

Особенности корреляционной связи петрофизических характеристик пород с распределением геофизических неоднородностей в пределах Мончегорского рудного района (Кольский полуостров, северо-восток Балтийского щита)

В. Т. Филатова, 2021

Геологический институт Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

Поступила 5 мая 2021 г.

Приведены результаты исследований по систематизации полученных данных о физических свойствах горных пород и руд, развитых в Мончегорском рудном районе (Кольский регион). Построенные петроплотностная и петромагнитная карты отражают особенности изменения петрофизических параметров как интрузивных пород, сформировавшихся в палеопротерозое, так и вмещающих пород архейского фундамента района. Для оценки степени комплементарности физических свойств пород и геофизических полей дополнительно выполнен анализ структуры геофизических аномалий (Δg , ΔZ), наблюдаемых в пределах исследуемой территории, что позволило построить схему распределения геофизических неоднородностей района и оценить их характер.

Согласно исследованиям в Мончегорском рудном районе никеленосные и потенциально никеленосные интрузии обладают повышенной плотностью, но сложены слабомагнитными породами. Расслоенность габбро-лабрадоритового массива Главного хребта отражена в петрофизических параметрах: эндоконтрастные габбро и габбро-нориты имеют повышенную плотность и магнитную восприимчивость по сравнению с такими параметрами лейкократовых габбро и лабрадоритов ядерной части интрузива. Таким образом, петрофизические данные указывают на общее увеличение основности пород к придонной части интрузии.

Выявленные несоответствия интенсивных геофизических аномалий и физических параметров приповерхностных пород блока, примыкающего с юго-востока к габбро-лабрадоритовому массиву Главного хребта, указывают на то, что под супракрустальными породами фундамента (комплекс гнейсов и амфиболитов по вулканогенно-осадочным породам) и породами Имандра-Варзуги залегает пласт плотных пород. Он может быть сложен потенциально никеленосными породами Имандровского комплекса с включением интрузий клинопироксенит-верлитового формационного ряда, обнаженных на отдельных участках.

Архейские блоки по характеру конфигурации выявленных осей локальных магнитных аномалий выделяются как обособленные области по однородности создаваемого рисунка: Беломорский — изометричные структуры, Кольский — линейно-протяженные. Следовательно, в период перестройки структурного плана в палеопротерозое архейские блоки реагировали дифференцированно на возникающее напряженно-деформированное состояние среды и подвергались неоднородным деформациям.

Выполненная работа, включающая комплексирование результатов петрофизических исследований с анализом структуры геофизических аномалий в пределах рудного района, актуальна при обосновании стратегии поисков новых рудопроявлений и закономерностей их локализации, а также для разработки критериев прогнозирования промышленных руд в районе. При этом результаты исследований позволяют отвечать на вопросы, связанные с реконструкцией геодинамических обстановок, имевших место при формировании земной коры региона.

Ключевые слова: Мончегорский рудный район, Кольский регион, физические свойства пород, геофизические поля, петрофизические исследования, прогнозирование промышленных руд, численное моделирование.

Введение. На территории Кольского полуострова и сопредельных районов к настоящему времени выявлены месторождения руд многих металлов и неметаллических полезных ископаемых. Минеральные месторождения региона формировались во все металлогенические эпохи. Большая часть из них имеет комплексный характер: руды содержат от двух до шести ценных минералов, которые нередко состоят также из нескольких химических элементов. Особый интерес всегда вызывал особо богатый месторождениями и рудопроявлениями Мончегорский рудный район, главным месторождением которого является Мончегорское месторождение Cu-Ni-руд, приуроченное к Мончеплутону. Месторождение богато платиноидами. Из руд, помимо никеля и меди, извлекают кобальт, золото, селен, серу, хром. Район богат строительными и облицовочными материалами. В настоящее время Мончегорский рудный район имеет достаточно развитую инфраструктуру, что благоприятствует постоянному расширению рудодобывающей и перерабатывающей промышленности района.

Геофизические исследования в районе исследований проводятся в течение нескольких десятилетий. Геофизические данные широко используются на разных стадиях геолого-разведочного процесса. Анализ имеющихся материалов по району показывает, что надежность опробования исследуемых участков не везде является достаточно высокой. Для обеспечения более надежной интерпретации имеющихся геофизических материалов автором выполнены работы по систематизации данных о физических свойствах горных пород и руд геологических образований, развитых в Мончегорском рудном районе. Эти материалы легли в основу составления петроплотностной и петромагнитной карт района исследования. Анализ структуры распределения геофизических аномалий (Δg , ΔZ), наблюдаемых на территории исследований, позволил выявить особенности распределения геофизических неоднородностей района. Комплексование петрофи-

зических исследований с анализом геофизических полей помогает решать многие вопросы в области изучения общей структуры и тектоники района, структурно-картировочных задач и задач поисково-разведочных работ. Особое значение это имеет при выявлении закономерностей локализации медно-никелевого оруденения, разработке комплексных критериев прогнозирования промышленных руд в регионе и разработке прогнозных оценок о составе пород на глубине.

Основные черты геологического строения района. Область исследований расположена в центральной части Кольского полуострова на стыке двух крупных структур архейского возраста — Кольского и Беломорского блоков (участок изгиба Печенгско-Варзугской рифтогенной системы (рис. 1). Сам Кольский полуостров представляет собой глубоко эродированную северо-восточную окраину Балтийского щита. Мончегорский рудный район является районом с наиболее развитым магматизмом, что связано с пересечением этой области долгоживущим меридиональным разломом (рис. 2). В пределах этой зоны разлома проявлен почти весь магматизм палеопротерозойского возраста, известный на Кольском полуострове. Наиболее крупная интрузия района исследований — габбро-лабрадоритовый массив Главного (Габбрового) хребта, в состав которого входят такие структурные элементы как Лосевы тундры, Волчьи тундры, Чуна-тундра, Нярк-тундра и Мончетундровская интрузия. Залегание массива полностью подчинено региональной субмеридиональной структуре района. Изменение субмеридионального простирания массива на юго-востоке, по-видимому, было вызвано структурой вмещающих пород до внедрения интрузии, а позднее изменено флексуроподобным сбросо-сдвигом и складчатостью [Юдин, 1980]. Габбро-лабрадоритовый интрузив Главного хребта дифференцирован таким образом, что в плане он имеет симметричное зональное строение. Основа массива сложена крупно- и гигантозернистыми

габбро и лабрадоритами, а эндоконтактовые зоны и подошвенная его часть — дифференцированным комплексом средне- и средне-крупнозернистых габбро и габбро-норитов.

В Мончегорском рудном районе широко развиты менее крупные интрузии основных и ультраосновных пород (см. рис. 2). Массивы Мончеплутон, Островской, Улитаозерский, Пивнус и Имандровский комплекс относятся к перидотит-пироксенит-габбро-норитовому формационному типу, а массивы Вайкисозерский, Тулгъяврский, Керкчоррский и Райненчоррский — к клинопироксенит-верлитовому. Сульфидное медно-никелевое оруденение в районе главным образом приурочено к интрузивам перидотит-пироксенит-габбро-норитовой формации, наиболее хорошо изученным представителем которой является Мончеплутон (Мончегорское месторождение Cu-Ni-руд). Дунитовый блок Мончеплутона — один из перспективных хромовых месторождений. С массивами клинопироксенит-верлитовой формации связано титано-магнетитовое оруденение, а также и медно-никелевое. Несмотря на значительное количество комплексных геологических и геофизических исследований, выполненных в течение многих лет на территории района, имеется ряд участков, которые требуют доизучения на современном методическом и техническом уровне.

Петрофизические характеристики пород и руд Мончегорского рудного района. Изучение физических свойств пород и руд на Кольском полуострове проводилось достаточно широко, особенно в пределах исследуемого района, но степень петрофизической изученности весьма неравномерна. Это объясняется тем, что значительное количество определений (в основном плотность и магнитная восприимчивость), выполненных разными авторами и в разное время, практически несопоставимо из-за различной точности определения параметров, отсутствия надежной привязки образцов и недостаточно детального и петрографически единого описания пород.

