

Воксельная (объемная) модель плотности и прогнозирование никеленосных интрузий в Дукукском рудном районе (Срединный массив, Камчатка)

Исследована северная часть Дукукского рудного никеленосного района Камчатского срединно-метаморфического массива. Проведена интерпретация аномалий силы тяжести, построена трехмерная плотностная модель земной коры. В модели выделены плотные блоки, содержащие интрузии базитового состава. Интрузии могут служить рудогенерирующими магматическими системами. Скрытые интрузии выявляются по локальным максимумам аномалий Буге. Определены глубина залегания и форма предполагаемых неэродированных интрузий. Для поисков медно-никелевых руд выделены перспективные площади в верхнем течении рек Пымта, Сунтук, Левая и Правая Коль и в среднем течении рек Немтик и Лунтос.

Ключевые слова: *плотность, модель, аномалия, интрузия, Срединный массив, никель.*

M. D. SIDOROV (RGC FEB RAS)

Density model and forecasting of nickeliferous intrusions in Dukuk ore region (Median massif, Kamchatka)

The northern part of Dukuk ore nickeliferous region of the Kamchatka median metamorphic massif was studied. The interpretation of gravity anomalies was carried out; three-dimensional density model of the Earth crust was made. Solid blocks containing the intrusions of basic composition were selected in the model. Intrusions can be ore parent magmatic systems. Hidden intrusions are determined by local maxima of Bouguer anomalies. Cover depth and form of the supposed non-eroded intrusions were determined. Areas promising for the search of copper-nickel ores were selected: in the upper reaches of the rivers Pymta, Suntut, Left, and Right Kol' and in the middle reaches of the rivers Nemtik and Luntos.

Keywords: *density, model, anomaly, intrusion, Median massif, nickel.*

Введение. Металлогеническими исследованиями в южной части Срединного хребта Камчатки выделена никеленосная провинция с прогнозируемым ресурсным потенциалом более 1 млн т [12]. Провинция определена в границах Срединного метаморфического массива, который состоит из протерозойских метаморфических серий в ядре и обрамляющих их сланцевых терригенных и вулканогенных отложений палеозой-мезозойского возраста. Единого мнения о возрасте, структуре и происхождении массива не существует, различные точки зрения изложены в многочисленных публикациях. Сульфидное медно-никелевое оруденение генетически связано с интрузиями дукукского габронорит-кортландитового плутонического комплекса. Единственное в провинции месторождение Шануч относится к типу регенерированных месторождений, сформированных в процессе магматического и гидротермального переотложения рудного вещества [2], которое выделилось в промежуточных магматических камерах и каналах проводниках. Промышленные руды приурочены к небольшим интрузиям-апофизам крупных массивов в их надинтрузивной и экзоконтактовых частях. Для металлогении никеля важно то, что со структурой Срединного массива пространственно ассоциируют интрузии никеленосного комплекса. Породы комплекса имеют характерные петрофизические

свойства, что позволяет отличать их от других похожих магматических образований по аномалиям крупно- и среднемасштабных гравимагнитных съемок [5, 8]. Установлены геофизические критерии выявления неэродированных интрузий комплекса. Применение этих критериев дало возможность определить новые перспективные участки для поисков сульфидных никелевых руд на севере (Шанучский рудный район) и в центральной части (бассейн р. Колпакова) провинции [6, 7]. На юге провинции, в северной части Дукукского района, по тем же критериям прогнозируются интрузии никеленосного комплекса, не выходящие на поверхность в бассейнах рек Коль, Сунтук, Пымта, Немтик и Лунтос. На этих участках возможно наличие на небольших глубинах рудогенерирующих магматических систем, подобных месторождению Шануч. Данная работа посвящена изучению глубинного строения этой части района и определению пространственных параметров прогнозируемых объектов. Создан воксельный 3D массив плотности исследуемого участка земной коры для выявления целевых плотностных неоднородностей и их объемной визуализации.

Геологическая характеристика. Дукукский никеленосный район расположен на южной окраине Камчатской никеленосной провинции [12]

и охватывает площадь около 2000 км². В структурном плане ему соответствует краевая часть Камчатского срединного массива с двумя гранито-гнейсовыми куполами — Пымтинским и Лунтосским [1]. Центральные части гранито-гнейсовых куполов (рис. 1) состоят из тектонических блоков пород *колпаковской метаморфической серии*, представленной *метаформацией слюдяных плагиогнейсов*. Блоки пронизаны многочисленными разновозрастными интрузиями различного состава, сложенные в разной степени мигматизированными плагио-гранито-гнейсами, реже амфиболитами. Подстилающие метаформацию образования не известны. Возраст протолита колпаковской метаморфической серии датируется как позднпротерозойской, возраст метаморфизма как раннемеловой [1].

Обрамлением ядерной части гранито-гнейсовых куполов служат метаморфические образования *камчатской метаморфической серии*, представленной *метаформацией высокоглинозёмистых кристаллических сланцев*, которые перекрывают в форме тектонических чешуй колпаковскую серию. Характерными типами пород камчатской серии являются высокоглинозёмистые кристаллические сланцы и микрогнейсы. Мощность образований метаформации кристаллических сланцев около 1700 м. Протолит камчатской метаморфической серии датируется поздним протерозоем, метаморфизм — ранним мелом [1].

Хейванская свита слагает юго-западную часть района и отдельные тектонические блоки на восточных отрогах Срединного хребта в бассейнах рек Лунтос, Немтик, Пеница, Дукук. Имеет тектонические границы с подстилающими породами камчатской метаморфической серии. Терригенные породы свиты метаморфизованы в зеленосланцевой фации а незначительная часть в эпидот-амфиболитовой фации регионального метаморфизма. Мощность свиты 2300 м, возраст определяется как ранне-позднемеловой [1].

Алисторская свита поздне-мелового возраста слагает тектонические пластины в восточной и северо-западных частях района, представлена покровными образованиями алисторского вулканического комплекса: туфами и лавами метапикробазальтов, превращённых в сланцы. Контакты с ниже- и вышележащими породами хейванской и хозгонской свит тектонические. Мощность около 600 м [1].

Поздне-меловые терригенные, преимущественно алевро-песчаные отложения *хозгонской свиты* развиты на западном, юго-западном и юго-восточном обрамлении Срединного массива. Мощность свиты 1400 м. В среднем течении рек Коль, Пымта и Кихчик распространены песчаники *кунунской свиты* мощностью до 1500 м.

Вулканогенно-кремнистые отложения поздне-меловой *ирунейской свиты* на крайнем юго-востоке района тянутся узкой полосой по бортам р. Быстрая. Свита представлена туфами, туффитами, кремнистыми сланцами. С хозгонской свитой граница тектоническая, мощность отложений около 700 м.

Палеогеновые образования распространены в предгорьях и на западных склонах Срединного хребта на северо-западной окраине района. Представлены вулканическими покровными (до 1200 м) и субвулканическими образованиями *черепановского дацит-андезитового вулканического комплекса*, развитыми в бассейне р. Коль, а также осадочными породами (песчаники, туффиты) *утхолоской*

свиты, мощность которой в предгорьях Срединного хребта не превышает 200 м.

На юго- и северо-западе района очень незначительно развиты неогеновые осадочные (песчаники, алевролиты, аргиллиты) породы *ильинской, какертской, этолонской и эрмановской свит*. Мощность этих отложений 200–400 м.

В восточной части района со стратиграфическим несогласием залегают на всех меловых свитах, породах камчатской метаморфической серии, ранне- и поздне-меловых гранитоидах вулканические *кимитинского андезитового комплекса*. Покровные образования распространены на правом склоне долины р. Быстрая в среднем и верхнем течении рек Немтик, Лунтос, Кагнисин. Общая мощность покровных образований комплекса 1500 м.

В долинах рек распространены *рыхлые* четвертичные отложения различного генезиса, мощность не превышает первых десятков метров, а долине р. Быстрая до 100 м.

