

Дискуссии

УДК 551.242.32

<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-4-64-86-97>

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ И МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ЮЖНОГО ФЛАНГА КУВАЛОРОГСКОГО ИНТРУЗИВНОГО МАССИВА (КАМЧАТКА)

© 2024 М.Д. Сидоров, Ю.П. Трухин

*Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683002; e-mail: smd1952z@gmail.com*

Поступила в редакцию 03.05.2024; после доработки 29.10.2024; принята в печать 25.12.2024

В Срединном хребте Камчатки, в Квинум-Кувалорогской никеленосной зоне, исследовано глубинное строение южного фланга интрузии Кувалорог. Построена объемная модель распределения плотности пород до глубины 5 км ниже уровня моря. Выделены массивные блоки с плотностью, характерной для базитовых пород дукукского никеленосного плутонического комплекса. Блоки расположены на двух уровнях и являются камерами единой магматической системы. Верхний ярус соответствует обнаженной части интрузии. Нижний ярус состоит из отдельных блоков, расположенных на глубине от 0 до 2 км. Блоки обоих ярусов соединяются перемычками сложной формы. Определен объем скрытых магматических камер нижнего яруса. По средним содержаниям Ni, Cu, Co в породах интрузии и объему камер определен их металлогенический потенциал. Средние содержания Ni, Cu, Co в породах никеленосного комплекса превышают кларки земной коры в 1.5–3 раза. Наибольшими ресурсами (млн т) обладает массивный блок в районе водораздела рек Кихчик–Прав.Кихчинская: Ni — 1.71, Cu — 0.80, Co — 0.51. Полученные оценки металлогенического ресурса камер нижнего яруса являются минимально возможными.

Ключевые слова: металлогенический ресурс, никель, интрузии, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

В южной части Срединного хребта на полуострове Камчатка расположена крупная структура — метаморфический массив. В геологической литературе она известна как Камчатский срединный массив (Трухин и др., 2008), горст антиклинорий, выступ Охотской неоплатформы, Срединный Камчатский выступ метаморфических пород, Центрально-Камчатский кристаллический массив (Сляднев и др., 2007). В современном представлении это метаморфизованные отложения аккреционной призмы (Нурмухамедов и др., 2023; Соловьев, 2008; Ханчук, 1985). Вопрос образования массива является дискуссионным. В настоящей работе авторы придерживаются названия Камчатский срединный массив. Примечательно, что в окраинной

части структура прорвана многочисленными интрузиями базитов дукукского плутонического габбро-перидотитового магматического комплекса (Сидоров, Степанов, 2006). С интрузиями комплекса связана кобальт-медно-никелевая минерализация в регионе, выявлено несколько десятков рудопроявлений и разведано одно месторождение, которые образуют два рудных района на севере и юге метаморфического массива (Трухин и др., 2008). В южном, Дукукском рудном районе большинство рудопроявлений сосредоточены в Квинум-Кувалорогской никеленосной зоне (Боровцов и др., 2001; Сидоров, 2018). Зона сформирована вдоль глубинного разлома, ограничивающего метаморфический массив с юго-запада. Никеленосный магматический комплекс представлен двумя типами интрузивных тел. К первому типу относятся

пластовые тела, вытянутые на 1000–1200 м мощностью от нескольких метров до 200 метров, а также маломощные штоки и дайки. Второй тип интрузий представлен пластино подобными телами площадью до 20–30 км² изометрической или сложной в современном эрозионном срезе формы мощностью до 3 км (Сляднев и др., 2007). Промышленный интерес представляют рудопроявления, образованные при магматическом и гидротермальном переотложении сульфидных рудных масс (Трухин и др., 2008, 2009, 2011), ранее

выделившихся в промежуточных магматических камерах и магматических проводниках между ними. Особенностью крупных интрузий является проявленная в различной степени расслоенность. Эти интрузии, благодаря большой массе и плотности пород по отношению к вмещающей среде выделяются контрастными максимумами в локальной компоненте поля силы тяжести аномалий в редукции Буге.

В Квинум-Кувалорогской никеленосной зоне наиболее изучена интрузия Кувалорог (рис. 1).