Петрофизика при комплексных геолого-геофизических исследованиях рассматривается как связующее звено между геофизикой и геологией, с помощью которого можно более корректно прогнозировать глубинное строение конкретных геологических структур [Петрофизика, 1992]. В методическом отношении петрофизика базируется на представлении, что физические свойства горных пород являются функцией условий их образования [Физические ..., 1976]. При этом изменение физических свойств горных пород заметно влияет на ход геологических процессов. Таким образом, обращение к физическим свойствам при изучении обратных связей в геологических системах позволяет более глубоко подойти к расшифровке ряда сложных петро-

Рис. 1. Геологическая карта Кольского региона Балтийского щита по [Mitrofanov et al., 1995]: *области*: Mur — Мурманская; Kol — Кольская; Bel — Беломорская; Ter — Терская; Ке — Кейвская; In — Инари, Кар — Карельская. *Пояса*: Jop — Енский; K-V — Колмозеро-Воронья (архейские зеленокаменные); LGB — Лапландский; KGB — Кандалакшско-Колвицкий (гранулитовые); Pe — Печенга, Im-V — Имандра-Варзуга, S-K — Северо-Карельский (палеопротерозойские). 1 — контуры палеозойских интрузий (а — нефелиновые сиениты, б — щелочные ультрамафиты), 2 — осадочные породы верхнего протерозоя. *Палеопротерозой*: 3 — граниты, гранодиориты и диориты, 4 — чарнокиты, граниты (а), щелочные граниты (в Кейвах — неоархейские) (б), 5 — вулканогенно-осадочные породы; 6 — анортозиты, габбро-анортозиты (в Кейвах — неоархейские), габбро, пироксениты, перидотиты. *Палеопротерозой (или неоархей?)*: 7 — гранулиты основного и среднего состава, 8 — кислые гранулиты. *Неоархей*: 9 — гранодиориты, диориты и эндербиты, 10 — глиноземистые и суперглиноземистые гнейсы и сланцы, 11 — кислые гнейсы, 12 — фрагменты зеленокаменных поясов (гнейсы, амфиболиты и метакоматииты), 13 — фрагменты железорудной (BIF) формации (гнейсы, амфиболиты и железистые кварциты), 14 — гнейсы и сланцы, 15 — гнейсы и амфиболиты, 16 — гранодиориты и диориты, 17 — плагиограниты и гранито-гнейсы, 18 — кианит-гранат-биотитовые гнейсы, 19 — гранито-гнейсы, гнейсы, мигматиты и редко амфиболиты; 20 — элементы залегания, 21 — субвертикальные разломы и пологие надвиги, разделяющие протерозойские структуры, 22 — субвертикальные разломы и надвиги.

логических процессов при их строгой количественной оценке. К наиболее информативным и изученным физическим свойствам горных пород региона относятся плотность и магнитная восприимчивость [Петроплотностьная ..., 1977; Петромагнитная ..., 1977]. Плотность — это функция их химического состава и *PT*-условий становления. Химический состав магматических

и метаморфических пород преимущественно зависит от состава расплава или исходной породы, а метасоматических пород — от внешних факторов, в основном от состава растворов. Намагниченность горных пород обусловлена присутствием в них ферромагнитных минералов: магнетита, гематита, магмита, пирротина. Данная характеристика связана с второстепенными

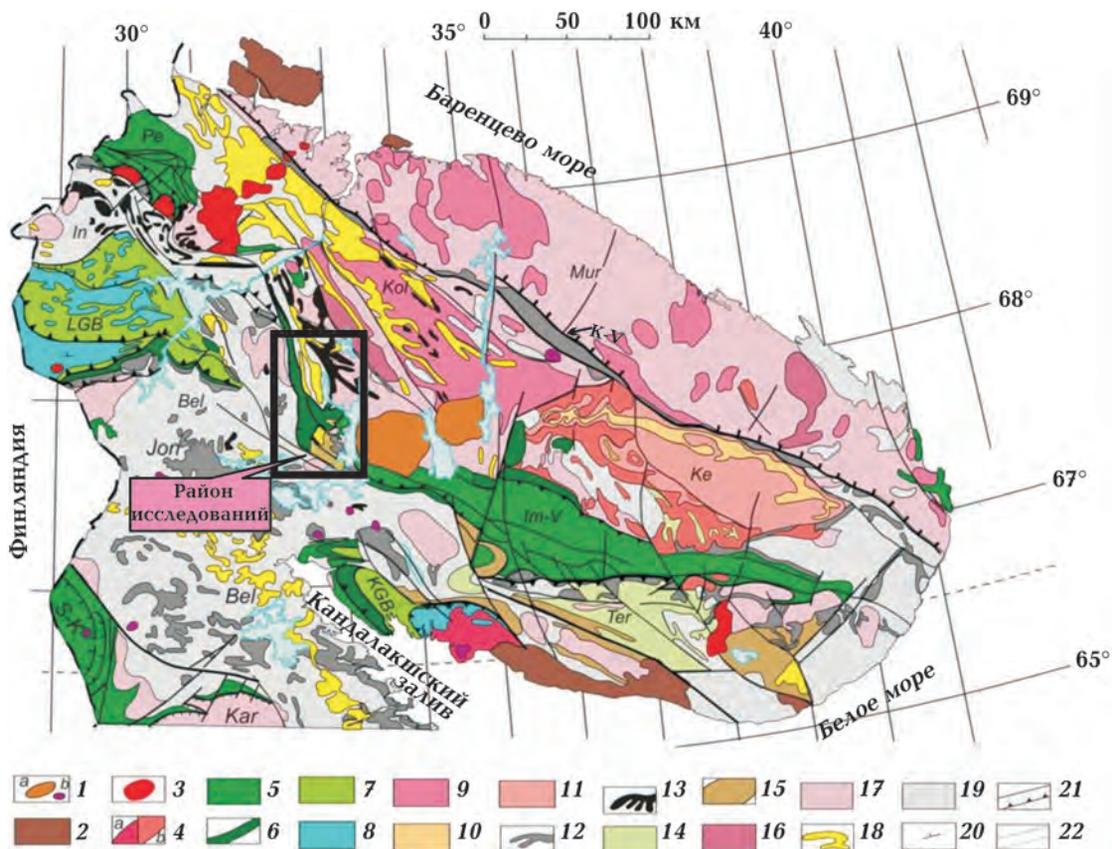


Fig. 1. Geological map of the Kola region of the Baltic Shield after [Mitrofanov et al., 1995]: domains: Mur — Murmansk, Kol — Kola, Bel — Belomorian, Ter — Tersky, Ke — Keivy, In — Inari. Belts: Jon — Yona, K-V — Kolmozero-Voronya (Archean greenstone belts); LGB — Lapland, KGB — Kandalaksha-Kolvitsa (granulite belts); Pe — Pechenga, Im-V — Imandra-Varzuga, S-K — North-Karelian (Paleoproterozoic rocks). 1 — contours of Paleozoic intrusions (a — nepheline syenites, б — ultramafic alkaline rocks), 2 — Neoproterozoic sedimentary rocks. Paleoproterozoic: 3 — granites, granodiorites and diorites, 4 — charnokites and granites (a), alkaline granites (б), 5 — volcanic-sedimentary rocks, 6 — anorthosites and gabbro-anorthosites (in Keivy — Neoproterozoic), gabbro, pyroxenites, peridotites. Paleoproterozoic (or Neoproterozoic?): 7 — basic and intermediate granulites, 8 — acid granulites. Neoproterozoic: 9 — granodiorites, diorites and enderbites, 10 — alumina and super-alumina gneisses and schists, 11 — acid gneiss, 12 — fragments of greenstone belts (gneisses, amphibolites and metakomatiites), 13 — fragments of banded iron formation (gneisses, amphibolites and ferruginous quartzites), 14 — gneisses and schists, 15 — gneisses and amphibolites, 16 — granodiorites and diorites, 17 — plagiogranites and granite-gneisses, 18 — kyanite-garnet-biotite gneisses, 19 — granite-gneisses, gneisses, migmatites, and, rarely, amphibolites; 20 — strike and dip, 21 — subvertical faults and gently dipping thrusts separating the Proterozoic domains, 22 — subvertical faults and thrusts.