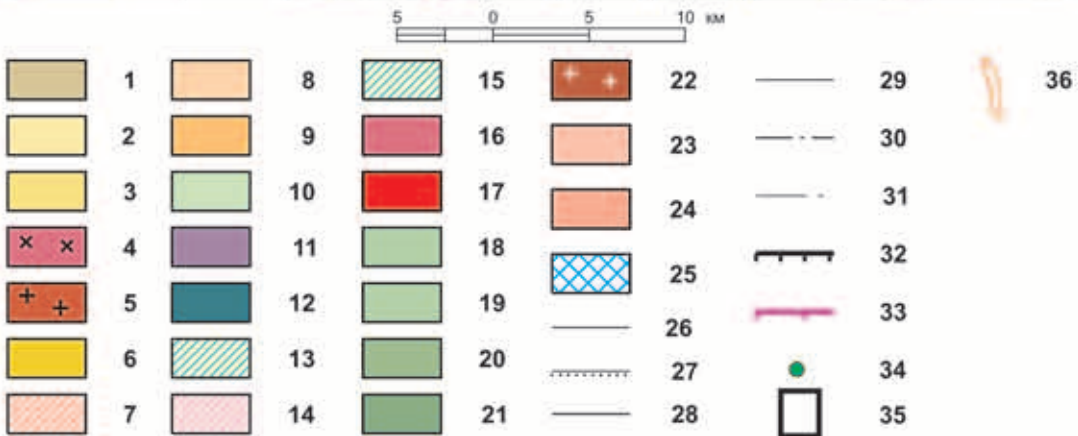
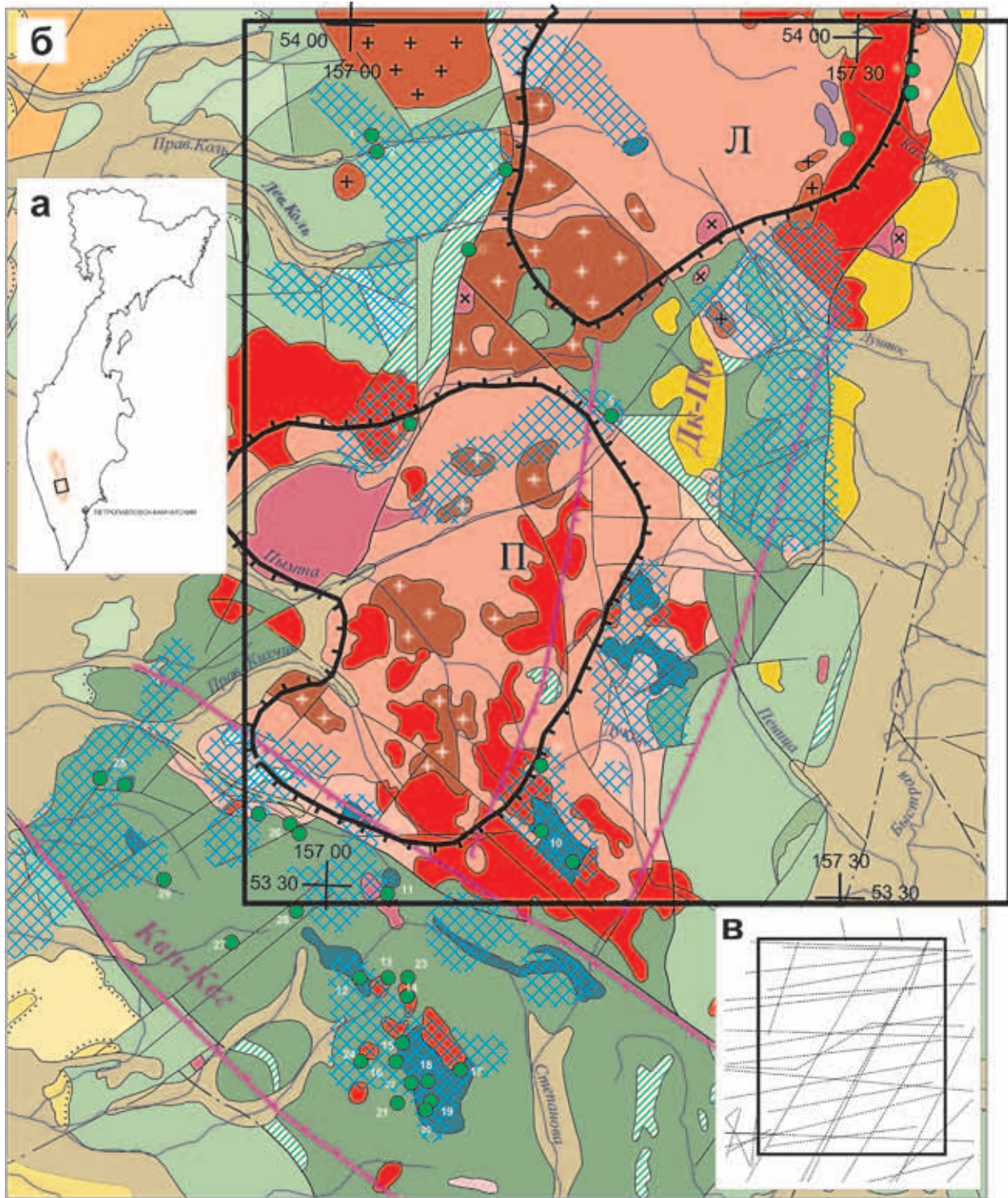
В современном эрозионном срезе примерно пятую часть площади района занимают различные интрузии.

Раннемеловые интрузивные образования представлены *крутогорским гнейсоплагиогранитовым комплексом* в истоках рек Прав. Коль и Сунтук, в верховьях рек Пымта, Прав. Кихчик и Дукук, в центральной части Пымтинского гранито-гнейсового купола. Гнейсогранитоиды комплекса возникли в результате ультраметаморфизма и гранитизации пород колпаковской серии.

Ранне-поздне-меловые субвулканические интрузии *алисторского пикрит-базальтового вулканического комплекса* расположены в долинах рек Прав. и Лев. Коль, на водоразделе рек Пымта, Прав. Лунтос, Немтик. Небольшие силлы, штоки, субпластовые тела, дайки находятся в долинах рек Сунтук, Прав. Кихчик, Прав. Дукук, в междуречье Немтика и Пеницы. Эти интрузии приурочены к зонам повышенной проницаемости вдоль глубинных разломов.

Кольский комплекс плагиогранит-гранодиоритовый поздне-мелового возраста, развит в центральной части Пымтинского и в восточном обрамлении Лунтосского гранито-гнейсовых куполов. Интрузии комплекса многофазные, сложенные породами от кварцевых диоритов до плагиогранитов.

Поздний мел-палеоценовые интрузии в районе представлены *дукукским габбро-норит-кортландитовым плутоническим комплексом*, несущим сульфидную кобальт-медно-никелевую минерализацию. Комплекс объединяет несколько сложных, относительно крупных (до 30 км²) и более 30 мелких интрузий на южном и юго-восточном флангах Срединного массива в верховьях рек Степанова, Лев. Порожистый, Квинум, Прав. Кихчик, Дукук, Пымта, Немтик. Генетическая связь всех рудных тел с интрузивными образованиями дукукского комплекса позволяет относить их к потенциально перспективным объектам [1]. Распространенные формы интрузий — штоки, лополиты, субпластовые тела. Малые интрузии сложены габбро, куртландитами, горнблендитами. Крупные интрузивы — Кувалорогский, Дукукский, Пеницкий и Кагнисинский — состоят из габбро, куртландитов, габброноритов, норитов, диоритов с очевидным преобладанием габбро, их особенность — расчлененность и рост основности пород к подошве тела. Малые интрузии — апофизы крупных



массивов [10]. Дукукский интрузив петротипический, расположен в южной части Пымтинского гранито-гнейсового купола, а на его восточном краю находятся Пеницкий и Кагнисинский массивы. Эти интрузии и ряд малых тел в бассейне рек Итудумиц и Кагнисин составляют субмеридиональную Дукукско-Пеницкую никеленосную зону.

Наиболее крупный Кувалорогский массив вместе с окружающими его малыми интрузиями в междуречье Квинум – Мокушка – Степанова образуют Квинум-Кувалорогскую никеленосную зону северо-западного простираения на южном окончании Срединного массива. Датировки абсолютного возраста дукукского комплекса различными методами как на севере, так и на юге Срединного массива дают возраст в интервале от позднего мела до эоцена [1, 9, 11].