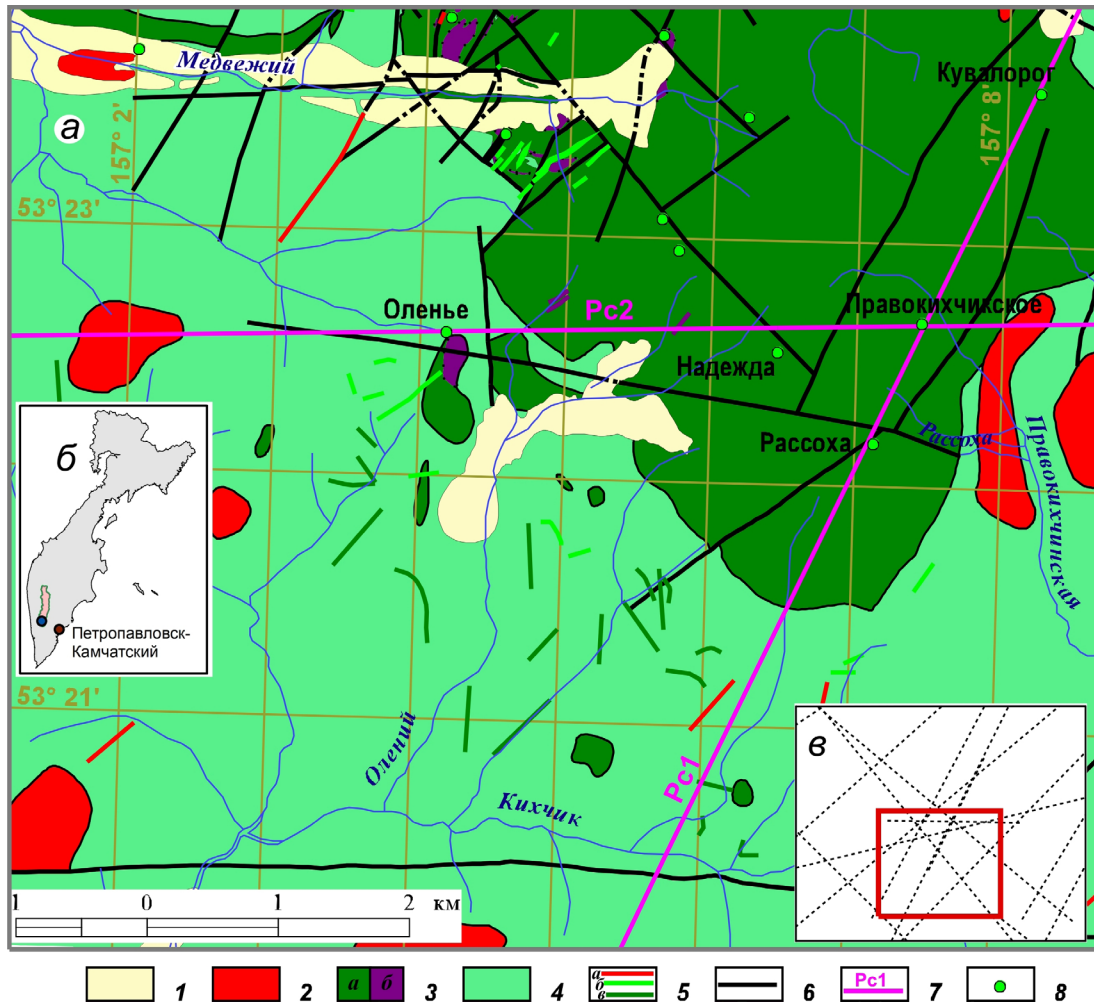


Рис. 1. Геологическая карта (Боровцов и др., 2001), с уточнениями и упрощениями (а), схемы местоположения участка исследований (б) и глубинных плотностных разрезов (в) (врезки): 1 — голоценовые нерасчлененные рыхлые отложения; 2 — меловой кольский плагиогранит-гранодиоритовый комплекс: интрузии гранитов, гранодиоритов, диоритов; 3 — меловой дукукский габбро-перидотитовый комплекс: интрузии сложного состава, от габбро до диоритов (а), от габбро до перидотитов (б); 4 — меловая хейванская свита: филлиты, металаево-ролиты, метапесчаники, реже кристаллические сланцы двуслюдяные, альбит-хлоритовые, хлорит-серцитовые; 5 — дайки разного возраста и состава: гранодиоритов, гранодиорит-порфиров (а), андезибазальтов (б), диоритов, диорит-порфиров (в); 6 — разломы; 7 — линии разрезов; 8 — проявления медно-никелевой минерализации.

Fig. 1. A geological map (Borovtsov et al., 2001) modified and generalized (a), schemes of the study area location (б) and deep density sections (в) (врезки): 1—Holocene undivided loose sediments; 2—Cretaceous Kola plagiogranite-granodiorite complex: intrusions of granites, granodiorites and diorites; 3—Cretaceous Dukuk gabbro-peridotite complex: intrusions of complex composition from gabbro to diorites (a), from gabbro to peridotites (б); 4—Cretaceous Heivan Formation: phyllites, metasiltstones, metasandstones, less often bicarbonate, albite-chlorite and chlorite-sericite crystalline schists; 5—dykes of different age and composition: granodiorites, granodiorite-porphyrines (a), andesibasalts (б), diorites, diorite-porphyrines (в); 6—faults; 7—section lines; 8—occurrences of copper-nickel mineralization.

В пределах интрузии и вблизи нее выявлено девять рудопоявлений и шесть пунктов минерализации сульфидных медно-никелевых руд (Боровцов и др., 2001). На гравиметрической карте аномалий Буге район Кувалорогской интрузии отмечается обширным (70 км²) локальным относительным максимумом силы тяжести сложной морфологии и формы имеющим пять экстремумов с амплитудами 2–6 мГал (Трухин и др., 2009а).

Представления о строении, составе и никеленосности интрузива изменялись по мере его изучения в течении длительного периода — начиная с 1960-х гг. до современности. Сначала многие исследователи представляли интрузию как простой расслоенный лополит (Боровцов и др., 2001; Сляднев и др., 2007). Однако убедительного однозначного описания контактов интрузивного массива нет. Диапазон мнений о контактах интрузии с вмещающей средой от нормального (Щека, 1975) интрузивного до полностью тектонического (Милютин, 1985).

Форму и мощность предполагаемого лополита исследователи определяли по аномалиям силы тяжести. В результате интерпретации методами нормированного градиента и подбора были построены разрезы по нескольким профилям, пересекающим массив (Евтихов, Лукьянов, 1980¹). Цитируемые авторы применили методику расчетов палетками Гамбурцева. В качестве опорных (контрольных) данных использованы аномалии Буге гравиметрической съемки масштаба 1:50000. Трудоемкость ручных вычислений по палеткам не позволяет рассчитывать аномальные эффекты от сложных множественных комбинаций блоков. Поэтому построенные модели разрезов были схематичны.

В модель разреза вдоль ручья Медвежий в основание интрузии было введено пластообразное тело высокой плотности — предполагаемой донной рудной залежи. Это обстоятельство привело к завышению уровня теоретической аномалии над наблюдаемым полем. Компенсацию различия добились сокращением мощности интрузивной части разреза. В итоге в западной части массива модельная толщина интрузивной пластины составила около 500 м. Поисковое бурение глубоких скважин (до 900 м), не обнаружило богатых «базовыми» элементами (Ni, Cu, Co) «подвешенных» залежей руд, и, не достигнув подошвы интрузива, не решило проблемы о наличии донной залежи (Селянгин,

2007). Полученный опыт показал, что не следует пытаться представить массив какими-либо упрощенными классическими формами, истинное его строение намного сложнее, а внутри интрузия содержит многочисленные ксеноблоки вмещающих сланцев.

Дальнейшее изучение глубинного строения в Квинум-Кувалорогской зоне и переинтерпретация геофизических данных с применением современных программ показало, что строение в районе интрузии Кувалорог очень сложное. Сама интрузия состоит из крупных блоков расположенных на разной глубине в несколько ярусов. Отдельные части интрузии соединены между собой проводниками сложной формы. Массивные и наиболее глубокие блоки располагаются в северной части интрузивного массива. (Сидоров, 2018; Сидоров и др., 2023). Внутри блоки имеют макроритмическую расслоенность (Селянгин, 2007).

Накопленные к настоящему времени данные показали, что интрузия Кувалорог представлениям о лополитовой форме внедрения не соответствует, являясь сложным дислоцированным расслоенным массивом, отдельные части которого смещены относительно друг друга в разных направлениях и залегают в несколько ярусов на различной глубине. Более объективно судить о положении отдельных частей массива и их форме лучше всего по объемным изображениям некоторых свойств вещества интрузии, одним из которых является плотность горных пород. В настоящей статье рассматривается объемная плотностная модель глубинного строения на южном фланге Кувалорогского интрузива с оценкой металлогенического потенциала его неэродированных частей.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Рассматриваемый участок никеленосной зоны сложен терригенными отложениями хейванской свиты. Породы свиты метаморфизованы в зеленосланцевой фации и прорваны поздне-меловыми интрузиями дукукского и кольского плутонических комплексов (рис. 1). Мощность свиты 2300 м. Контакт с залегающими ниже кристаллическими сланцами камчатской метаморфической серии тектонический. Характерная плотность филлитов, сланцев, метапесчаников и метаалевролитов свиты 2.67–2.72 г/см³. Плотность подстилающих свиту кристаллических сланцев камчатской серии 2.74–2.80 г/см³. Породы, как свиты, так и метаморфической серии слабомагнитны (Сидоров, Степанов, 2006). Интрузия Кувалорог сложена габбро, кортландитами, габброноритами, норитами, кварцевыми диоритами, диоритами с явным

¹ Евтихов И.В., Лукьянов В.Н. Отчет о результатах поисковых геолого-геофизических работ, выполненных в пределах габбро-норитового массива Кувалорог Кихчикской партией в 1979–80 гг. Петропавловск-Камчатский, ФГУ «ТФИ по Камчатской области и КАО, 1980. 124 с.