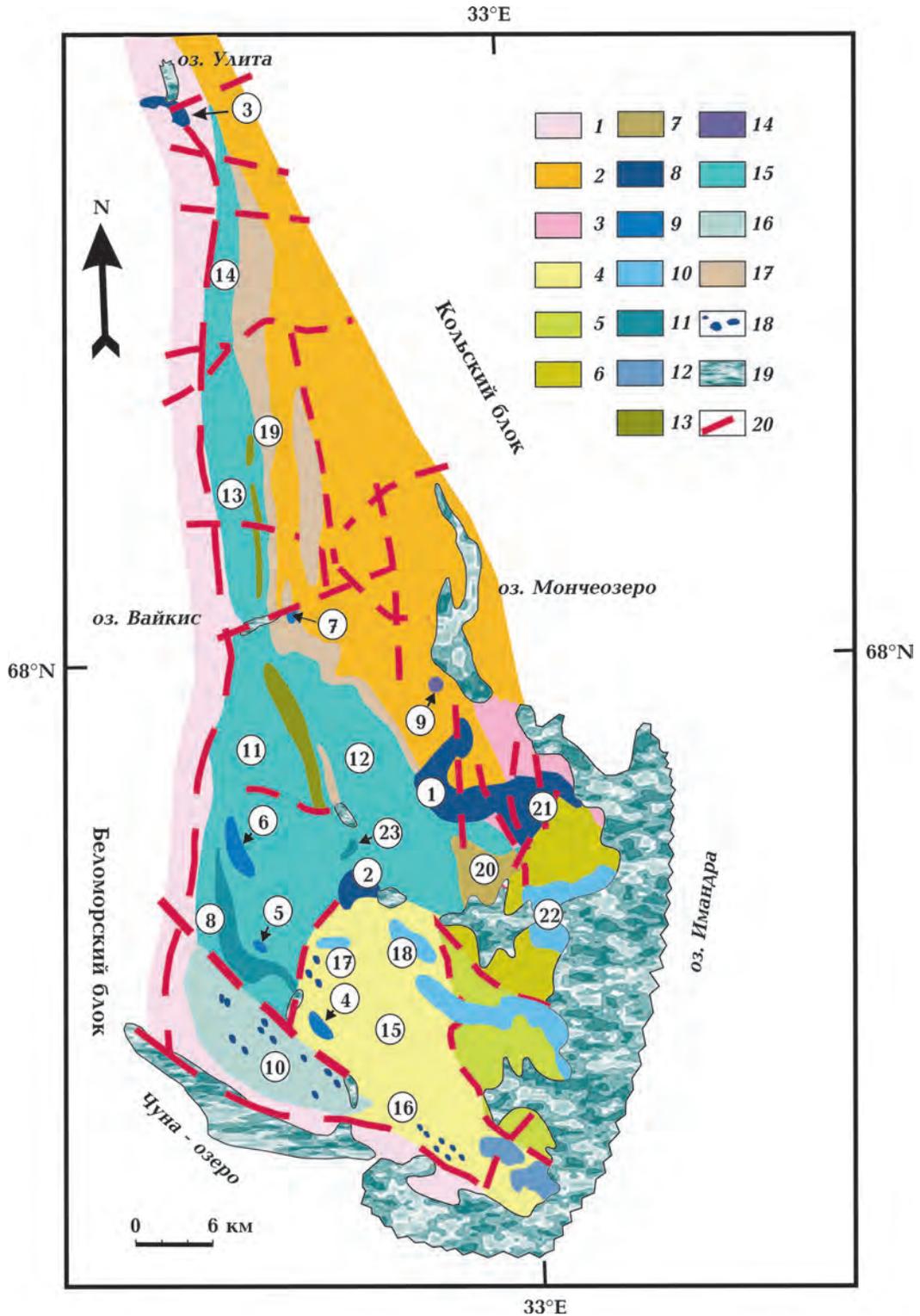


Рис. 2. Схематическая структурно-геологическая карта Мончегорского рудного района → по данным [Галичанина и др., 1976; Свяженинов и др., 1988; Пожиленко и др., 2002] с упрощением автора: 1 — гранитогнейсы, гнейсы и мигматиты; 2 — силлиманито-гранатобiotитовые гнейсы с редкими телами основных пород; 3 — гранодиориты и различные гранитоиды; 4 — комплекс гнейсов и амфиболитов по вулканогенно-осадочным породам; 5 — гнейсы и сланцы по вулканитам (Имандра-Варзуга); 6 — метавулканыты, диабазы, порфириды, андезиты, дациты (Имандра-Варзуга); 7 — андезиты, дациты, их туфы и аг-

минеральными компонентами, тем не менее она является важным физическим свойством, тесно связанным с химическим составом, условиями образования и изменения пород.

Проведенные автором исследования по систематизации имеющихся данных о физических свойствах горных пород всех геологических образований, развитых в Мончегорском рудном районе и представленных в работах [Галичанина и др., 1976; Физические ..., 1976; Юдин, Кацеблин, 1976; Петроплотностная ..., 1977; Петромагнитная ..., 1977; Петрофизика ..., 1982; Петрофизика, 1992], позволили выполнить петрофизические карты (петроплотностную и петромагнитную) района исследований (рис. 3, 4). Данные о плотности и магнитной восприимчивости пород представлены в таблицах (табл. 1, 2, 3), которые отражают

особенности изменения петрофизических параметров как основных и ультраосновных пород палеопротерозоя, так и пород архейского фундамента изучаемого района.

В целом в пределах архейского фундамента Мончегорского рудного района наиболее широко распространены гнейсовые толщи, в пределах северной части Мончеполуострова и на некоторых островах озера Имандра также развиты гранитоиды, а в восточном обрамлении Главного хребта — диориты. Гранитоиды характеризуются изменениями плотности пород (σ) от 2,58 г/см³ до 2,65 г/см³. Средневзвешенное значение этого параметра составляет $\bar{\sigma} = 2,62$ г/см³. Магнитные свойства гранитоидов варьируют в весьма широких пределах. Магнитная восприимчивость (χ) изменяется от единиц до $1600 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Однако в основной массе гранитоидные породы являются

ломератовые туфы (Имандра-Варзуга); 8 — основные и ультраосновные породы Мончеплутона, массивов Островской и Улитаозерский (габбронориты, нориты, пироксениты, перидотиты, дуниты); 9 — клинопироксениты, верлиты и оливиниты Тулпъявского, Керкчоррского, Райненчоррского и Вайкисозерского массивов; 10 — нориты и габбронориты Имандровского комплекса; 11 — габбро, габбронориты массивов гор Керкчорр и Сейдуайвенч; 12 — метаморфизованные нориты и габбронориты; 13 — лабрадориты; 14 — нориты и диориты массива Ярва-варака; 15 — габбро, габбронориты и габбро-лабрадориты массива Главного хребта; 16 — гнейсы и амфиболиты тонкопереслаивающиеся (Нярк-тундра); 17 — метаморфизованные и рассланцованные нориты, габбронориты и диориты; 18 — лерцолиты; 19 — озера; 20 — разломы. Цифры в кружках — массивы: 1 — Мончеплутон, 2 — Островской, 3 — Улитаозерский, 4 — Тулпъявский, 5 — Керкчоррский, 6 — Райненчоррский, 7 — Вайкисозерский, 8 — горы Керкчорр и Сейдуайвенч, 9 — Ярва-варака, 10 — Нярк-тундра, 11 — Чуна-тундра, 12 — Мончетундровская интрузия, 13 — Волчы тундры, 14 — Лосевы тундры, 15 — супра-крупальные породы (неоархей), 16 — участок Воче-Ламбина, 17 — гора Ягельная, 18 — гора Девичья, 19 — массив Пивнус, 20 — гора Арваренч.

Fig. 2. Schematic structural-geological map of the Monchegorsk ore area, after [Галичанина и др., 1976; Свяженинов и др., 1988; Пожиленко и др., 2002] simplified by the author: 1 — granite-gneisses, gneisses and migmatites; 2 — sillimanite-garnet-biotite gneisses with rare bodies of basic rocks; 3 — granodiorites and various granitoids; 4 — complex of gneisses and amphibolized volcanic-sedimentary rocks; 5 — gneisses and schists along volcanics (Imandra-Varzuga); 6 — metavolcanics, diabases, porphyrites, andesites, dacites (Imandra-Varzuga); 7 — andesites, dacites, their tufts and agglomerate tufts (Imandra-Varzuga); 8 — basic and ultrabasic rocks of the Monchepluton, Ostrovsky and Ulitaozersky massifs (gabbronorites, norites, pyroxenites, peridotites, dunites); 9 — clinopyroxenites, wehrlites and olivinites of the Tulp'yavr, Kerkchorr, Rheinenchorr and Vaikisozero massifs; 10 — norites and gabbronorites of the Imandra complex; 11 — gabbro, gabbronorites of the Kerkchorr and Seyduayvench mountain massifs; 12 — metamorphosed norites and gabbronorites; 13 — labradorites; 14 — norites and diorites of the Järva-Varaka massif; 15 — gabbro, gabbronorite and gabbro-labradorite of the Main Ridge massif; 16 — thinly interbedded gneisses and amphibolites (Nyark-tundra); 17 — metamorphosed and foliated norites, gabbronorites and diorites; 18 — lherzolites; 19 — lakes; 20 — faults. Numbers in circles indicate massifs: 1 — Monchepluton, 2 — Ostrovskoy, 3 — Ulitaozersky, 4 — Tulp'yavr, 5 — Kerkchorr, 6 — Reinenchorr, 7 — Vaikisozero, 8 — Kerkchorr and Seyduayvench mountains, 9 — Järva-Varaka, 10 — Nyark-tundra, 11 — Chuna-tundra, 12 — Monchetundra intrusion, 13 — Volchyi tundra, 14 — Losyovy tundra, 15 — supracrustal rocks (Neoarchean), 16 — Voche-Lambina site, 17 — Yagelnaya mountain, 18 — Devichya mountain, 19 — Pivnus massif, 20 — Arvarench mountain.