Еще один поздний мел-палеогеновый *лево-андриановский* плутонический комплекс представлен интрузиями дунит-клинопироксенит-монцонитового состава. Это зональные ультрамафитовые тела с дунитовым ядром. Крупные массивы этого комплекса развиты к северу от Дукукского района в восточной и центральной частях Срединного массива.

В северо-западной части района, в бассейне р. Коль, имеют место сложные интрузии *лавкинского комплекса гранодиоритового*. В составе крупных (до 35 км²) тел неправильной формы преобладают гранодиориты, реже диориты и граниты. Дайки и мелкие штоки сложены диорит-порфиридами. Абсолютный возраст гранодиоритов 13–15 млн лет, что свидетельствует о средне-позднемиоценовом времени становления интрузивов комплекса.

Рудопроявления никеля в Дукукском рудном районе группируются в две никеленосные зоны – Квинум-Кувалорогскую и Дукукско-Пеницкую, сформированные вдоль глубинных разломов, ограничивающих Срединный массив. Никелевое оруденение пространственно и генетически связано с интрузиями дукукского комплекса, сконцентрировано в трех рудных полях – Кувалорогском, Квинумском и Дукукском. Прогнозные ресурсы никеля кат. Р₂ дукукской группы проявлений составляют 100 тыс. т. Прогнозные ресурсы никеля проявлений Квинум-Кувалорогской группы предполагаются в размере 476 тыс. т [1]. Территории этих рудных полей исследованы геолого-геофизическими методами, результаты изложены в многочисленных публикациях, а промышленной оценкой рудопроявлений занимается горнорудная компания.

Кроме того, в бассейнах рек Коль, Пымта, Сунтук никелевая минерализация отмечается в зонах разломов и в метапикритах алисторского комплекса. Выходов на дневную поверхность интрузий Дукукского никеленосного комплекса не установлено, но гравимагнитные данные позволяют предполагать здесь крупные интрузии никеленосного комплекса на глубине от 0,5 до 5 км, что в свою очередь дает основание прогнозировать рудное поле. Краткая характеристика известных здесь никелевых рудопроявлений приведена в таблице.

Петрофизическая характеристика. Анализ и обобщение сведений о плотностных и магнитных свойствах горных пород района позволяют разделить их на несколько петрофизические группы. Они широко распространены, слагают геологические тела

Рис. 1. Местоположение (а), геологическая карта (б) и схема опорных разрезов (в) северной части Дукукского рудного района (использована геологическая основа карты полезных ископаемых Камчатской области 1 : 500 000, 1999, с упрощениями и дополнениями)

1 – четвертичная система, неоплейстоцен. Аллювиальные, пролювиальные, озерно-болотные, ледниковые межфазовые отложения. Валуны, галечники, пески, торф, щебень, дресва, супеси; 2 – неогеновая система, плиоцен. Группа вулканических комплексов. Покровные фации. Андезибазальты, андезиты, базальты, туфы, игнимбриты дацитов, туффиты; 3–7 – неогеновая система, миоцен. Эрмановская, этолонская, какертская, ильинская свиты. Песчаники, конгломераты, туфопесчаники, алевролиты, угли, пески, глины, лигниты, угли (3); лавкинский комплекс гранодиоритовый. Интрузии диоритов, диорит-порфиридов, кварцевых диоритов (4); интрузии гранодиоритов, кварцевых диоритов, гранитов (5); группа вулканических комплексов. Покровные фации. Андезиты, дациты, андезибазальты, базальты их туфы (6); субвулканические фации. Дациты, трахиты, трахиандезиты (7); 8, 9 – палеогеновая система, олигоцен. Утхолокская свита. Аргиллиты, конгломераты, песчаники, туффиты, гравелиты, туфопесчаники (8); группа вулканических комплексов. Покровные фации. Андезиты, дациты, риолиты, базальты их туфы, туффиты, туфоалевролиты (9); 10 – меловая система, поздний мел – палеоцен. Кунунская свита. Песчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты, гравелиты; 11, 12 – меловая система, поздний мел – палеогеновая система, эоцен. Дукукский габбро-норит-кортландитовый плутонический комплекс. Интрузии коротландитов, метакортландитов (11); интрузии габброноритов, габбро, диоритов, горнблендитов (12); 13–20 – меловая система. Поздний мел. Субвулканические фации. Андезиты, диоритовые порфириды (13); диорит-порфириды (14); метапикродолериты, метадолериты (15); кольский комплекс плагиогранит-гранодиоритовый. Интрузии диоритов, кварцевых диоритов, гранодиоритов, тоналитов, плагиогранитов (16); интрузии гранитов, гранодиоритов, плагиогранитов, тоналитов, гранитов, кварцевых диоритов (17); ирунейская свита. Кремнистые, кремнисто-глинистые, туфокремнистые породы, туффиты, андезиты, андезибазальты, базальты их туфы (18); хозгонская свита. Глинистые сланцы, песчаники, алевролиты, гравелиты (19); алисторская свита. Туфы и лавы метапикробазальтов, метапикритов, метабазаальтов (20); 21 – меловая система, ранний – поздний мел. Хейванская свита. Филлиты, метапесчаники, метаалевролиты, кварц-альбит-хлоритовые, хлорит-эпидот-актинолитовые сланцы с гранатом; 22 – меловая система, ранний мел. Крутогоровский гнейсоплагиогранитовый комплекс. Интрузии гнейсоплагиогранитов, гнейсогранодиоритов; 23, 24 – поздний протерозой. Камчатская метаморфическая серия. Биотитовые, ставролит-гранат-биотитовые, андалузит-гранат-биотитовые кристаллические сланцы, микроплагиогнейсы, амфиболиты (23); Колпаковская метаморфическая серия. Плагиогнейсы, мигматиты, амфиболиты, амфиболовые плагиогнейсы (24); 25 – перспективные локальные максимумы $\Delta g_{\text{ост}}$; 26, 27 – геологические границы между разновозрастными образованиями согласного (26), несогласного (27) залегания; 28–31 – разрывные нарушения главные: достоверные (28), главные, скрытые под вышележащими отложениями (29), прочие разломы: достоверные (30), скрытые под вышележащими отложениями (31); 32 – границы гранито-гнейсовых куполов (П – Пымтинский, Л – Лунтосский); 33 – границы никеленосных зон (Квн-Квг – Квинум-Кувалорогская, Дк-Пн – Дукукско-Пеницкая); 34 – проявления и пункты минерализации никеля. Кольская группа: р. Прав. Коль (0), Нижний (1), Перевальный (2), руч. Иркус (3); группа Сунтук-Пымта (4,5); группа Кагнисин (6, 7, 8); группа Дукук (9, 10); группа Кувалорог: Ясное (11), Коба (12), Северное (13), Обвальный (14), Аннабергитовая Шель (15), Снежное (16), Кувалорог (17), Цирковое (18), Россоха (19), Надежда (20), Олень (21), Нижнемедвежье (22), Гранатовый (23), Медвежий Мыс (24); квинум-тундровая группа: Тундровое (25), Квинум I, II (26), Пуконка (27), Кортландитовое (28), Хихку (29); 35 – контур исследованного участка; 36 – контур Срединного массива

Рудопроявления никеля в северо-западной части Дукукского рудного района (рис. 1)

Название, привязка	Пункты минерализации, характеристика
Кольская группа	
Левый приток р. Лев. Коль	Зона прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации мощностью 11,5 м, приуроченная к тектоническому нарушению. Содержание меди до 1,0, никеля до 0,1 %
Ручей Нижний	Тонкая вкрапленность и нитевидные прожилки сульфидов в гидротермально измененных metabазальтах алисторского комплекса. В пределах сульфидизированных пород содержание никеля 0,3, меди 0,03, кобальта 0,02 %
Ручей Иргус	Тонкая вкрапленность и нитевидные прожилки сульфидов выявлены в измененных базальтах. Содержание никеля 0,3, меди 0,03, кобальта 0,02 %
Перевальный	Мелкая вкрапленность и маломощные прожилки сульфидов в зоне измененных раздробленных и катаклазированных пород кварц-хлорит-карбонатного состава, интродуцированных долеритами. Зона сульфидизации тянется на 550 м, мощность 200–300 м. Содержание никеля 0,5, меди 0,03, кобальта 0,02 %
Группа Сунтук–Пымта	
Река Сунтук	Мелкая вкрапленность пирротина, пентландита и халькопирита установлена в зоне экзоконтакта крупных останцов-ксенолитов метапикродолеритов в гранитоидах. Площадь оруденения $1,5 \times 0,2$ км. Содержание никеля до 0,2, кобальта до 0,01, хрома 0,2, ванадия 0,015 %
Верховья р. Пымта	Сульфидная медно-никелевая минерализация приурочена к приразломным зонам гидротермалитов в метапикродолеритах. Содержание никеля 0,5, меди 0,09, кобальта 0,002 %. Площадь оруденелых пород 0,5 км ²

значительного объема в верхней части земной коры и оказывают существенное влияние на аномальные геофизические поля [8].