преобладанием габбро и габброноритов (Боровцов и др., 2001; Сляднев и др., 2007). Практически все наблюдавшееся в интрузиве сингенетичное сульфидное оруденение связано с оливиновыми или оливин содержащими плагиоклаз-флогопит-амфиболовыми ортопироксенитами, иногда с прослоями или линзами кортландит-шрисгеймитов. В экзоконтактах ксенолитов сланцев наблюдается сульфидно-графитовая минерализация. Максимальной плотностью (до 3.2 г/см^3 и более) обладают пироксениты, горнблендиты и кортландиты. Габбро и нориты имеют плотность $2.9\text{--}3.0 \text{ г/см}^3$, Плотность большинства диоритов и габбро-диоритов заключена в интервале от 2.75 г/см^3 до 2.90 г/см^3 . Вкрапленники граната и сульфидов увеличивают плотность пород. В целом, для горных пород Кувалорогского массива характерна слабая способность к намагничиванию в сочетании с повышенной плотностью (Сидоров, Степанов, 2006).

В обрамлении Кувалорогского массива обнажаются интрузии кольского плагиогранит-гранодиоритового комплекса. На описываемой площади комплекс представлен интрузиями до 0.5 км^2 в поперечнике обычно овальной формы. Преобладающий состав тел — кварцевые диориты, реже граниты и гранодиориты. По физическим свойствам породы кольского магматического комплекса относятся к группе магнитных пород средней плотности $\rho = (1000\text{--}3000) \times 10^{-5} \text{ СИ}$, $\sigma = 2.66\text{--}2.80 \text{ г/см}^3$ (Сидоров, Степанов, 2006). Возможно, что некоторые тела гранитоидов в «оторочке» интрузива представляют кислые дифференциаты отдельных порций (плагиогранитного типа) собственно дукукской магмы, а также продукт смешения и контаминации при контактовых выплавках Кувалорогской интрузии (Селянгин, 2007).

В эродированной части интрузии (рис. 1) на южном фланге выявлено четыре проявления сульфидных медно-никелевых руд: Кувалорог, Правокихчинское, Рассоха и Надежда (Боровцов и др., 2001). За пределами большого массива, в предполагаемой апофизе, расположено рудопроявление Олень (рис. 1).

Рудопроявление Олень связано с небольшой (0.2 км^2) интрузией кортландитов и роговообманковых пироксенитов среди сланцев хейванской свиты. В интрузии расположена зона окисления сульфидных руд. Бурение неглубокими скважинами (до 15 м) показало увеличение с глубиной содержаний никеля до 1.75 % и 0.44 % меди. Прогнозная оценка по вторичным ореолам ресурсов интрузии Оленьского определена в 34.6 тыс. т. никеля, 6.0 тыс. т меди и 1.2 тыс. т кобальта. Поиски методами электроразведки (метод переходных процессов, вызванная поляризация) выявили аномалию проводимости площадью

0.3 км^2 на глубине 80–100 м. Предполагается (Лашинский, Лукьянов²), что аномалия, связанная с сульфидным оруденением.

Три проявления медно-никелевых сульфидных руд (Рассоха, Правокихчинское, Кувалорог) расположены на юго-восточной окраине интрузивного массива, в тектонической зоне шириной ~1 км северо-восточного простирания. Вследствие контаминации на контакте габброиды интрузии изменяются до диоритов, а вмещающие филлитовидные сланцы превращены в гранат-силлиманит-биотит-кварцевые, гранат-плагиоклазовые роговики. В экзоконтакте наблюдаются прожилки габбро в интенсивно смятых и катаклазированных породах хейванской свиты (Боровцов и др., 2001). В верховьях р. Правокихчинская (рис. 1) обнажена крутопадающая зона северо-западного простирания измененных пород в биотит-роговообманковых диоритах с развалами рудного материала, включая богатые первичные руды. Анализ четырех проб из богатых руд в среднем течении руч. Рассоха показал концентрации (%): никеля 0.84–4.2; кобальта 0.02–0.15; меди 0.31–0.55. В истоках руч. Рассоха выявлена в коренном залегании залежь выщелоченных богатых сульфидных руд мощностью до 11 м. Остаточные содержания в этих рудах (%): никеля — 0.16, кобальта — 0.015, меди — 0.235. Содержание никеля на пункте сульфидной минерализации Надежда в южной оконечности основного массива интрузии Кувалорог не превышает 0.1% (Боровцов и др., 2001).

На рудопроявлении Кувалорог, у восточной окраины массива обнаружены три зоны сульфидной минерализации протяженностью 700 м шириной до 70 м с рудным телом в одной из них. Размер рудного тела $30 \times 50 \text{ м}$. Руда на поверхности сильно выщелочена. Содержание никеля достигает 0.15 %, меди 0.32 %, кобальта 0.008 %. Кроме того, руда содержит до 2 г/т золота и 4.7 г/т платиноидов (Боровцов и др., 2001).

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Глубинное строение в районе Кувалорогского интрузивного массива изучалось геофизическими методами. Поисковые задачи решались на отдельных участках методами переходных процессов, вызванной поляризации и крупномасштабной магниторазведкой с измерением

² Лашинский Г.В., Лукьянов В.Н. Отчет о результатах региональных и поисковых геолого-геофизических работ, выполненных в южной части Среднего Камчатского выступа Дукукской партией в 1976–1979 гг. Петропавловск-Камчатский: ФГУ «ТФИ по Камчатской области и КАО, 1979. Кн. 1 — 155 с., кн. 2 — 229 с., кн. 3 — 223 с.

модуля магнитной индукции T . Глубинность исследований не более первых сотен метров от поверхности. Информация о строении более глубоких горизонтов получена при интерпретации аномалий выявленных гравиметрическими и аэромагнитными съемками масштаба 1:200000 и 1:50000 (Сидоров³). В самой интрузии пробурено пять глубоких (500–900 м) скважин по профилю в верхнем течении руч. Медвежий (рис. 1). Из всех скважин только одна, у западного края интрузии, достигла подошвы массива (а возможно крупного ксеноблока вмещающих сланцев), остальные же не достигли дна интрузии.

В качестве основного источника информации о глубинных неоднородностях использованы интерполированные карты аномалий в редукции Буге 2-х миллигальной гравиметрической съемки м-ба 1:200000 и частично полумиллигальной съемки м-ба 1:50000¹. Как уже было отмечено, предпосылкой для использования гравиметрических данных является значительное превышение плотности ($0.2–0.5 \text{ г/см}^3$) базитовых пород интрузии над плотностью вмещающей сланцевой толщи. Это обстоятельство, а также отсутствие данных других глубинных методов, предопределило применение метода плотностного моделирования по сети профилей с последующим построением объемного изображения распределения плотности в блоке земной коры, содержащем интрузивный массив Кувалорог.