Т а б л и ц а 1 . Плотность и магнитная восприимчивость пород архейского фундамента Мончегорского рудного района

Порода	σ , г/см ³	$\bar{\sigma}$	χ , 10 ⁻⁵ ед. СИ	$\bar{\chi}$
Гранат-биотитовые и силлиманитсодержащие гнейсы	2,70—2,95	2,81	0—7000	240
Биотит-амфиболовые и амфиболовые гнейсы	2,60—2,95	2,76	0—55 600	400
Мигматизированные биотитовые гнейсы и гнейсограниты	2,55—2,75	2,63	0—120 000	1300
Плагиомикроклиновые граниты	2,58—2,65	2,62	0—1600	400
Диориты, гиперстеновые диориты	2,60—3,30	2,94	0—200 000	700
Биотит-амфибол-кварц-полевошпатовые сланцы и развитые по ним бластомилониты	2,60—2,95	2,74	0—15 800	700
Слюдисто-кварц-полевошпатовые и амфибол-полевошпатовые сланцы	2,65—3,15	2,84	0—20 000	500
Биотит-кварц-полевошпатовые сланцы	2,65—3,00	2,76	0—20 000	400
Гранатовые амфиболиты	3,00—3,25	3,09	300—550	400
Нерасчлененный комплекс полевошпатовых ортоамфиболитов	2,80—3,15	3,03	200—120 000	600

практически немагнитными или слабомагнитными: значения χ в большинстве случаев не превышают $790 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, и средневзвешенное значение магнитной воспри-

имчивости $\bar{\chi}$ составляет в целом для комплекса $400 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Плотность диоритов $\sigma = 2,60 \div 3,30$ г/см³ при средневзвешенном значении $\bar{\sigma} = 2,94$ г/см³, а магнитная

Т а б л и ц а 2 . Плотность и магнитная восприимчивость вулканогенно-осадочных пород Имандра-Варзуги (Мончегорский рудный район)

Порода	σ , г/см ³	$\bar{\sigma}$	χ , 10 ⁻⁵ ед. СИ	$\bar{\chi}$
Слюдисто-полевошпатовые и гранат-слюдистые сланцы	2,65—3,15	2,95	0—7	1270
Метапорфириты и сланцевые амфиболиты	2,85—3,15	3,02	160—62 700	550
Метаандезиты	2,75—3,15	2,90	160—29 400	1030
Метапорфириты и дацитовые порфиры	2,65—2,85	2,74	80—22 260	400
Агломератовые и метакластические туфы	2,65—2,90	2,75	0—20 240	480

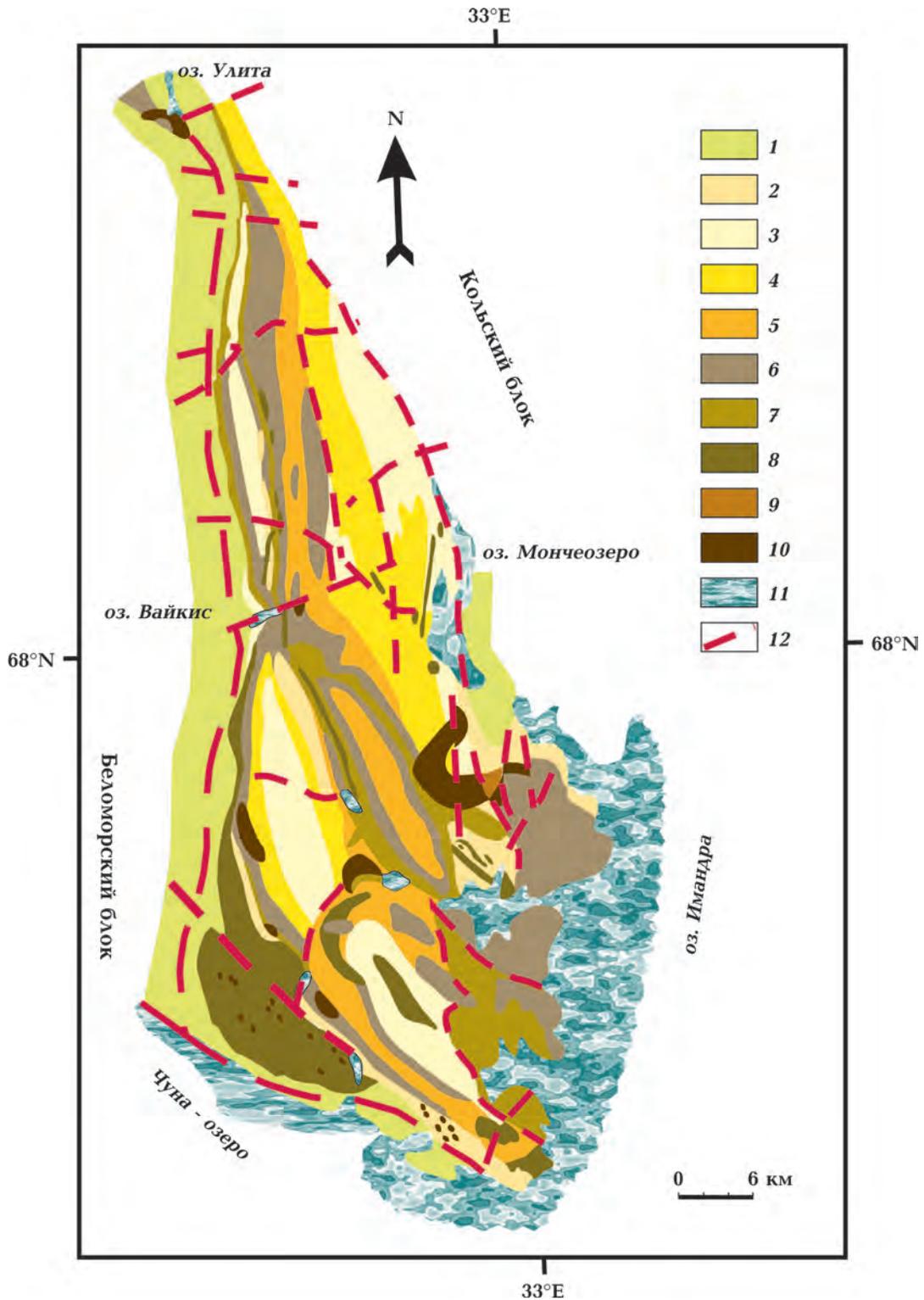


Рис. 3. Петроплотностная карта Мончегорского рудного района: 1—10 — плотность, г/см^3 (1 — 2,60—2,65; 2 — 2,70—2,75; 3 — 2,75—2,80; 4 — 2,80—2,85; 5 — 2,85—2,90; 6 — 2,90—2,95; 7 — 2,95—3,00; 8 — 3,00—3,10; 9 — 3,10—3,20; 10 — более 3,20); 11 — озера; 12 — разломы.

Fig. 3. Petrodensity map of the Monchegorsk ore area: 1—10 — density, g/cm^3 (1 — 2,60—2,65; 2 — 2,70—2,75; 3 — 2,75—2,80; 4 — 2,80—2,85; 5 — 2,85—2,90; 6 — 2,90—2,95; 7 — 2,95—3,00; 8 — 3,00—3,10; 9 — 3,10—3,20; 10 — more 3,20); 11 — lakes; 12 — faults.