Группа 1. Немагнитные и относительно малоплотные породы: ρ до 100×10^{-5} СИ, $\sigma = 2,57–2,65$ г/см³. Гнейсы, гранитогнейсы, мигматиты колпаковской и камчатской метаморфических серий, а также граниты крутогорского и кольского комплексов.

Группа 2. Немагнитные и слабомагнитные породы со средней плотностью: ρ десятки – первые сотни в 10^{-5} СИ, $\sigma = 2,66–2,80$ г/см³. Породы хейванской, хозгонской свит, кристаллические сланцы камчатской серии.

Группа 3. Магнитные породы средней плотности: $\rho = 1000–3000 \times 10^{-5}$ СИ, $\sigma = 2,66–2,80$ г/см³. Вулканогенные отложения ирунейской свиты, породы интрузий лавкинского комплекса, а также кайнозойские вулканы среднего, среднеосновного состава.

Группа 4. Немагнитные и слабомагнитные породы высокой плотности – σ свыше 2,85 г/см³. Интрузии дукукского плутонического, субвулканического тела и покровы алисторского вулканического комплексов.

Группа 5. Магнитные и сильномагнитные породы высокой плотности: ρ до 3000 и более в 10^{-5} СИ, σ свыше 2,85 г/см³. Породы левоандриановского плутонического комплекса.

Для пород дукукского никеленосного комплекса (группа 4) типична высокая плотность при низких магнитных свойствах. Благодаря этому интрузии, расположенные в самой верхней части земной коры, отчетливо проявлены в локальной компоненте поля силы тяжести относительно максимумами, а в магнитном поле отражения не имеют. Эта особенность служит поисковым критерием [5].

Положение Дукукского района в структуре региона по геофизическим данным. Площадь Дукукского района исследована гравиметрическими и аэромагнитными съемками масштабов 1:50 000 и 1:200 000. Материалы съемок обобщены при создании геофизической основы для Гостеолкарты-1000 в виде электронной базы данных и использованы для интерпретации геофизических аномалий.

Дукукский район расположен в южной части Срединного массива. В аномальном поле силы тяжести в редукции Буге массив выражается областью отрицательных значений, которая по сложным гравиметрическим ступеням субмеридионального простирания граничит с аномальными зонами положительного поля с востока и запада от него. С юга массив также ограничен сложной гравиметрической ступенью северо-западного простирания. Ширина ступеней до 15 км. Для ступеней характерна высокая изменчивость горизонтальных градиентов, что свидетельствует о большой неоднородности в распределении масс. Ступени указывают на участки деструкции земной коры – глубокие зоны повышенной проницаемости, возможные магмоводы. Наиболее низкая интенсивность аномалий наблюдается над выходами гранитов, гранито-гнейсов и гнейсов в ядрах гранито-гнейсовых куполов [8]. В морфологии поля Δg срединного массива выделяются небольшие (10–70 км²) контрастные относительно небольшие локальные максимумы амплитудой 2–8 мГал (здесь и далее величина аномалий приводится в условном уровне). Максимумы расположены группами, окаймляющими гранито-гнейсовые купола и в виде цепочек по краям массива. В Дукукском районе такие локальные максимумы наблюдаются на северо-западном и восточном флангах (рис. 2, а) в интервале от р. Пымта до р. Прав. Коль и по правому борту р. Быстрая.

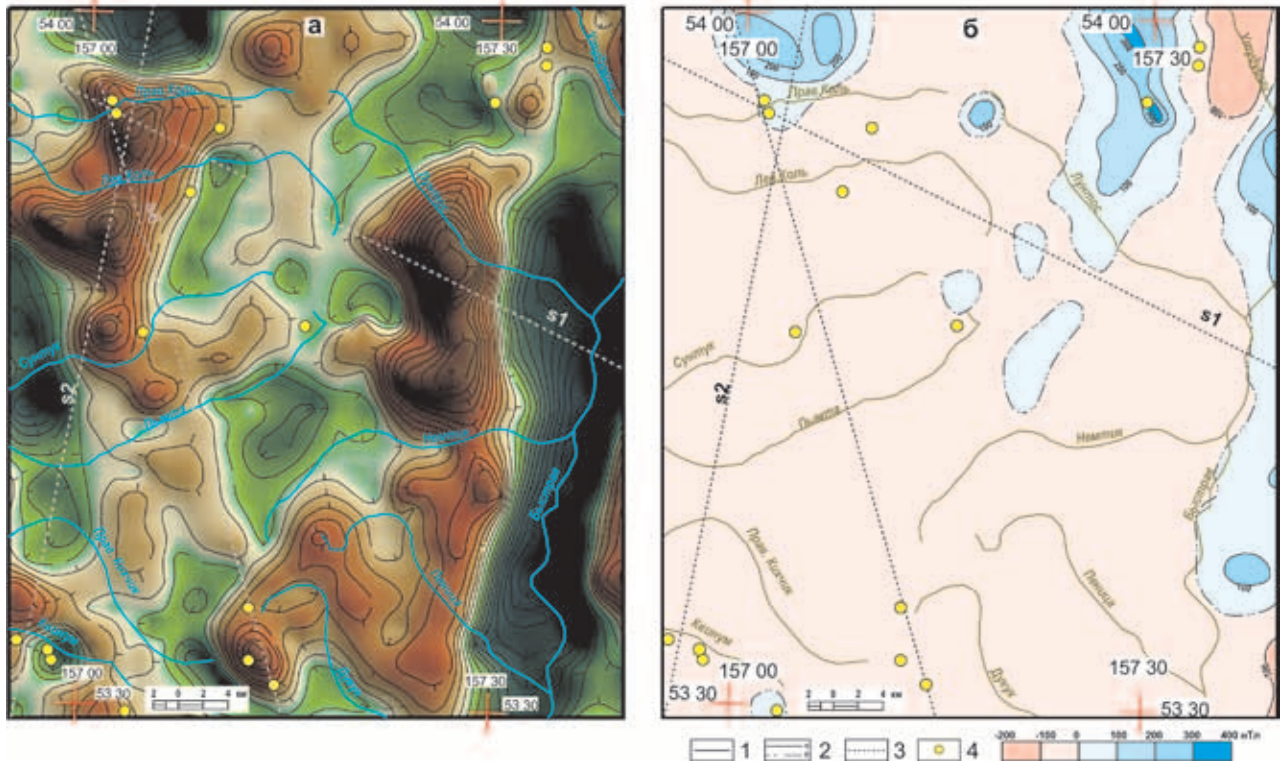


Рис. 2. Схема морфологии локальной составляющей аномалий Буге (а), карта аномального магнитного поля (б) северной части Дукукского рудного района

1 – изоаномалы силы тяжести, бергштрихи направлены в сторону уменьшения поля; 2 – изоаномалы магнитного поля: отрицательные и положительные (а), нулевые (б); 3 – интерпретационные профили; 4 – проявления и пункты минерализации никеля

Южная часть района – цепочка сложных максимумов, ориентированная на северо-запад. Предполагается, что большинство локальных максимумов связано с интрузиями базит-ультрабазитового состава, избыточная плотность которых к плотности вмещающих пород составляет 0,2–0,5 г/см³ [8].