Суть примененной методики, основана на 2D моделировании глубинных разрезов исходя из представления о слоисто-блоковом строении земной коры, региональном распространении основных границ: кровли и подошвы консолидированной части коры, а также границ внутри нее, различной плотностью горных пород слагающих отдельные блоки и слои. Исследуемая площадь пересекается разнонаправленными интерпретационными профилями. Верхняя часть начальной модели на каждом профиле представляет собой геологический разрез составленный по геологическим картам и стратиграфическим колонкам. Геологические границы аппроксимируются ломаными линиями образующими контуры сечений бесконечных горизонтальных призм расположенных перпендикулярно к плоскости разреза. Призмы соответствуют геологическим блокам и слоям. Плотность для призм определяется составом преобладающих пород слагающих геологические тела. Внемасштабные (тонкие) слои объединены в общий слой со средневзве-

шенной по мощности плотностью. На участках профилей с телами не удовлетворяющих двумерности (блоки в хребтах, изометрические блоки интрузий, тектонические «отторженцы») для призм вводится ограничение по простиранию. Простирание призм для интрузий ограничено по максимальным градиентам в краях соответствующих аномалий и геологическим данным. При подборе разреза аномалии для этих призм рассчитываются в режиме 2.5D. При построении первичных 2D моделей разрезов проводилась интерпретация геофизических аномалий методом деконволюции Эйлера (Reid et al., 1990), определялись координаты особых точек, по которым уточнялась геометрия разреза в глубинной части.

На профилях способом подбора рассчитываются теоретические аномалии Δg с погрешностью в соответствии с опорными гравиметрическими данными и строятся глубинные плотностные разрезы. В качестве внутреннего контроля расчетов служат места пересечения профилей. В общих блоках пересекающихся разрезов границы слоев должны совпадать с точностью в масштабе моделирования а подобранные плотности близки по величине. Подбор разрезов проводился в интерактивном режиме.

Далее на каждый разрез накладывается сетка, в узлах которой определяется подобранная плотность и 2D координаты в плоскости разреза. Координаты из плоскости разреза (L_n, H_n, D_n) преобразуются в 3D координаты (X_n, Y_n, Z_n, D_n), где: L_n — горизонтальное расстояние от начала профиля до n -й точки (узла сетки) на разрезе, H_n — абсолютная глубина, D_n — плотность, X_n, Y_n, Z_n, D_n — координаты и плотность в выбранной плановой метрической системе координат. Полученные таким образом параметры на всех профилях объединяются в единой базе данных. Подробно алгоритм и методика описана в работе (Сидоров, Нурмухамедов, 2022).

После создания базы данных проводится интерполяция методом 3D Кригинга и данные преобразуются в 3D матрицу, из которой формируется объемное изображение. Построенная модель состоит из множества кубов заданного размера и уникальной плотностью в каждом из них. В модели выделены изоповерхности с плотностью пород никеленосного комплекса. Изоповерхности дают представление о форме, объеме и положении в пространстве отдельных частей интрузии. Полученное трехмерное изображение является результатом 3D интерполирования плотностей подобранных по 2D алгоритмам в плоскости разрезов, образующих каркас внутри исследуемого блока коры, поэтому вероятно некоторая «потеря» информативности в межпрофильном пространстве. Но, сопоставление

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

плотностей модели на таких участках показало, что они не противоречат геологическими данным на поверхности. Так, повышенная плотность в модели соответствует геоблокам, насыщенным фрагментами массивной базитовой интрузии, а участки с относительно пониженной плотностью совпадают с блоками сланцев матрикса, либо кислым породами гранитоидного ряда.

За весь период изучения Дукукского рудного района и Квинум-Кувалорогской зоны построено много плотностных разрезов (рис. 1*б*) (Сидоров, 2018). Для модели рассматриваемой территории использованы фрагменты этих разрезов. В качестве априорных данных привлечены сведения о геологии и петрофизических свойствах горных пород из многочисленных производственных, научных отчетов и публикаций. При моделировании разрезов для обобщенных блоков верхней части кристаллической коры принята плотность в диапазоне типичной для кристаллических сланцев и гнейсов $2.74\text{--}2.8\text{ г/см}^3$, выходы которых наблюдаются в структурах гранито-гнейсовых куполов непосредственно к северу от Кувалорогского интрузивного массива. О плотности блоков гранулитов-базитового слоя можно косвенно судить по ксенолитам в лавах Авачинского и Корякского вулканов. Группа ксенолитов, которые характеризуют состав нижней коры представлены перидотитами и пироксенитами с плотностью $2.9\text{--}3.2\text{ г/см}^3$. Для блоков верхней мантии принята плотность $3.2\text{--}3.3\text{ г/см}^3$.

В качестве контроля при подборе служили аномалии в редукции Буге, выявленные гравиметрической съемкой м-ба 1:200000. На разных профилях погрешность подбора составила $0.8\text{--}2\text{ мГал}$. Расчет плотности на разрезах проведен до глубины 50 км программой GM-SYS (Geosoft Software: Oasis montaj, GM-SYS, Euler 3D. URL: <http://www.geosoft.com/ru> (Accessed 2008/01/28). Размер ребра элементарных кубических ячеек, из которых составлено объемное изображение получен последовательным сгущением от 2 до 0.1 км (Сидоров, Нурмухамедов, 2022).