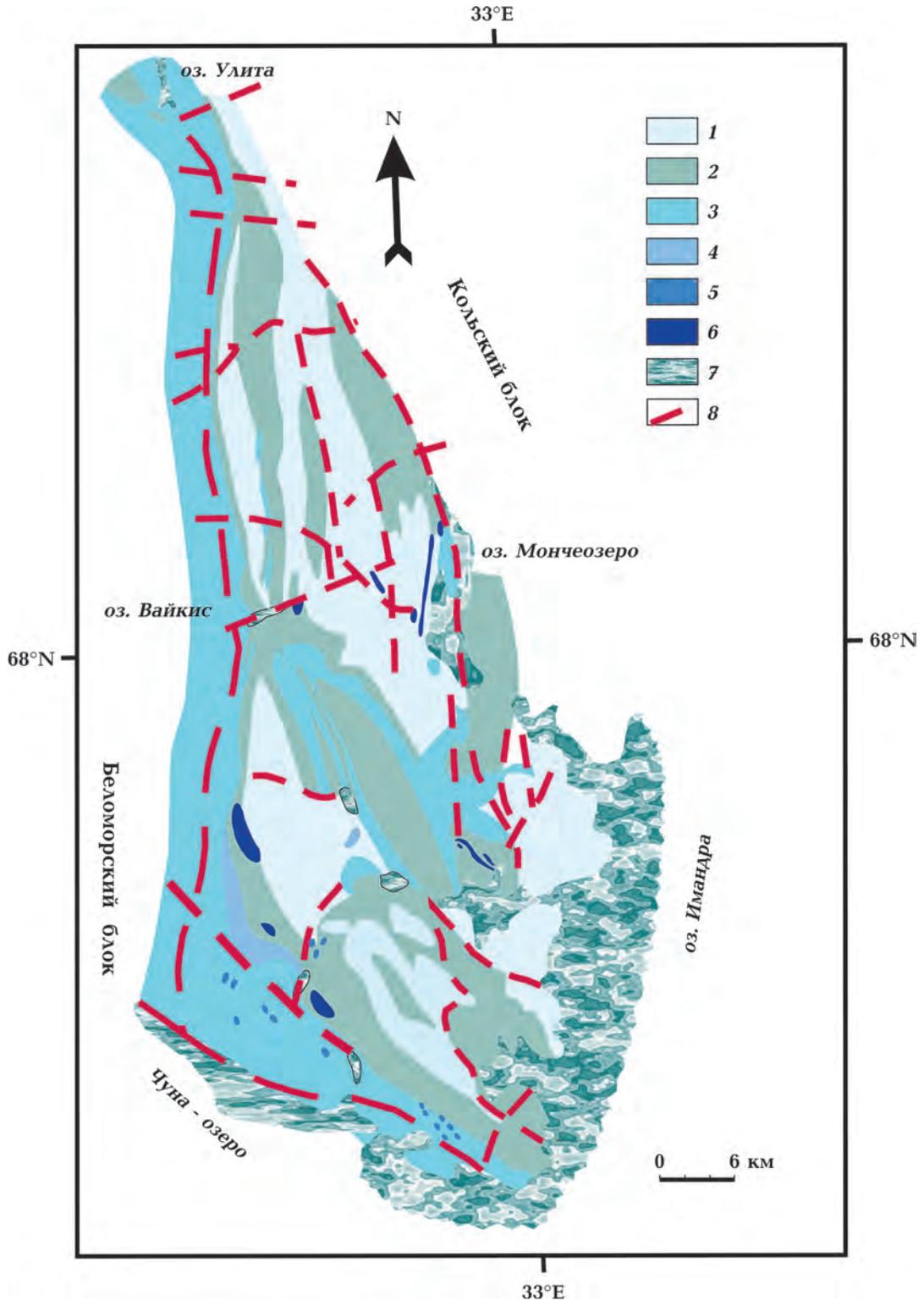


Рис. 4. Петромагнитная карта Мончегорского рудного района: 1—6 — магнитная восприимчивость, 10^{-5} ед. СИ: (1 — 0—400; 2 — 400—1200; 3 — 1200—2400; 4 — 2400—5550; 5 — 5550—12 000; 6 — 12 000—24 000); 7 — озера; 8 — разломы.

Fig. 4. Petromagnetic map of the Monchegorsk ore area: 1—6 — magnetic susceptibility 10^{-5} SI units (1 — 0—400; 2 — 400—1200; 3 — 1200—2400; 4 — 2400—5550; 5 — 5550—12 000; 6 — 12 000—24 000); 7 — lakes; 8 — faults.

восприимчивость варьирует в интервале от 0 до $200\,000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, средневзвешенное значение составляет $\bar{\chi} = 700 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ (см. табл. 1).

Плотность гнейсов фундамента колеблется в широких пределах ($2,55 \div 2,95$ г/см³), но при этом среднее значение плотности пород гнейсового комплекса характеризуется значениями $2,70$ — $2,75$ г/см³ независимо от возраста и места расположения. Наименьшей плотностью обладают биотитовые гнейсы $\bar{\sigma} = 2,63$ г/см³, при этом значения магнитной восприимчивости достигают $120\,000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, что связано с образованием вторичного магнетита при мигматизации гнейсов в процессе метасоматоза. В итоге средневзвешенное значение магнитной восприимчивости составляет $1300 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Биотит-амфиболовые и амфиболитовые гнейсы характеризуются более высокой плотностью $\bar{\sigma} = 2,76$ г/см³ и практически немагнитны ($\bar{\chi} = 400 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ). Относительно широкий диапазон изменения плотности ($\sigma = 2,60 \div 2,95$ г/см³) объясняется пестротой вещественного состава, частой перемежаемостью пород. Немагнитные гранат-биотитовые и кианит-силлиманито-гранатовые гнейсы ($\bar{\chi} = 240 \times 10^{-5}$ ед. СИ) обладают наибольшей плотностью среди пород гнейсового комплекса этого района ($\bar{\sigma} = 2,81$ г/см³). Их высокая плотность обусловлена присутствием (до 14 %) граната, кианита, силлиманита.

В пределах архейского фундамента района наблюдаются сланцевые амфиболиты по вулканитам с прослоями биотитовых гнейсов. Для лейкократовых биотитовых и биотит-амфибол-кварц-полевошпатовых сланцев (см. табл. 1) характерна плотность $\bar{\sigma} = 2,4$ г/см³ ($2,60 \div 2,95$ г/см³), а магнитная восприимчивость составляет $\bar{\chi} = 700 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ (от 0 до $15\,800 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ). Плотность слюдисто-кварц-полевошпатовых сланцев и амфибол-полевошпатовых сланцев характеризуется величиной $\bar{\sigma} = 2,84$ г/см³ ($2,65 \div 3,15$ г/см³). В данном случае наиболее плотными являются сланцеватые амфиболиты. Для биотит-кварц-полевошпатовых сланцев характерна плотность $\bar{\sigma} = 2,76$ г/см³ ($2,65 \div 3,00$ г/см³). В разрезе присутствуют

гранатовые амфиболиты $\bar{\sigma} = 3,09$ г/см³ ($3,00$ — $3,25$ г/см³). В особую плотностную группу могут быть выделены полевошпатовые ортоамфиболиты $\bar{\sigma} = 3,03$ г/см³ ($2,80 \div 3,15$ г/см³). При этом магнитная восприимчивость может достигать $120\,000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, $\bar{\chi} = 600 \times 10^{-5}$ ед. СИ. Почти все вышеперечисленные породы практически немагнитны, хотя в каждой разновидности встречаются образцы (до 20 %) с магнитной восприимчивостью до $8000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Петроплотностные и петромагнитные характеристики вулканогенно-осадочных пород Имандра-Варзуги (палеопроторозой) представлены в табл. 2. Кукшинская и Сейдореченская свиты сложены в нижних частях разреза осадочными, а в верхних — вулканогенными образованиями [Загородный и др., 1982], которые четко различаются по плотности. Первые представлены преимущественно слюдисто-полевошпатовыми и гранат-слюдистыми сланцами с плотностью $\bar{\sigma} = 2,92$ г/см³ ($\sigma = 2,65$ — $3,15$ г/см³) и $\bar{\chi} = 1270 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ ($\chi = 0$ — $158\,000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ), вторые — метапорфиритами и сланцевыми амфиболитами с плотностью $\bar{\sigma} = 3,02$ г/см³ ($\sigma = 2,85$ — $3,15$ г/см³), $\bar{\chi} = 550 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ ($\chi = 0 \div 62\,700 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ). Среди метавулканитов арваренчской свиты метапорфириты и дацитовые порфиры характеризуются плотностью $\bar{\sigma} = 2,74$ г/см³ ($\sigma = 2,65 \div 2,85$ г/см³), метаандезиты обладают более высокой плотностью $\bar{\sigma} = 2,90$ г/см³ при $\bar{\chi} = 1030 \times 10^{-5}$ ед. СИ ($\sigma = 2,75 \div 3,15$ г/см³, $\chi = 0 \div 29\,400 \times 10^{-5}$ ед. СИ). При этом агломератовые и метакластические туфы характеризуются плотностью $\bar{\sigma} = 2,75$ г/см³ ($\sigma = 2,65 \div 2,90$ г/см³). Все породы осадочно-вулканогенного комплекса преимущественно немагнитны за исключением некоторых слюдисто-полевошпатовых сланцев, содержащих до 10 % магнетита и имеющих магнитную восприимчивость χ порядка 8000 — $80\,000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