В большинстве своем горные породы, слагающие метаморфический массив, относятся к группе слабомагнитных и немагнитных [8]. Эта особенность выражается в виде плавного около нулевого поля (ΔT)_а (рис. 2, б). На этом фоне контрастными положительными аномалиями отмечаются интрузии среднего, основного и ультраосновного состава, а также кайнозойские вулканы. Интенсивные аномалии более 1000 нТл наблюдаются над интрузиями левоандриановского дунит-клинопироксенит-монценитового комплекса. Крупные интрузии лавкинского гранодиоритового комплекса отмечаются положительными аномалиями 200–500 нТл и более. Интрузии крутогоровского гнейсо-плагиогранитового и кольского плагиогранит-гранодиоритового комплексов отражения в магнитном поле не находят. Исключения составляют лишь небольшие тела диоритов в южной части срединного массива, где над ними наблюдаются слабые положительные аномалии не более 150 нТл. Породы, слагающие интрузии никеленосного дукукского габбро-кортландитового комплекса, слабомагнитны, заметных аномальных эффектов не создают и в аномалиях магнитного поля не выражены. Эта особенность отличает их от базитов других комплексов, распространенных на территории Срединного массива.

Район пересечен с запада на восток профилем МОВЗ [3], который проходит по долине р. Пымта до нижнего течения рек Лунтос и Быстрая с разрывом в районе Срединного хребта. Величина пропущенного интервала около 20 км. На флангах Срединного массива и за его пределами трассируются цепочки из точек обмена, которые отождествляются с границами внутри коры. Граница М устанавливается фрагментарно на глубине 33–34 км, граница между нижней и верхней корой (К2) на глубине 20–25 км.

Сопоставление карт гравитационного и магнитного полей с выходами никеленосных интрузий позволило установить критерии их выявления по гравимагнитным данным. Перспективные участки – локальные максимумы поля силы тяжести и локальные ступени на их границах при отсутствии четко выраженных аномалий магнитного поля и расположения максимумов Δg в региональных зонах горизонтальных градиентов силы тяжести [5, 8]. Область применения критериев – Срединный метаморфический массив. На территории Дукукского района этим критериям отвечают аномалии Δg в Квинум-Кувалорогской и Дукукско-Пеницкой никеленосных зонах (рис. 1). Наиболее контрастные и интенсивные максимумы соответствуют крупным интрузивным массивам – Дукукскому, Пеницкому и Кувалорогскому [9]. Кроме этих аномалий выделяется группа максимумов, расположенных в северо-западной части района в междуречье Пымта – Сунтук – Лев. и Прав. Коль (рис. 2, а). Максимумы тянутся дугообразной цепочкой между Пымтинским и Лунтосским

гранито-гнейсовыми куполами на западной окраине Срединного массива. Эти аномалии полностью соответствуют вышеуказанным критериям, поэтому здесь можно прогнозировать крупные неэродированные массивные магматические тела. В восточной части района критериям соответствует линейный с двумя экстремумами максимум в среднем течении рек Немтик и Лунтос.

Методы исследований. Породы никеленосного магматического комплекса повышенно-плотные по отношению к вмещающей среде. Для выявления и определения пространственных параметров массивных тел в верхней коре северной части Дукукского района построена воксельная 3D модель плотности. Модель состоит из кубических ячеек с минимальным размером $500 \times 500 \times 500$ м. Объемное представление получено по совокупности плотностных моделей глубинных разрезов, рассчитанных по сети профилей. Изображение плотности геосреды в виде воксельной модели дает возможность прогнозировать массивные интрузии, не выходящие на поверхность, определять их форму, строить разрезы и срезы.

Метод базируется на результатах интерпретации аномального поля силы тяжести в комплексе с данными глубинной сейсморазведки и геологических исследований поверхности.

Плотностное моделирование делится на два основных этапа: 2D моделирование отдельных глубинных геолого-геофизическим разрезов и формирование совокупного объемного представления распределения плотности на исследуемом участке в виде воксельной 3D модели. Вначале были составлены глубинные разрезы по сети профилей, пересекающих исследуемый блок коры (рис. 1, в). На каждом профиле по геологической карте построен разрез приповерхностной части профиля. Границы геологических тел на разрезе аппроксимированы ломаными линиями. Линии образуют контуры сечений горизонтальных бесконечных призм, расположенных перпендикулярно к профилю. Для каждой призмы назначена плотность, типичная для пород того геологического слоя, который она представляет в модели. Тонкие в масштабе модели слои объединены в один с усредненной плотностью. Для призм в узких блоках рельефа (хребты) по простиранию наложено ограничение (3/4D). Призмы, аппроксимирующие блоки интрузий, ограничены по градиентам соответствующих аномалий. Для построения глубинной части разрезов проводилась интерпретация аномалий методами особых точек в профильном и трехмерном вариантах. Метод определения особых точек не требует априорных геологических знаний о возмущающих объектах. Для учета всего диапазона возможных типов возмущающих масс (геологических тел) интерпретация проводилась для различных структурных индексов палетками разного размера. Максимальные глубины, до которых определялись особые точки, — 18–19 км. Глубокие горизонты коры на разрезах представлены в виде обобщенных слоев, по данным МОВЗ [3]. Плотность блоков для нижней коры 2,9–3,0, верхней 2,75–2,85, мантии 3,2–3,3 г/см³. Верхняя часть разрезов прорисовывалась наиболее подробно.

После составления первичных моделей глубинных разрезов вычислялись теоретические аномалии, корректировались геометрия и плотность призм до

совпадения графиков теоретической и практической аномалий с погрешностью 3–5 %.

На конечном этапе для исследованного блока коры сформирована база данных плотности (БДП), которая содержит плановые координаты X, Y, Z точек и модельную плотность D в них. Точки в плоскости разрезов являются узлами квадратной сетки. Размер сетки выбирался в зависимости от детальности (масштаба) подобранных разрезов и его частей и изменялся от 1×1 до $0,2 \times 0,2$ км. Далее была синтезирована трехмерная матрица плотности, которая и визуализируется в виде объемного (воксельного) изображения. Для верхней части коры размеры ребра кубических ячеек, в зависимости от густоты исходных данных, составили 2, 1 и 0,5 км. Всего для матрицы использованы данные по 34 профилям (рис. 1, в). Первой была создана 3D матрица из моделей 16 региональных глубинных разрезов (в том числе два профиля МОВЗ), охватывающих весь Срединный массив. Моделирование на этих профилях проведено с помощью программы PRIMA [4]. Размер элементарной ячейки 4 км. На территории Дукукского района также были смоделированы разрезы по дополнительным профилям, что позволило спустить матрицу до указанных выше размеров. Интерпретация проведена с помощью программ Geosoft (Oasis Montaj, GM-SYS, Euler 3D).

Результаты исследований. На рис. 3 и 5 представлено объемное изображение плотностной модели северной части Дукукского рудного района, а на рис. 4 ее вертикальные сечения. До глубины 15 км в основном плотность коры составляет 2,7–2,8 г/см³. В районе гранито-гнейсовых куполов плотность понижена до 2,55–2,65 г/см³. Вероятно, это связано с преобладанием здесь гранитов и гнейсов в самой верхней части разреза, для которых такая плотность типична. Надо отметить, что максимально низкая плотность в куполах не глубже 1,5 км от уровня моря. Более глубокие горизонты имеют плотность 2,70–2,76 г/см³, что соответствует плотности кристаллических сланцев. В целом в районе куполов относительно пониженная плотность в модели прослеживается до глубины 10–15 км (рис. 4, а, в). На карте локальных (остаточных) аномалий силы тяжести (рис. 2, а) участкам пониженной плотности в плане соответствует группа сложных минимумов амплитудой 2–4 мГал. Минимумы образуют полосу северо-восточного направления шириной 15–18 км. Внутри полосы минимумы между собой разделены положительными слабо-градиентными аномалиями небольшой интенсивности, а по краям контрастными высокоградиентными линейно вытянутыми в том же направлении цепочками максимумов амплитудой до 8–10 мГал. В плотностной модели максимумам соответствуют субвертикальные зоны плотностью свыше 2,8 г/см³ (рис. 4). Эти столбообразные зоны ограничивают участки с пониженной плотностью в центральных частях куполов. В верхней части плотных столбообразных зон в модели локализуются блоки, внутри которых плотность превышает 2,9 г/см³. Можно предположить, что в этих плотных блоках присутствуют интрузии базитов. Так, в районе аномалии в бассейне р. Прав. Коль расположены проявления Нижний и Иргус (рис. 1, 2). Они связаны с телами метабазитов алисторского комплекса. Проявления на притоке рек Лев. Коль и Перевальный