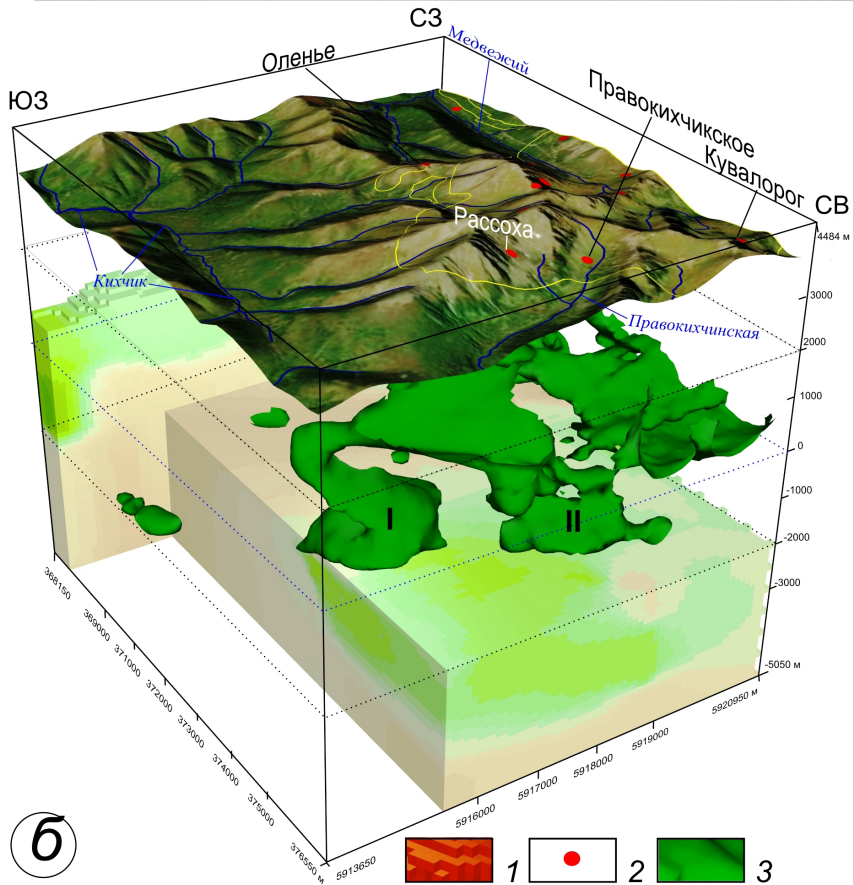
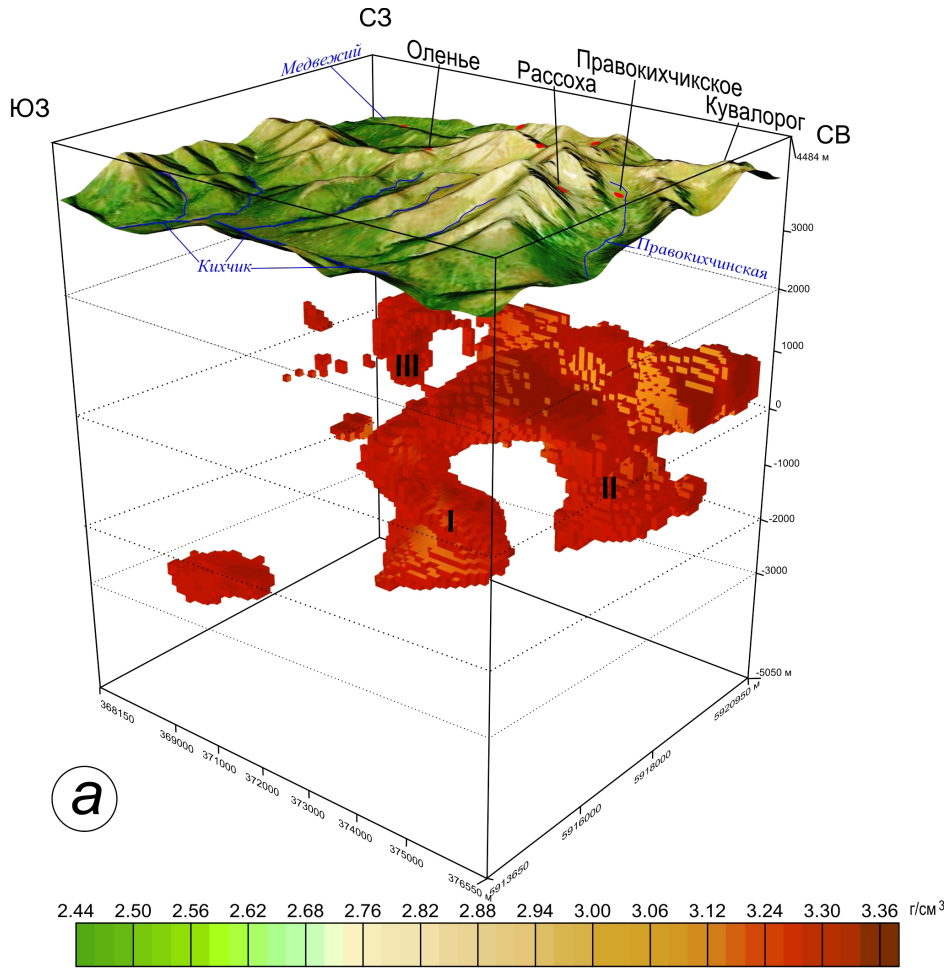
Рис. 2. Объемное изображение плотностной модели блока земной коры на южном фланге Кувалорогского интрузивного массива, вид с юго-востока. В верхней части изображений — рельеф земной поверхности (приподнят примерно на 3 км над моделью). Размер кубических ячеек модели — $0.1\times 0.1\times 0.1\text{ км}$. *a* — ячейки с плотностью более 2.8 г/см^3 , *б* — изоповерхность 2.84 г/см^3 , характеризующая форму интрузивного массива на глубине. На *б* граница обнаженной части интрузии показана желтой линией. Римскими цифрами обозначены блоки нижнего уровня интрузий, для которых определен металлогенический потенциал. 1 — кубические ячейки плотностной модели; 2 — рудопоявления сульфидных медно-никелевых руд; 3 — изоплотностная поверхность 2.84 г/см^3 .

Fig. 2. A volumetric image of the density model of the Kuvallorog intrusive massif southern flank crustal block, view from the southeast. The relief is covered with the photographic image of the Earth's surface and is elevated by 3 km. The dimensions of cubic cells in the model are $0.1\times 0.1\times 0.1\text{ km}$. Fragment *a* illustrates cells with density greater than 2.8 g/cm^3 , while fragment *b* depicts an isosurface of 2.84 g/cm^3 , which characterises the shape of the intrusive massif at depth. The yellow line shows the boundary of the exposed part of the intrusion. The Roman numerals indicate the blocks of the lower stage of the intrusion, for which the metallogenic potential was determined. 1 — density model cubic cells; 2 — sulphide copper-nickel ore occurrences; 3 — isodensity surface of 2.84 g/cm^3 .

На блок-диаграмме (рис. 2) изображена верхняя часть исследованного блока земной коры. Как уже отмечалось (Сидоров, 2018) строение интрузива многослойное. На блок-диаграмме и разрезах (рис. 3–4) видно, что подошва обнаженной на поверхности части плотного (более 2.8 г/см^3) тела интрузии залегает на глубине близкой к уровню моря. Ниже, до глубины $\sim 5\text{ км}$ расположены несколько массивных блоков образующих нижний горизонт интрузии. Это следует из плотности блоков ($2.8\text{--}2.9\text{ г/см}^3$), которая характерна для пород ряда диорит-габбро-перидотит и того, что блоки соединяются с верхней пластиной перемычками (проводниками) также состоящими их высокоплотных кубических ячеек модели (рис. 2*a*).

Форма проводников сложная, ветвящаяся, наиболее отчетливо видна в изоплотностной поверхности 2.84 г/см^3 (рис. 2*б*, 3, 4). Также можно предположить, что небольшие выходы габброидов к югу, юго-западу от интрузии на правом борту р. Кихчик и в истоках руч. Олений, являются апофизами от магматических камер нижнего яруса или проводников между нижними и верхними частями Кувалорогской интрузии. Плотность геосреды между интрузивными блоками $2.62\text{--}2.70\text{ г/см}^3$, что соответствует сланцевым породам хейванской свиты. Объемная плотностная модель построена по материалам среднемасштабных съемок, поэтому поверхностями с плотностью типичной для базитов можно ограничить только относительно крупные магматические камеры, которые образуют часть рудно-магматической системы. Малоразмерные тела при моделировании являются «внемасштабными».

Малые интрузии — это вероятные апофизы в обрамлении больших камер. Поэтому часть окружающего пространства вблизи крупных интрузивных тел следует включать в единую рудно-магматическую систему. Примером такой системы может служить Шанучское рудное поле (Трухин и др., 2009б, 2011).