Интрузивный комплекс основных и ультраосновных пород (табл. 3) изучен наиболее детально [Галичанина и др., 1976; Юдин, Кацелин, 1976]. По магнитным характеристикам интрузивы разделяются на три группы, сложенные сильномагнитными, магнит-

Т а б л и ц а 3 . Плотность и магнитная восприимчивость пород массивов основного/ультраосновного состава (Мончегорский рудный район)

Порода	σ , г/см ³	$\bar{\sigma}$	χ , 10 ⁻⁵ ед. СИ	$\bar{\chi}$
Монча-тундра:				
Лейкократовые габбро и развитые по ним милониты	2,70—3,15	2,85	0—79 400	300
Мезо- и меланократовые габбро и развитые по ним милониты	2,80—3,20	2,95	0—79 400	480
Лабрадориты жильные	2,60—2,85	2,72	0—7940	100
Малые тела, ультраосновные породы	2,95—3,45	3,20	240—34 100	2800
Чуна-тундра:				
Лейкократовые габбро и развитые по ним милониты	2,70—2,95	2,82	0—7940	400
Милониты по мезо- и меланократовым габбро	2,80—3,15	2,95	0—23 800	480
Малые тела, ультраосновные породы	2,95—3,45	3,22	240—34 100	2800
Волчьи тундры:				
Лабрадориты жильные	2,60—2,90	2,73	0—19 800	550
Лейкократовые габбро и развитые по ним милониты	2,65—3,15	2,82	0—79 400	240
Мезо- и меланократовые габбро и развитые по ним милониты	2,80—3,20	2,95	0—31 700	480
Малые тела, нориты и габбро-нориты	2,90—3,20	3,02	120—31 000	700
Лосевые тундры:				
Лейкократовые габбро и развитые по ним милониты	2,70—2,95	2,81	0—19 800	300
Мезо- и меланократовые габбро и развитые по ним милониты	2,85—3,15	2,99	80—79 400	700
Амфиболиты по габбро и габбро-норитам	3,03—3,30	3,03	80—19 800	800
Нярк-тундра:				
Габбро-нориты и милониты по ним	2,75—3,30	3,04	80—31 700	1200
Амфиболиты по габбро и габбро-норитам	2,70—3,25	2,98	120—79 400	670
Малые тела, ультраосновные породы	3,10—3,40	3,22	240—34 100	2800
Гора Девичья:				
Мегагаббро-нориты	2,85—3,15	2,95	160—800	200

Мончеполуостров: Лейкократовые нориты	2,85—3,00	2,91	120—200	200
Гора Ягельная: Габбро-нориты	2,80—3,15	2,9	80—5900	240
Мончеплутон: Нориты нормальные (верхняя часть разреза)	2,75—3,20	2,93	0—50 000	400
Ультраосновные породы (НКТ)	2,95—3,33	3,21	790—19 800	1190
Ультраосновные породы (Сопча)	3,12—3,40	3,26	790—31 700	1590
Нориты пойкилитовые (низы разреза, Нюд)	2,80—3,25	3,13	0—19 800	1590
Предгорье Выручайвенч: Нориты нормальные (верхняя часть разреза)	2,65—3,15	3,04	0—3970	160
Нориты пойкилитовые (низы разреза)	2,90—3,20	3,10	240—7900	1200
Островской массив: Ультраосновные породы	2,95—3,40	3,27	0—47 600	480
Габбро-нориты	2,80—3,25	3,00	80—7940	630
Райненчорр: Ультраосновные породы	3,00—3,50	3,31	7900—120 000	17 000
Керкчорр: Ультраосновные породы	3,15—3,55	3,23	160—67 500	9500
Габбро-нориты с вкрапленностью	2,90—3,55	3,31	1270—27 800	8730
Тулгъявр: Ультраосновные породы	3,10—3,35	3,16	400—126 000	5400
Гора Арваренч: Серпентинизированные перидотиты	2,75—3,10	2,89	11 900—79 400	46 000
Массив оз. Пивнус: Нориты	2,85—3,10	3,01	1590—13 500	5950
Габбро-нориты	2,75—3,20	3,02	160—51 590	3016
Сейдуайвенч: Габбро-нориты	2,75—3,10	2,96	80—39 700	1750
Воче-ламбина: Малые тела, ультраосновные породы	2,75—3,25	3,00	400—63 500	8730

ными и практически немагнитными породами. Никеленосные и потенциально никеленосные многофазные интрузии, к которым относятся Мончеплутон, Островской массив и малые интрузии восточного обрамления габброидов Волчьих тундр, сложены слабوماгнитными разновидностями пород. Средневзвешенная плотность пород этих массивов довольно высокая $\bar{\rho} = 3,23 \div 3,27 \text{ г/см}^3$. Райненчоррский, Керкчоррский, Тулпъяврский и Вайкисозерский массивы представлены сильномагнитными породами. Для них характерна окисная железотитановая металлогеническая специализация. Магнитная восприимчивость изменяется от $160 \cdot 10^{-5}$ до $120\,000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, при этом отмечается, что плотность пород также высокая $\bar{\rho} = 3,13 \div 3,27 \text{ г/см}^3$. Практически немагнитные породы габбро-лабрадоритового Главного хребта имеют значение плотности $\bar{\rho}$ от 2,82 до 2,95 г/см³. На их фоне выделяются габбро-нориты горного отрога Нярк-тундры и горы Керкчорр, обладающие повышенными значениями плотности ($\bar{\rho} = 3,04 \div 3,31 \text{ г/см}^3$) и магнитной восприимчивости ($\chi = 1200 \div 8730 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ).

Применительно к Мончегорскому рудному району изменение петрофизических параметров также находит отражение в связи с наложенными процессами преобразования пород [Галичанина и др., 1976; Юдин, Кацеблин, 1976; Петрофизика ..., 1982]. В итоге горные породы различных петрографических групп дополнительно характеризуются определенным диапазоном изменения физических свойств. Следует отметить, что при одинаковых термодинамических и физико-химических условиях породы обладают значительно более узкими пределами изменения параметров. Физические свойства пород архейского фундамента во многом обусловлены почти повсеместным преобразованием в процессе ультраметаморфизма, сопровождающегося гранитизацией пород. Разуплотнение архейских гнейсов при этом достигает 0,04 г/см³. На среднем уровне гранитизации имеет место увеличение магнитной восприимчивости пород до $8000 \div 12\,000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. При

этом породы подвержены гранитизации в разной степени как на поверхности, так и на глубине. Разуплотнение гнейсов, связанное с щелочным метасамозомом и образованием щелочных гнейсов, достигает значений 0,03—0,04 г/см³. Магнитная восприимчивость вновь образуемых пород характеризуется значениями, достигающими $23\,800—31\,700 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ.

При серпентинизации гипербазитов района исследований магнитная восприимчивость, как правило, увеличивается за счет новообразований магнетита [Галичанина и др., 1976]. Указывается, что последующие процессы метаморфизма (амфиболизация, хлоритизация и др.), переводя железо из окисной в силикатную форму, уменьшают магнитность пород, что в конечном итоге может привести к образованию полностью немагнитных гипербазитов. В зависимости от степени проявления тех или иных вторичных процессов существенным образом изменяются петрофизические характеристики пород гипербазитового комплекса, при этом уменьшается плотность. Повышение намагниченности наблюдается у метасоматически измененных пород, в которых железо, высвободившись при разрушении силикатов, связывалось при благоприятных условиях в форме магнетита. Обратная картина наблюдается при метаморфизме габбро-лабрадоритовых пород, когда при разрушении титаномагнетита и магнетита наблюдается уменьшение магнитной восприимчивости. Несмотря на то, что в Мончегорском районе был выполнен большой объем петрофизических исследований [Галичанина и др., 1976; Юдин, Кацеблин, 1976; Петрофизика ..., 1982], до сих пор нет надежной систематизации данных о степени влияния наложенных метасоматических процессов на изменение петрофизических характеристик горных пород и руд.