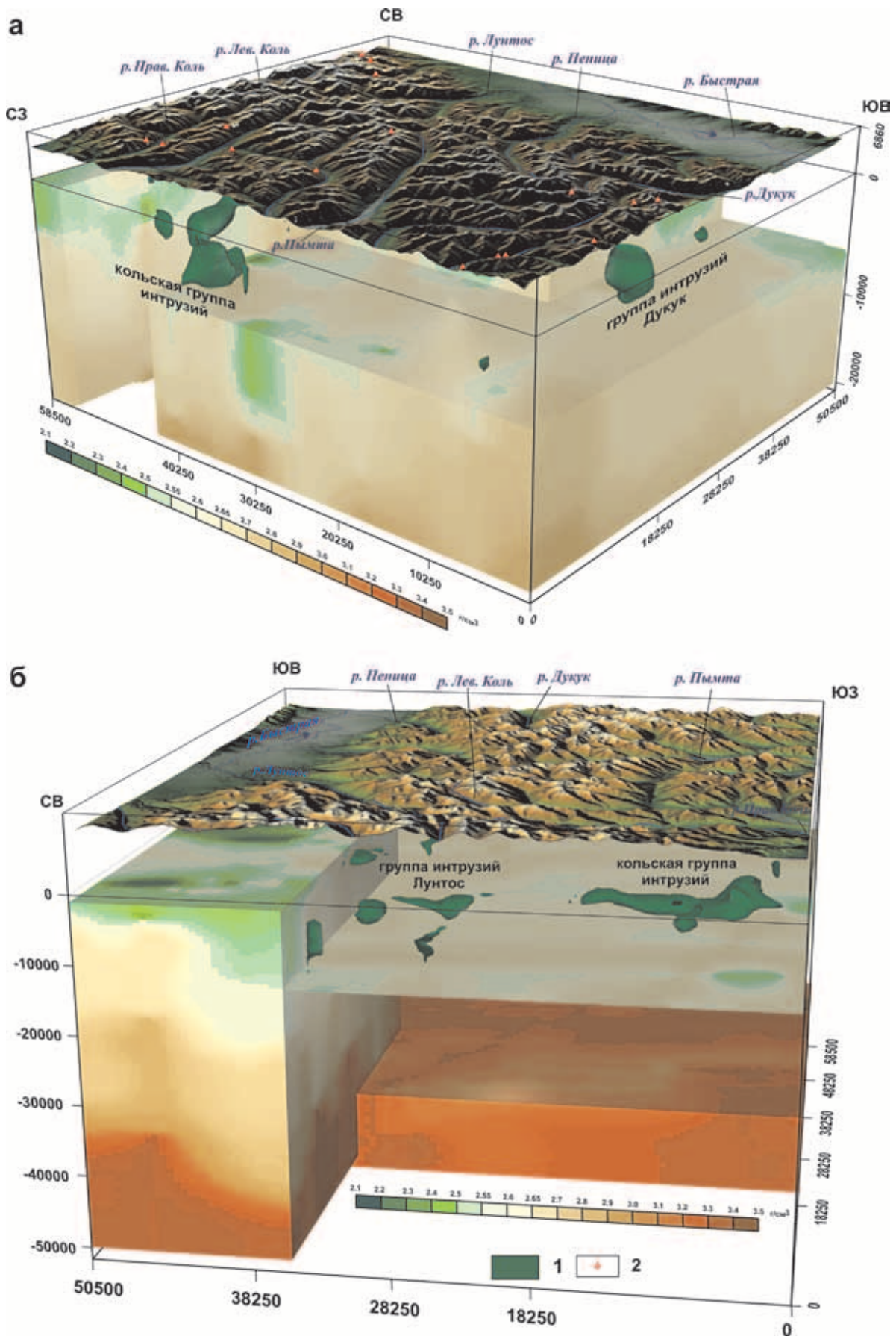


Рис. 3. Воксельная (объемная) плотностная модель земной коры северной части Дукукского рудного района, вид с юго-запада (а), севера (б). Часть ячеек погашена, чтобы показать изоповерхности, масштаб рельефа увеличен в два раза и его поверхность поднята на 3 км

1 – изоповерхность с плотностью 2,9 г/см³; 2 – проявления и пункты минерализации никеля

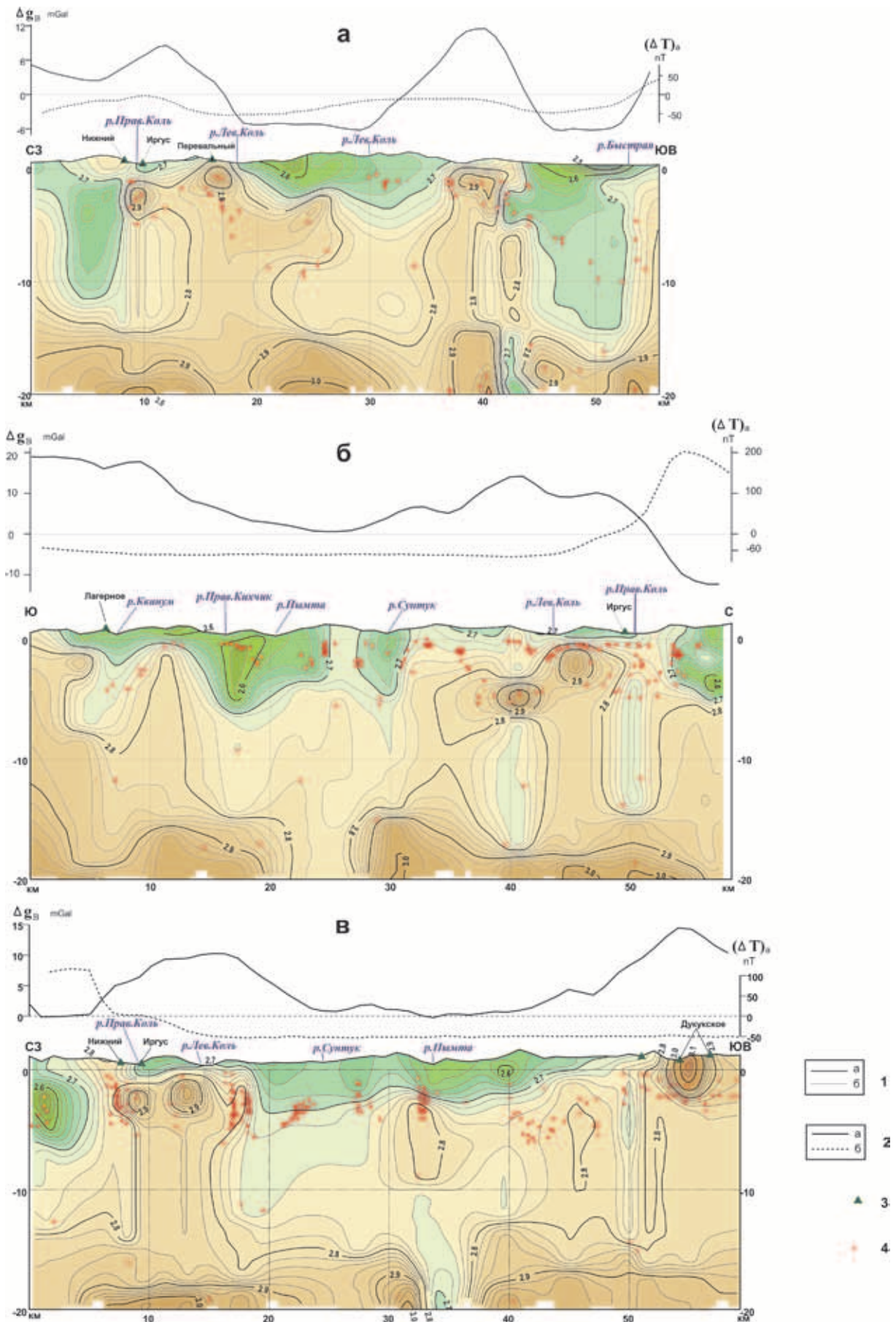


Рис. 4. Вертикальные сечения плотностной модели по линиям s1 (а), s2 (б), s6 (в) (см. рис. 2)