Вблизи интрузии Кувалорог наиболее богатые сульфидные руды наблюдаются на рудопоявлении Анабергитовая Щель (Сидоров и др., 2023), которое расположено в малой интрузии-апофизе у северного края эродированного большого интрузивного тела. Используя

характеристики металлоносности дукукской магмы можно приблизительно оценить металлогенический потенциал крупных интрузий определяя их объем и геометрические размеры по модели плотности. Ранее были определены металлогенические ресурсы для всех массивных

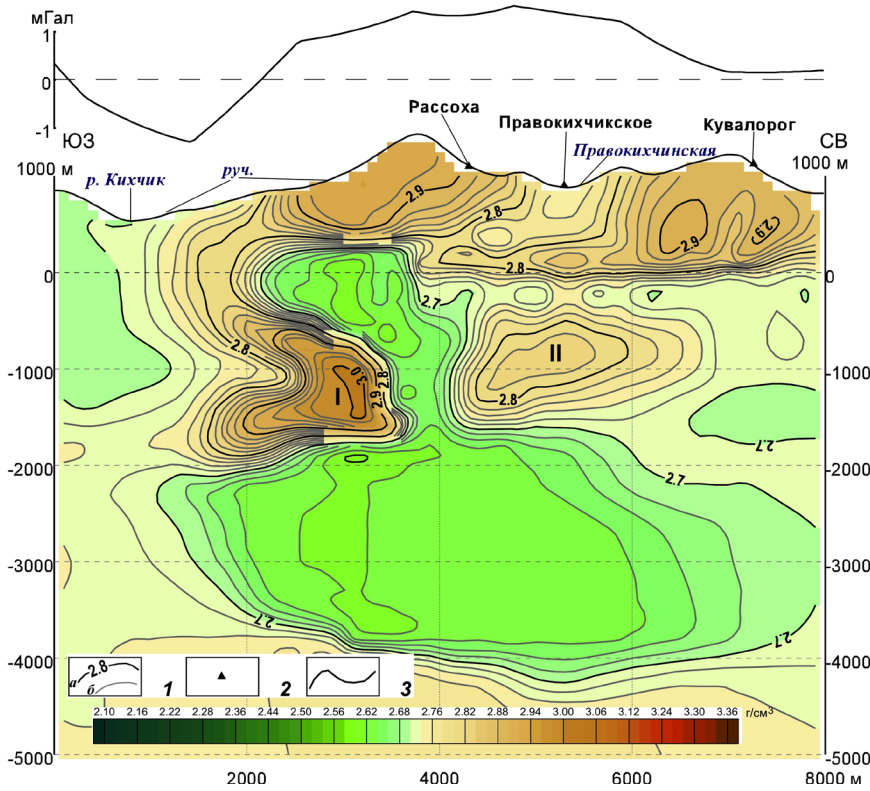


Рис. 3. Вертикальное сечение объемной плотностной модели по линии Pc1 (рис. 1) через рудопоявления Рассоха, Правокихчикское и Кувалорог. Римскими цифрами показаны блоки интрузии нижнего яруса, для которых определен металлогенический потенциал. 1 — изоденсы основные (а), промежуточные (б); 2 — рудопоявления никеля; 3 — график локальной (остаточной) аномалии Буге (оцифровка условная).

Fig. 3. Vertical cross-section of the volumetric density model along the Pc1 line (see Fig. 1) through the Rassokha, Pravokikhchikskoye and Kuvalorog ore occurrences. Roman numerals indicate the blocks of the lower level intrusions, for which the metallogenic potential is determined. 1 — basic (a), intermediate (b) isodens; 2 — nickel ore occurrences; 3 — plot of local (residual) Bouguer anomaly (digitization is conditional).

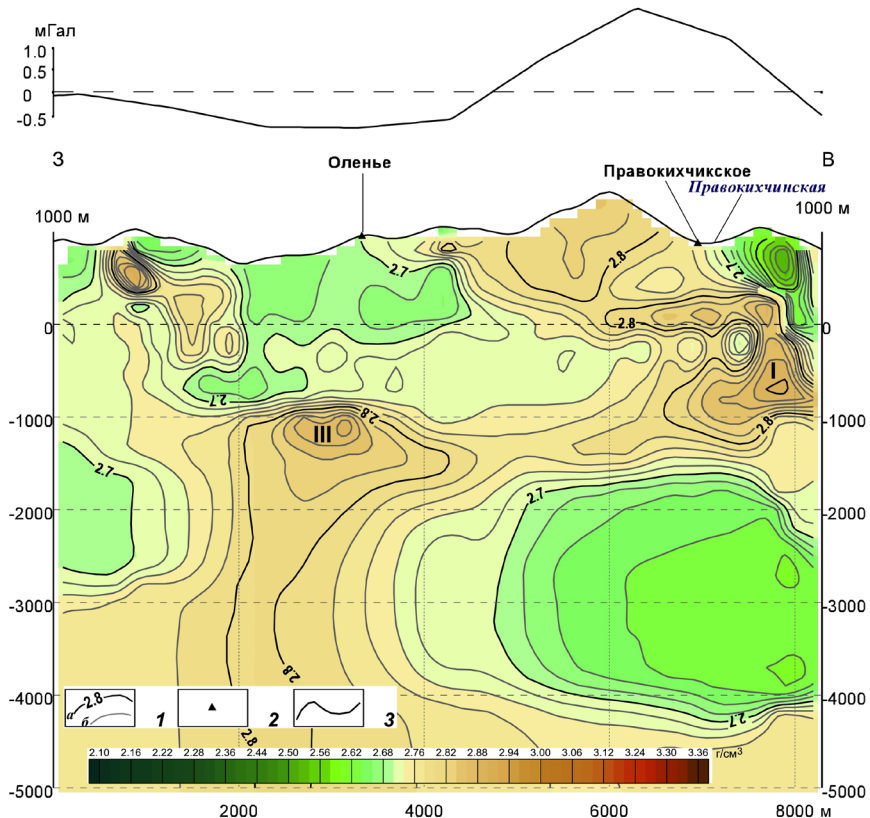


Рис. 4. Вертикальное сечение объемной плотностной модели по линии Pc2 (рис. 1) через рудопоявления Олень и Правокихчикское. Римскими цифрами обозначены блоки интрузии нижнего яруса, для которых определен металлогенический потенциал. 1 — изоденсы основные (а), промежуточные (б); 2 — рудопоявления никеля; 3 — график локальной (остаточной) аномалии Буге (оцифровка условная).

Fig. 4. Vertical section of the volumetric density model along the Pc2 line (see Fig. 1) through the Olenjye and Pravokikhchikskoye ore occurrences. Roman numerals denote the blocks of the lower level intrusion, for which the metallogenic potential was determined. 1 — basic (a), intermediate (b) isodens; 2 — nickel ore occurrences; 3 — plot of local (residual) Bouguer anomaly (digitization is conditional).

блоков в границах сложного Кувалорогского максимума силы тяжести (Сидоров, Кунгурова, 2019). Подсчет проведен до глубины 3 км ниже уровня моря. В этом глубинном интервале общий ресурс (млн т) никеля составил 15.92, меди — 7.42, кобальта — 4.76.

Средние содержания Ni, Cu, Co для расчетов получены в результате прогнозно-геохимических исследований на интрузиях массива Кувалорог и Шанучском рудном поле (Сидоров, Кунгурова, 2017). Содержания определены по данным полного спектрального полуколичественного анализа более 400 проб различных пород дукукского магматического комплекса, которые по химическому и минералогическому составу объединены

в группы наиболее представленные в интрузиях (табл. 1). В большинстве проб обнаружено повышенное относительно кларков земной коры количество металлов. Сравнение средних содержаний Ni, Cu, Co дукукских пород с кларками содержаний в основных породах отмечается, что они превышают кларки земной коры в 1.5–3 раза.