Структура распределения геофизических неоднородностей Мончегорского рудного района. Выполненный анализ структуры геофизических аномалий в пределах Мончегорского рудного района позволил построить схемы распределения геофизических неоднородностей (рис. 5) и оце-

нить их характер. В этих целях были использованы карты гравитационного и магнитного полей масштаба 1 : 50 000 и 1 : 200 000. Ставилась задача выделения гравитационных ступеней, картирования магнитных аномалий и фиксации простирающихся осей магнитных аномалий по их максимальным значениям. Для того чтобы охарактеризовать гравитационное поле Δg района, рассчитывались горизонтальные градиенты силы тяжести W_{zx} , а на втором шаге по аномальным значениям градиентов выполнялось трассирование субвертикальных плотностных контактов. При расчетах градиента W_{zx} использовались интегральные методы, на базе которых разрабатывались алгоритмы их численной реализации и пакеты программ для ЭВМ [Филатова, 2019].

Трансформации поля Δg осуществлялась путем вычисления интегралов типа свертки:

$$\Delta g(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} d\varepsilon \times \int_{-\infty}^{\infty} \Delta g(\varepsilon, \eta) k(x - \varepsilon, y - \eta) d\eta,$$

которые можно приближать двойной суммой:

$$\tilde{\Delta} g(x, y) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \times \sum_{l=-\infty}^{\infty} C_{k,l} \Delta g(x + kq, y + lq),$$

где q — шаг задания поля Δg , $k(x - \varepsilon, y - \eta)$ — ядро преобразования, $C_{k,l}$ — коэффициенты квадратурной формулы. Коэффициенты $C_{k,l}$ определяются как коэффициенты ряда Фурье функции $K(\lambda, \mu)$ в квадрате $\tau(|\lambda| \leq \pi/q, |\mu| \leq \pi/q)$ [Каратаев и др., 1973]:

$$C_{k,l} = \frac{q^2}{4\pi^2} \int_{-\pi/q}^{\pi/q} d\lambda \times$$

$$\times \int_{-\pi/q}^{\pi/q} K(\lambda, \mu) e^{iq(k\lambda + l\mu)} d\mu,$$

где $K(\lambda, \mu) = i\lambda$ — преобразование Фурье ядра оператора вычисления градиента W_{zx} . Коэффициенты $C_{k,l}$ можно вычислить с использованием способа Филона методом повторного интегрирования [Калиткин, 1978].

Рассчитанные значения градиентов поля Δg оценивались следующим способом — по трем категориям. Категория градиентов определялась при их нормировании относительно максимального значения по региону. При результате нормирования 1,0 — 0,7 градиент поля Δg относился к 1-й категории, при 0,7—0,4 — ко 2-й категории, менее 0,4 — к 3-й категории. Анализ магнитного поля осуществлялся с использованием иного подхода, при котором отдельно выделялись локальные аномалии магнитного поля как рядовые изометричные, так и высокоинтенсивные (более 3000 нТл). Кроме этого, выделялись оси локальных магнитных аномалий как протяженные интенсивные, так и рядовые в рамках масштаба используемых карт. Результаты выполненных преобразований отражены на схеме распределения геофизических неоднородностей Мончегорского рудного района (см. рис. 5).

Границы области развития палеопротерозойских интрузивных пород Мончегорского рудного района достаточно надежно выделяются в геофизических полях: в гравитационном поле — градиентами поля Δg 1-й и 2-й категорий; в магнитном поле — изометричными по форме аномалиями, на фоне которых фиксируются оси протяженных и интенсивных локальных аномалий. Все наблюдаемые локальные аномалии гравитационного поля на территории блока совпадают с геологическими структурами, сложенными породами повышенной плотности. Таким образом, просматривается корреляция между полем Δg и петроплотностными характеристиками приповерхностных горных пород базитового—ультрабазитового состава. Такие об-

разования как габбро-лабрадоритовый массив Главного хребта и Мончеплутон, в силу своих больших размеров, наиболее контрастно выделяются в геофизических полях и отмечаются максимальными значениями магнитного и гравитационного полей (см. рис. 5). Также контрастно в физических полях выделяются примыкающие к габбро-лабрадоритовому массиву с юго-востока супракрустальные породы фундамента и породы Имандра-Варзугской структуры.

В пределах района исследований характер рисунка ориентации осей локальных магнитных аномалий выдержанный: для Главного хребта наблюдается субмеридиональное простирание осей магнитных аномалий; для гнейсов Кольского блока и примыкающих с юго-востока супракрустальных пород архейского фундамента (комплекс гнейсов и амфиболитов по вулканогенно-осадочным породам), а также западного фланга Имандра-Варзугской структуры направление преимущественно северо-запад—юго-восток. В породах Беломорского блока, расположенного на контакте с районом исследований с запада и с юго-запада, выявленная конфигурация осей локальных магнитных аномалий имеет сложный и неоднородный характер, но в целом это разномасштабные изометричные структуры (см. рис. 5). Следует отметить, что регион в палеопротерозое развивался в условиях тангенциального сжатия [Радченко и др., 1992]. Видимо, степень усложненности структуры распределения геофизических аномалий коррелируется с определенными тектоническими процессами, имевшими место на фоне неоднородной блоково-глыбовой активизации региона на тот период.

Обсуждение результатов и выводы.

Проведенные исследования по систематизации имеющихся данных о физических свойствах горных пород всех геологичес-

ких образований, развитых в Мончегорском рудном районе, показали, что никеленосные и потенциально никеленосные интрузии обладают повышенной плотностью, но при этом сложены слабомагнитными породами. Отмечается различие в петрофизических свойствах (см. рис. 3, 4), наблюдаемых в пределах Мончетундровской и Чунатундровской интрузии. Для Мончетундровского массива при большей основности пород характерна большая плотность и магнитная восприимчивость. Расслоенность указанных массивов (общее увеличение основности пород к придонной части интрузии) находит отражение на петрофизических картах: эндоконтактные габбро и габбро-нориты имеют повышенную плотность и магнитную восприимчивость по сравнению с лейкократовыми габбро и лабрадоритами ядерной части интрузива.

Наложённые процессы преобразования магматических горных пород района оказали непосредственное влияние на ход изменения их петрофизических параметров. Динамометаморфизм габбро-норитов Нярк-тундры обусловил некоторое увеличение плотности, но их сиенитизация, связанная с проявлением щелочного магматизма, привела к уменьшению плотности и магнитной восприимчивости [Галичанина и др., 1976]. В итоге блок пород Нярк-тундры не выделяется контрастными геофизическими полями на фоне Главного хребта (см. рис. 5). Наблюдаемые следы проявления динамометаморфизма и сиенитизации пород Нярк-тундры также должны вызвать уменьшение плотности и магнитной восприимчивости супракрустальных пород фундамента (комплекс гнейсов и амфиболитов по вулканогенно-осадочным породам) и комплекса пород Имандра-Варзуги. Напротив, эти комплексы достаточно надежно выделяются в геофизических полях аналогично Габбровому хребту

Рис. 5. Схема распределения геофизических неоднородностей в пределах Мончегорского рудного района: 1 — градиенты гравитационного поля (*a* — 1-го, *b* — 2-го, *в* — 3-го порядков); 2 — аномалии магнитного поля (*a* — локальные изометричные, *b* — локальные (более 3000 нТл)); 3 — оси локальных магнитных аномалий (*a* — протяженные интенсивные, *b* — рядовые); 4 — озера; 5 — разломы.