1 – изоденсы основные (а), промежуточные (б); 2 – графики аномалий Буге (а), оцифровка условная и $(\Delta T)_a$ (б); 3 – проявления и пункты минерализации никеля; 4 – проекции особых точек на плоскость разреза в зоне ± 100 м от него

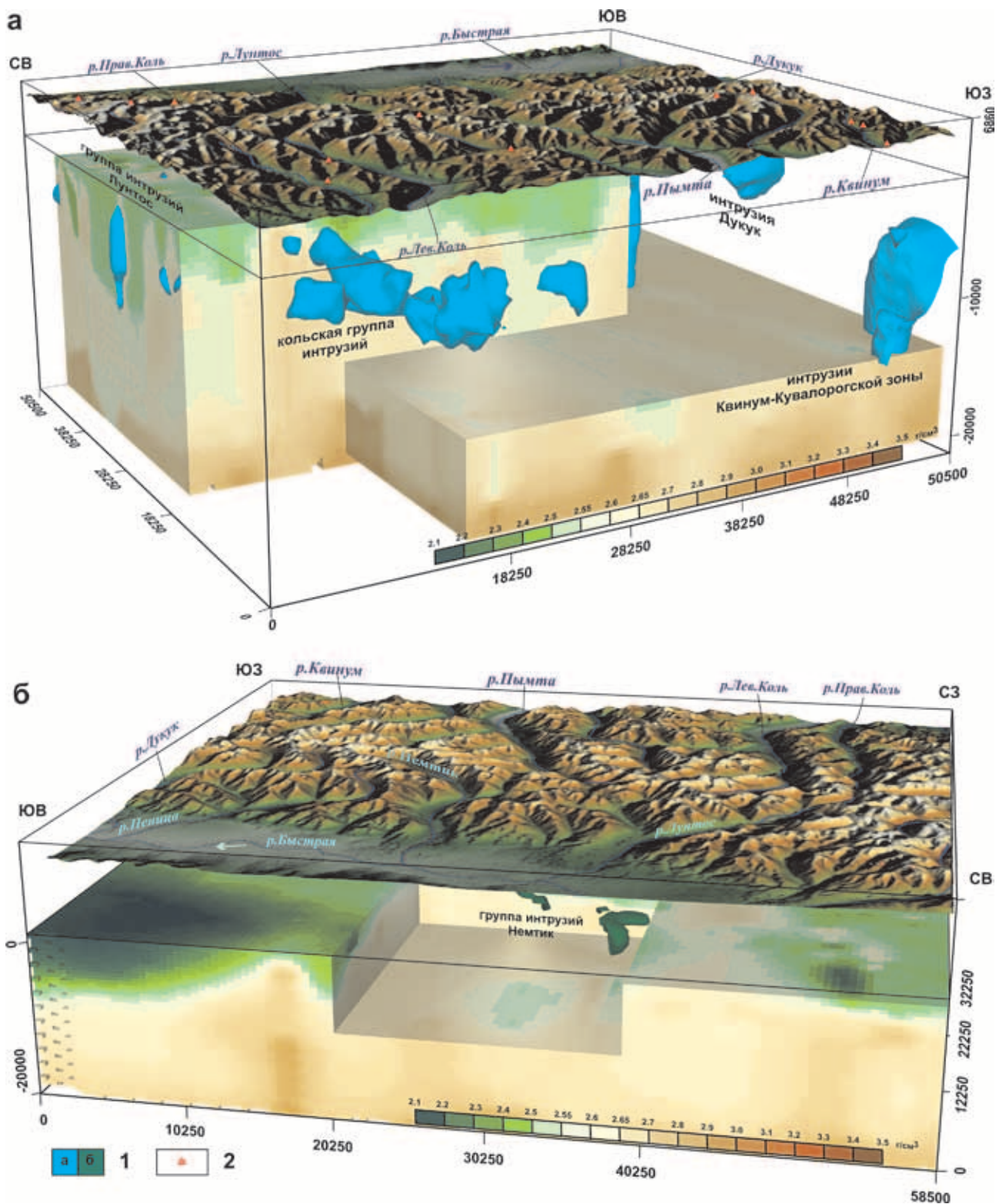


Рис. 5. Воксельная (объемная) плотностная модель земной коры северной части Дукукского рудного района, вид с северо-запада (а), востока (б). Часть ячеек погашена, чтобы показать изоповерхности, масштаб рельефа увеличен в два раза и его поверхность поднята на 3 км. На рис. б вертикальный масштаб в два раза уменьшен

1 – изоповерхности с плотностью 2,85 (а) и 2,9 (б) г/см³; 2 – проявления и пункты минерализации никеля

находятся на краю максимума и связаны с зонами тектонических нарушений. Очевидно, что максимумом Δg отмечается плотная массивная структура в самых верхах коры. Глубина залегания верхних кромок плотных блоков 0,2–3 км ниже уровня моря, а центры тяжести фиксируются по особым точкам на глубинах 2–5 км. На дневной поверхности обнажаются малоплотные терригенные породы хозгонской свиты и отдельные небольшие блоки алисторских метабазитов. Несмотря на высокую плотность последних, их объема недостаточно, чтобы полностью объяснить наблюдаемый максимум. Под толщей осадочных пород расчетная плотность блоков соответствует плотности габбро и габбро-диоритов. Рассматриваемый участок, а также прилегающие к нему с юга максимумы в бассейнах рек Пымта и Сунтук полностью соответствуют изложенным выше геофизическим критериям. Поэтому можно предположить, что выявленные в модели плотные блоки базитов представлены дукукскими интрузиями. Косвенно об этом свидетельствуют линейные и площадные литохимические аномалии никеля на южной окраине гравитационного максимума. Представление о форме и расположении вероятных интрузий базитов дает изоповерхность 2,9 г/см³, выделенная из воксельной модели (рис. 3, 5). На участке в бассейне р. Коль можно предположить два крупных тела. Одно из них между реками Прав. и Лев. Коль в интервале абсолютных глубин от 1 до 3,5 км, второе южнее р. Лев. Коль на глубине от 3,7 до 6 км (рис. 3, 4, б). Между собой эти интрузии связаны проводником, который хорошо виден в изоповерхности 2,85 г/см³ (рис. 5, а). Верхнее интрузивное тело вытянуто в северо-восточном направлении на 8–9 км, примерно до проявления Перевальный (рис. 3, 4, а). Нижняя интрузия по форме близка к изометрической, но осложнена апофизами в апикальной части (рис. 5, а).

Относительно простую изометрическую форму имеет интрузия Дукук (рис. 4, в), массивная часть которой по изоповерхности 2,9 г/см³ прослеживается до глубины 2,5 км. Форма интрузий в верховьях р. Лунтос различная. Это интрузии небольших размеров изометричные или веретенообразные, вытянутые в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 3, б, 5, а).

На восточном фланге, между реками Немтик и Лунтос, с контрастным субмеридиональным линейным максимумом (рис. 2, а) сопоставляются два массивных блока, положение которых отмечено одним из экстремумов аномалии. Верхняя кромка блоков находится на глубине от 0,5 км ниже уровня моря (рис. 4, а). Один из блоков вытянут в вертикальной, второй в горизонтальной плоскости. Блоки соединяются между собой, образуя сложную подковообразную фигуру (рис. 5, б). Максимальные размеры по изоповерхности 2,9 г/см³, толщина от 1 до 2,5 км, протяженность 6 км по простиранию и 4 км в глубину. К юго-западу от этой интрузии находится еще один Г-образный массивный блок размерами 1 × 0,5 км в плане и «корнем» уходящий на глубину до 3,5 км. Над блоком локализован второй экстремум максимума. Рассмотренная аномалия расположена севернее цепочки максимумов, наблюдаемых над Дукукской и Пеницкой интрузиями, и является продолжением перспективной Дукукско-Пеницкой никеленосной зоны.