Объем магматических камер нижнего яруса на южном фланге интрузии Кувалорог определен по созданной 3D модели плотности глубже горизонта –500 м. Для этого интерполирована поверхность с плотностью 2.84 г/см³, принятая за границу интрузии с вмещающей средой и вычислен объем блоков, охваченных этой поверхностью (табл. 2). Бурение глубоких

Таблица 1. Содержание никеля, меди, кобальта в породах массива Кувалорог (Сидоров, Кунгурова, 2017)

Table 1. Nickel, copper, cobalt content in rocks of the Kuvallorog massif (Sidorov, Kungurova, 2017)

Тип породы	Наименование породы	Среднее значение, % диапазон содержаний			к-во проб
		Ni	Cu	Co	
Породы без видимой сульфидной минерализации					
ультрамафиты основные	амфиболовые, оливинсодержащие плагиоклаз-флогопит-амфиболовые ортопироксениты	<u>0.0280</u> 0.004-0.04	<u>0.0185</u> 0.003-0.03	<u>0.0126</u> 0.005-0.02	24
основные	плагиоклаз-амфиболовое габбро, биотит-амфиболовые мелано-габбро-нориты	<u>0.0281</u> 0.0015-0.07	<u>0.0113</u> 0.003-0.05	<u>0.0070</u> 0.002-0.02	73
ультрамафиты основные+основные	все: амфиболовые, оливинсодержащие плагиоклаз-флогопит-амфиболовые ортопироксениты+плагиоклаз-амфиболовое габбро, биотит-амфиболовые мелано-габбро-нориты	<u>0.0281</u> 0.0015-0.07	<u>0.0131</u> 0.003-0.05	<u>0.0084</u> 0.002-0.02	97
Породы с видимой сульфидной минерализацией — вкрапленной, прожилково-вкрапленной					
ультрамафиты основные	амфиболовые, оливинсодержащие плагиоклаз-флогопит-амфиболовые ортопироксениты, с вкрапленностью сульфидов 1–10 %	<u>0.1429</u> 0.02-0.7	<u>0.0457</u> 0.001-0.1	<u>0.0119</u> 0.005-0.02	60
ультрамафиты основные	лимонитизированные амфиболовые, оливинсодержащие плагиоклаз-флогопит-амфиболовые ортопироксениты	<u>0.1546</u> 0.004-0.7	<u>0.0415</u> 0.003-0.4	<u>0.0075</u> 0.0015-0.02	42
основные	габбро, биотит-амфиболовые мелано-габбро-нориты, с вкрапленностью сульфидов 3–10 %	<u>0.1577</u> 0.1-0.3	<u>0.0216</u> 0.007-0.1	<u>0.0114</u> 0.007-0.02	13

Таблица 2. Металлогенический потенциал скрытых интрузий на южном фланге массива Кувалорог

Table 2. Metallogenic potential of hidden intrusions on the southern flank of the Kuvallorog massif

Блок	Диапазон глубины, м ниже уровня моря	V, км ³	Ni, млн т	Cu, млн т	Co, млн т
I	500–2000	2.14	1.71	0.80	0.51
II	500–1500	0.85	0.68	0.32	0.20
III	1000–2000	0.74	0.59	0.28	0.18

скважин в верхнем ярусе Кувалорогской интрузии показало, что внутри интрузия содержит множество ксенолитов вмещающих пород (сланцев). В разрезах скважин суммарная длина интервалов с породами не относящихся к никеленосному комплексу составляет 5–15 %, в среднем около 11% по 5 скважинам. Поэтому при определении объемов блоков интрузии они уменьшены на 11% от первоначально вычисленного по модели объема.

При предположении, что все порции магмы, из которой образовались фрагменты интрузии, поступили из одного глубинного очага и имеют одинаковый состав в каждой порции магмы, теоретическое количество металлов в блоках определяется как произведение средних содержаний (%) для пород без видимой сульфидной минерализации (Сидоров, Кунгурова, 2017): Ni — 0.0281; Cu — 0.0131; Co — 0.0084 на массу предполагаемых скрытых магматических камер. Найденные при выбранных параметрах металлогенические ресурсы металлов в магматических камерах нижнего яруса (табл. 2) не отражают полностью потенциала всей рудно-магматической системы на юге Кувалорога. В плотностной модели, построенной по материалам гравиметрических съемок масштаба 1:200000 не отражаются малые интрузии, находящиеся вблизи выявленных крупных тел из-за их «вне-масштабности». Поэтому, реальное количество металлов в исследованном блоке коры, по нашему мнению, может быть значительно больше.

Заключение

В результате интерпретации аномалий силы тяжести Буге методом плотностного моделирования построена объемная модель распределения плотности геосреды в блоке земной коры до глубины 5 км ниже уровня моря. В модели локализованы массивные блоки с плотностью характерной для базитовых пород никеленосного дукукского плутонического габбро-перидотитового комплекса. Выявленные плотные блоки образуют нижний горизонт кувалорогской интрузии. Массивные блоки соединяются с обнаженным на поверхности интрузивным телом перемиками-проводниками сложной формы. Обнажения базитов к юго-западу от интрузии являются апофизами проводников.

Определен объем скрытых магматических камер нижнего яруса охваченных поверхностью с плотностью 2.84 г/см³, найдено теоретическое количество металлов в них. Металлоносность магматических пород получена в результате прогнозно-геохимических исследований на обнажениях интрузий Кувалорог и Шанучского рудного поля. Средние содержания Ni, Cu, Co

превышают кларки земной коры для основных пород в 1.5–3 раза. Наибольшие ресурсы имеет массивный блок в районе водораздела рек Кихчик–Прав.Кихчинская (млн.т): Ni — 1.71, Cu — 0.80, Co — 0.51. Найденные металлогенические ресурсы в магматических камерах нижнего яруса являются минимально возможными, т.к. в плотностной модели не отражены «вне-масштабные» тела вблизи крупных интрузий (за пределами изоплотностной поверхности 2.84 г/см³) и не учтена их металлоносность.

Список литературы [References]

- 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. [*Borovtsov A.K., Sidorenko V.I., Shchenko V.I. et al.* State geological map of the Russian Federation scale 1:200 000. The Khangarian series. Sheet N-57-XX (Ganals). An explanatory note. Publishing house of St. Petersburg kartfabriki VSEGEI, 2001. 147 p. (in Russian)].
- Милютин А.Г.* Эндогенное оруденение Корьякско-Камчатской складчатой области. М.: Недра, 1985. 201 с. [*Milyutin A.G.* Endogenous mineralization of the Koryak-Kamchatka folded region. Moscow: Nedra, 1985. 201 p. (in Russian)].
- Нурмухамедов А.Г., Сидоров М.Д., Трухин Ю.П.* Происхождение и структурная позиция Камчатского срединного массива по данным глубинных геолого-геофизических исследований // Георесурсы. 2023. № 25(2). С. 254–270. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.2.19> [*Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D., Trukhin Yu.P.* Origin and structural position of the Kamchatka median massif according to deep geological and geophysical surveys // Georesources. 2023. № 25(2). P. 254–270 (in Russian)].
- Селянгин О.Б.* Новые данные о строении никеленосного интрузива Кувалорог (южная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1. Вып. 9. С. 111–126 [*Selyangin O.B.* New data on structure and evolution of nickel – bearing intrusion Kuvallorog, south Kamchatka // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2007. № 1(9). P. 111–126 (in Russian)].
- Сидоров М.Д., Кунгурова В.Е.* Определение ресурсного потенциала металлов по плотностным моделям интрузий // Камчатка-5: Горный информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). М.: Горная книга. 2017. Спец. выпуск 32. № 12. С. 121–137. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-32-121-137> [*Sidorov M.D., Kungurova V.E.* Defining the resource potential of metals by intrusion density models // Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). Kamchatka-5. Moscow. Mining Book. 2017. Sp. Iss. 32. №. 12. P. 121–137 (in Russian)].
- 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 [*Sidorov M.D., Stepanov V.A.* Geophysical fields and nickel content of Sredinny

