин Ю.П., Сидоров М.Д., Степанов В.А., Кунгурова В.Е.* Строение и никеленосность Кувалорогского базит-ультрабазитового массива. // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. № 6. С. 78–85.
- Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д., Кунгурова В.Е.* Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. 2009. № 5. С. 75–81.

DEEP STRUCTURE OF THE KVINUM-KUVALOROG NIKELIFEROUS ZONE BASED ON THE RESULTS OF DENSITY MODELING (THE SREDINNIY MASSIF, KAMCHATKA)

M.D. Sidorov

Research Geotechnological Center FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002

The deep structure of the southern part of the Dukuk ore region — the Kvinum-Kuvalorog nickel-bearing zone was investigated. The author built a 20-km-deep earth's crust 3D density model. The investigation revealed massive blocks that include nickeliferous intrusions of basite-ultrabasic composition. The blocks correspond to the local Bouguer anomalies. The shape and depth of the non-eroded intrusions were estimated. The local maxima of gravity in the Kvinum-Kuvalorog zone are promising areas for the discovery of copper-nickel ores.

Keywords: density, model, anomaly, intrusion, median massif, nickel.