На северо-востоке района, в бассейне рек Кагниссин и Утудумец, известны три пункта

минерализации никеля. Рудная минерализация связана с небольшими дайкообразными интрузиями горнблендитов. Интрузии расположены в ареале небольшого по площади и интенсивности максимума силы тяжести, с которым коррелируется контрастная аномалия магнитного поля (рис. 1, 2), что дает основание считать, что это интрузии левоандриановского комплекса, крупные массивы которого развиты вдоль восточного края Срединного массива и обнажены севернее рассматриваемой территории. В плотностной модели геофизическим аномалиям соответствует вертикальная штокообразная зона относительно повышенной плотности от 2,85 до 2,9 г/см³ в верхнем течении р. Кагниссин. Размеры плотного блока 3 × 2,5 × 5 км, а верхняя кромка находится на глубине около 1 км ниже уровня моря. Вероятно, это глубинная интрузия базитов, мало мощными апофизами которой являются дайкоподобные тела, обнаженные на поверхности. С такой моделью согласуется и невысокая интенсивность максимума Δg .

Анализ глубинного строения северной части Дукукского рудного района позволяет выделить наиболее перспективные площади, где могут быть обнаружены на доступных глубинах месторождения сульфидных медно-никелевых руд шанучского типа. Первая из площадей соответствует территории, занимаемой локальным максимумом Δg на северо-западе района, между реками Пымта и Прав. Коль (рис. 2, а). Вторая перспективная площадь на восточном фланге, в междуречье Немтик–Лунтос, охватывает расположенный здесь максимум силы тяжести. Особенность этих участков в том, что они находятся в краевой части ядер гранито-гнейсовых куполов, как и интрузии месторождения Шануч на севере Срединного массива. Кроме этих площадей можно отметить два участка внутри куполов – в истоках р. Лунтос и в верхнем течении рек Сунтук и Пымта.

Заключение. По результатам интерпретации аномалий силы тяжести на юге Камчатского срединного метаморфического массива построена трехмерная плотностная модель земной коры. В верхней части коры в модели выделяются плотные блоки с вероятными интрузиями базитового состава. Эти интрузии могут служить рудогенерирующими магматическими системами – глубинная магматическая камера и интрузии-сателлиты в надинтрузивной зоне. По соответствующим локальным максимумам аномалий силы тяжести определены глубина залегания и форма предполагаемых неэродированных интрузий. Выделены площади, перспективные для поисков медно-никелевых руд, на западе района – в верхнем течении рек Пымта, Сунтук, Лев. и Прав. Коль, на востоке – в среднем течении рек Немтик и Лунтос.

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Лист N-57 Петропавловск-Камчатский. Объясн. зап. / Б.И. Сляднев, В.Н. Шаповаленко, Н.Ф. Крикун, А.А. Полетаева, В.К. Ротман, В.И. Сидоренко, Е.Г. Сидоров, С.Н. Суриков, Ш.Г. Хасанов; науч. ред. А.Ф. Литвинов, Б.А. Марковский. – СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2007. – 206 с.

2. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. – М.: Эслан, 2006. – 496 с.

3. Нурмухамедов А.Г. Границы литосферы на Камчатке по данным метода обменных волн землетрясений / А.Г. Нурмухамедов, В.В. Недядько, В.А. Ракитов, М.С. Липатьев // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2016. № 1(29). — С. 35–52.

4. Сидоров М.Д. Картирование мезозойского фундамента Авачинско-Корякской группы вулканов (Камчатка) методом плотностного моделирования // Вулканология и сейсмология. 1994. № 4–5. — С. 99–105.

5. Сидоров М.Д. Геофизические критерии прогнозирования никеленосных интрузий в Камчатском срединном массиве // Чтения памяти академика К.В. Симакова: Тезисы докладов Всерос. конф. (25–27 ноября 2009 г., Магадан). — Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2009. — С. 92–93.

6. Сидоров М.Д. Плотностное моделирование магматических структур в Колпаковском перспективном никеленосном районе (Срединный массив, Камчатка) // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34. № 3. — С. 31–41.

7. 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) // Регион. геология и металлогения. 2016. № 65. — С. 104–115.

8. Сидоров М.Д., Степанов В.А. Геофизические поля и никеленосность Камчатского срединного массива // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2006. № 2(8) — С. 140–150.

9. Трухин Ю.П. Строение и никеленосность Кувалорогского базит-ультрабазитового массива / Ю.П. Трухин, М.Д. Сидоров, В.А. Степанов, В.Е. Кунгурова // Известия вузов. Геология и разведка. 2009. № 6. — С. 78–85.

10. Трухин Ю.П. Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд / Ю.П. Трухин, В.А. Степанов, М.Д. Сидоров, В.Е. Кунгурова // Руды и металлы. 2009. № 5. — С. 75–81.

11. Трухин Ю.П. Шанучское медно-никелевое рудное поле (Камчатка) / Ю.П. Трухин, В.А. Степанов, М.Д. Сидоров, В.Е. Кунгурова // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2011. № 1. — С. 20–26.

12. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д. Камчатская никеленосная провинция // Докл. РАН. 2008. Т. 418. № 6. — С. 802–805.

1. Slyadnev B.I., Shapovalenko V.N., Krikun N.F., Poletayeva A.A., Rotman V.K., Sidorenko V.I., Sidorov Ye.G., Surikov S.N., Khasanov Sh.G. Gosydarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1 : 1 000 000. Izdanie tret'e. List N-57. Petropavlovsk-Kamchatsky. Ob'yasnitelnaya zapiska

[State geological map of Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Sheet N-57. Petropavlovsk-Kamchatsky]. Note explaining. Science editors: A.F. Litvinov, A.B. Markovsky. St-Petersburg: Saint-Petersburg publishing house of cartographical plant of A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute. 2007. 206 p.

2. Lihachev A.P. Platino-medno-nikelevye i platinovye mestorojdeniya [Platinum-copper-nickel and platinum deposits]. Moscow: Aslan. 2006. 496 p.

3. Nurmukhamedov A.G., Nedyadko V.V., Rakitov V.A., Lipatyev M.S. The lithosphere boundaries in Kamchatka based on data on the earthquake converted-wave method. *Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle*. 2016. No 1. Vol. 29. Pp. 35–52. (In Russian).

4. 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).

5. Sidorov M.D. Geophysic criteria forecasting of nickeliferous intrusions in Kamchatka Median massif. *In memory of academician K.V. Simakov: Materials of All-Russian conference. 25–27 November 2009*. Magadan. 2009. Pp. 92–93. (In Russian).

6. Sidorov M.D. Density modeling of magmatic structures in Kolpakov perspective nickeliferous region (Median Massif, Kamchatka). *Tihookeanskaya geologiya*. 2015. Vol. 34. No 3, pp. 31–41. (In Russian).

7. Sidorov M.D., Taskin V.V., Veshnyakov N.A. Density irregularities in upper crust of Shanuch ore district and the problem of detecting unopened nickel intrusion (median massif, Kamchatka). *Region. geologiya i metallogeniya*. 2016. No 65, pp. 104–115. (In Russian).

8. Sidorov M.D., Stepanov V.A. Geophysical fields and nickel content of Sredinny massif, Kamchatka. *Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle*. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2006. Vol. 8. No 2, pp. 140–150. (In Russian).

9. Trukhin Yu.P., Sidorov M.D., Stepanov V.A., Kyngyrova V.E. Construction and nickel content of Kuvalorog basic and ultrabasic massif. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*. 2009. No 6. Pp. 78–85. (In Russian).

10. Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D., Kyngyrova V.E. Shanuch copper-nickel deposit: geological and geophysical model, composition and geochemistry of ores. *Rudy i metally*. 2009. No 5, pp. 75–81. (In Russian).

11. Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D., Kyngyrova V.E. Shanuch Cu-Ni ore field (Kamchatka). *Vestnik SVNC DVO RAN*. 2011. No 1, pp. 20–26. (In Russian).

12. Trukhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D. The Kamchatka Nickel-Bearing Province. *Dokl. Rossiyskoy Akademii nauk*. 2008. Vol. 418. No 6, pp. 802–805. (In Russian).

Сидоров Михаил Дмитриевич — канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН. Северо-Восточное шоссе, 30, а/я 56, Петропавловск-Камчатский, 683002, Россия. <smd52@mail.ru>

Sidorov Michail Dmitrievich — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Research Geotechnological Center FEB RAS. 30 Severo-Vostochnoye shosse, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683002, Russia. <smd52@mail.ru>