- massif, Kamchatka // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2006. № 2(8). P. 140–150 (in Russian)].
- Сидоров М.Д.* Глубинное строение Квинум-Кувалорогской никеленосной зоны по результатам плотностного моделирования (Срединный массив, Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 2. Вып. 38. С. 34–44. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2018-2-38-34-44> [*Sidorov M.D.* Deep structure of the kvinum-kuvalorog nickeliferous zone based on the results of density modeling (Sredinny massif, Kamchatka) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2018. № 2(38). P. 34–44 (in Russian)].
- Сидоров М.Д., Нурмухамедов А.Г.* Объемное изображение плотностной модели земной коры на примере южной Камчатки // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 10. С. 1433–1452. <https://doi.org/10.15372/GiG2021155> [*Sidorov M.D., Nurmukhamedov A.G.* Three-dimensional image of of crustal density model: a case study in South Kamchatka // Russian Geology and Geophysics. 2022. V. 63. № 10. P. 1189–1206. <https://doi.org/10.2113/RGG20204328>].
- Сидоров М.Д., Паламарь С.В., Койдан И.А. и др.* Плотностная модель и металлогенический потенциал северного фланга Кувалорогского интрузивного массива (Камчатка) // Разведка и охрана недр. № 12. 2023. С. 31–37. https://doi.org/10.53085/0034-026X_2023_12_31 [*Sidorov M.D., Palamar S.V., Koidan I.A. et al.* Density model and metallogenic potential of the northern flank of the Kuvalorogsky intrusive massif (Kamchatka) // Exploration and protection of the subsoil. № 12. 2023. P. 31–37 (in Russian)].
- 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. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-2-3-10> [*Sidorov M.D., Kungurova V.E.* Determination productivity of ore-magmatic systems of the Kvinum-Kuvalorogsky nickel-bearing zone according to the density model (Kamchatka median massif) // The bulletin of the north-east scientific center. 2019. № 2. P. 3–10 (in Russian)].
- Сляднев Б.И., Шаповаленко В.Н., Крикун Н.Ф. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:1000 000 (третье поколение). Лист N-57. Петропавловск-Камчатский. Объяснительная записка. СПб. Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2007. 206 с. [*Slyadnev B.I., Shapovalenko V.N., Krikun N.F. et al.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Mashtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). List N-57. Petropavlovsk-Kamchatskiy. Ob'yasnitel'naya zapiska. Saint-Petersburg. Izd-vo VSEGEI, 2007. 206 p. (in Russian)].
- Соловьев А.В.* Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит: методы трекового датирования и структурного анализа. М.: Наука. 2008. 319 с. [*Solov'yev A.V.* Study of tectonic processes in areas of convergence of lithospheric plates: methods of track and structural analysis. Moscow: Nauka, 319 p. (in Russian)].
- Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д.* Камчатская никеленосная провинция // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418. № 6. С. 802–805 [*Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D.* The Kamchatka nickel-bearing province // Doklady Earth Sciences. 2008. V. 419. № 1. P. 214–216. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08020050>].
- Трухин Ю.П., Сидоров М.Д., Степанов В.А. и др.* Строение и никеленосность Кувалорогского базит-ультрабазитового массива // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2009. № 6. С. 78–85 [*Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D. et al.* Structure and Nickel Content of the Kuvalorog Basite-Ultrabasic Massif // Proceedings of higher educational establishments. Geology and exploration. 2009. № 6. P. 78–85 (in Russian)].
- Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д. и др.* Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. 2009. № 5. С. 75–81 [*Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D. et al.* Shanuchskoye copper-nickel deposit: geological and geophysical model, composition and geochemistry of ores // Ores and Metals. 2009. № 5. P. 75–81 (in Russian)].
- Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д. и др.* Шанучское медно-никелевое рудное поле (Камчатка) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2011. № 1. С. 20–26 [*Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D. et al.* Shanuchskoye copper-nickel ore field (Kamchatka) // The bulletin of the north-east scientific center. 2011. № 1. P. 20–26 (in Russian)].
- Ханчук А.И.* Эволюция древней сиалической коры в островодужных системах восточной Азии. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985. 138 с. [*Khanchuk A.I.* Evolution of the ancient sialic crust in the island arc systems of East Asia. Vladivostok: DVNTS AN SSSR, 1985. 138 p. (in Russian)].
- Щека С.А.* Около габбровые роговики и гранулитовые породы Камчатки // Петрология и петрохимия магматических и метаморфических пород Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1975. С. 167–195 [*Shcheka S.A.* Near gabbro cornea and granite rocks of Kamchatka // Petrology and petrochemistry of igneous and metamorphic rocks of the Far East. Vladivostok: DVNC AN SSSR, 1975. P. 167–195 (in Russian)].
- Reid A.B., Allsop J.M., Granser H. et al.* Magnetic interpretation in three dimensions using Euler Deconvolution // Geophysics. 1990. V. 55. Iss. P. 80–91.

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ И МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ
**DEEP STRUCTURE AND METALLOGENIC POTENTIAL
OF THE SOUTHERN FLANK OF THE KUVALOROG INTRUSIVE MASSIF
(КАМЧАТКА)**

M.D. Sidorov, Yu.P. Trukhin

*Research Geotechnological Center of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683002*

Received May 17, 2024; revised October, 29, 2024; accepted December 25, 2024

The deep structure of the southern flank of the Kuvalorog intrusion located in the Kvinum-Kuvalorog nickeliferous zone of the Sredinny Ridge (Kamchatka) was investigated. A volumetric model of rock density distribution up to a depth of 5 km below sea level was constructed. Massive blocks with density characteristic of basitic rocks of the Dukuk nickel-bearing plutonic complex were identified. The blocks are located on two levels and are chambers of a single magmatic system. The upper level corresponds to the exposed part of the intrusion. The lower level consists of separate blocks located at a depth of 0 to 2 km. The blocks of both levels are connected by complexly shaped lintels. The volume of hidden magmatic chambers of the lower level was determined. The average Ni, Cu, Co contents in the rocks of the intrusion and the volume of the chambers determine their metallogenic potential. The average Ni, Cu, Co contents in the rocks of the nickel-bearing complex exceed the crustal clarks by 1.5–3 times. The massive block in the area of the watershed of the rivers Кихчик and Pravaya Kikhchinskaya has the largest resources (million tons): Ni — 1.71, Cu — 0.80, Co — 0.51. The obtained estimates of the metallogenic resource of the lower level chamber are the minimum possible ones.

Keywords: metallogenic resource, nickel, intrusion, modeling.