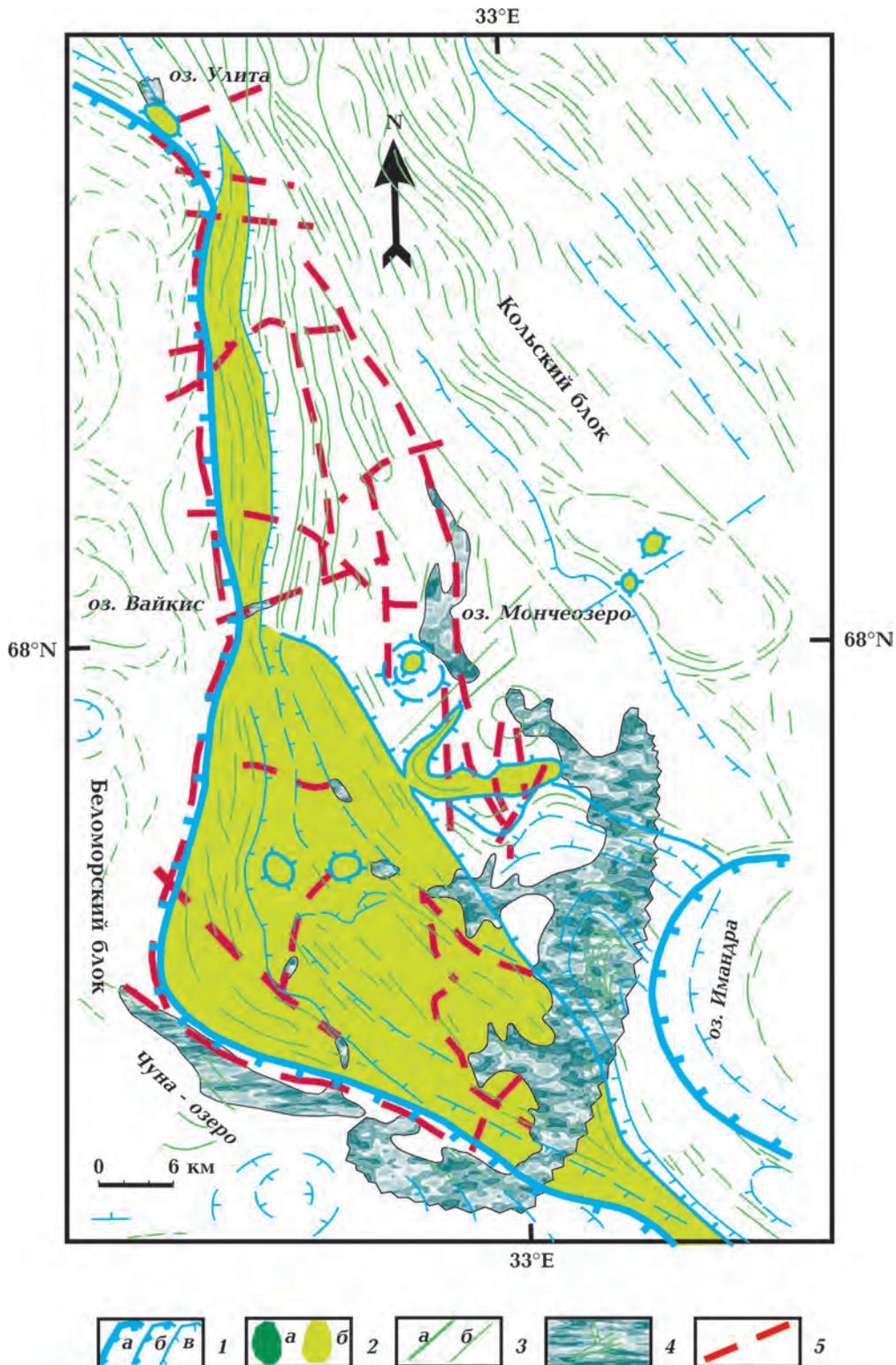


Fig. 5. Distribution map of geophysical heterogeneities in the Monchegorsk ore area: 1 — gravitational field gradients of (a — first, б — second, в — third orders); 2 — magnetic field anomalies (a — local isometric, б — local (more 3000 nT)); 3 — axes of local magnetic anomalies (a — extended intensive, б — common); 4 — lakes; 5 — faults.

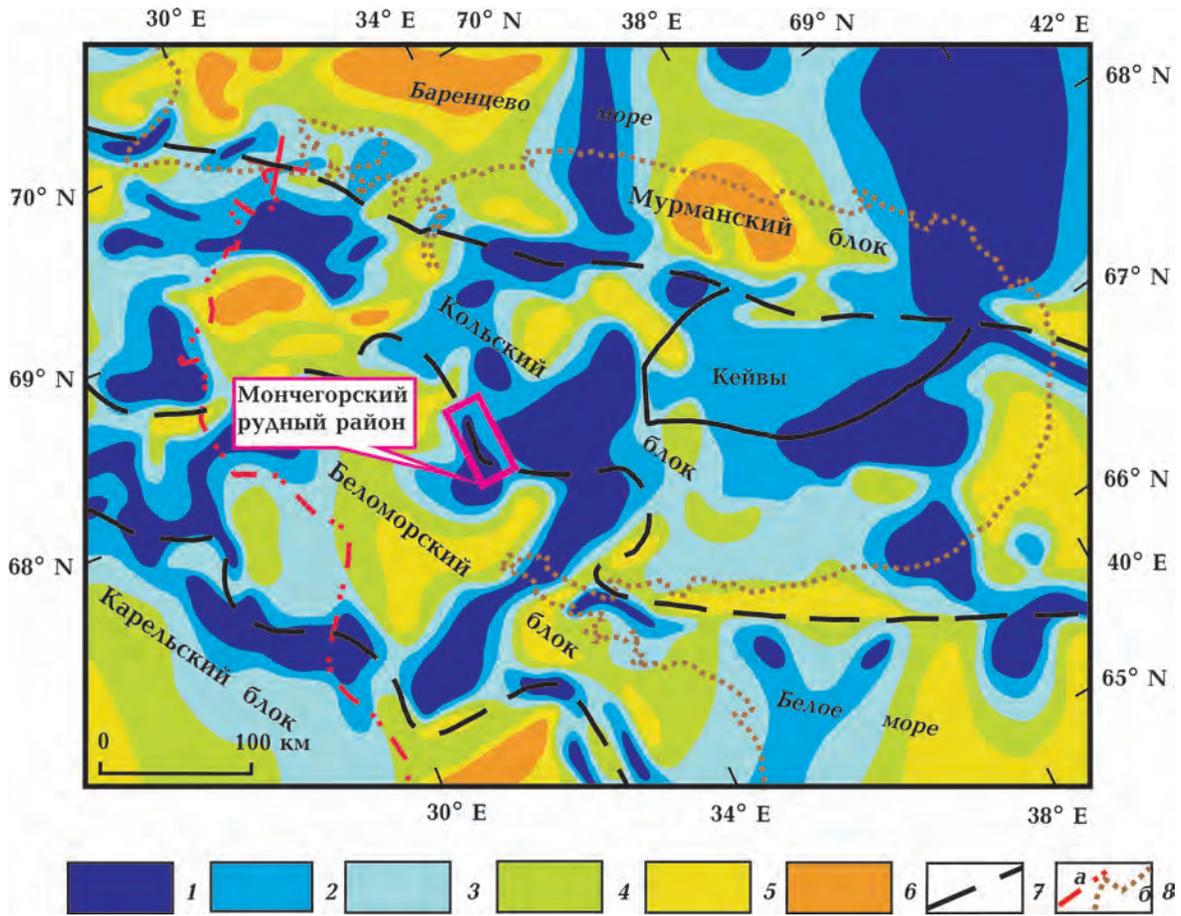


Рис. 6. Характер распределения максимальных по абсолютному значению скальвающих напряжений $|\tau_{xy}|_{\max}$ в пределах земной коры Кольского региона, рассчитанных для палеопротерозоя, по работе [Филатова, 2017]: 1—6 — нормированные значения скальвающих напряжений (1 — 80 ÷ 100 %, 2 — 60 ÷ 80 %, 3 — 40 ÷ 60 %, 4 — 20 ÷ 40 %, 5 — 10 ÷ 20 %, 6 — 0 ÷ 10 %); 7 — линия контакта блоков; 8 — государственная граница России (а), современная береговая линия (б).

Fig. 6. Distribution pattern of shear stress values with maximum absolute magnitudes ($|\tau_{xy}|_{\max}$) within the Earth's crust of the Kola region calculated for the Paleoproterozoic after [Филатова, 2017]: 1—6 — normalized shear stress values (1 — 80 ÷ 100 %, 2 — 60 ÷ 80 %, 3 — 40 ÷ 60 %, 4 — 20 ÷ 40 %, 5 — 10 ÷ 20 %, 6 — 0 ÷ 10 %); 7 — contact line of blocks; 8 — state border of Russia (a), modern coastline (b).

и Мончеплутону (см. рис. 5). По результатам ранее выполненных работ по построению объемной плотностной модели Мончегорского рудного района установлено, что под толщей супракравстальных пород архейского фундамента, примыкающего к габбро-лабрадоритовому массиву с юго-востока, прослеживается мощный пласт плотных пород [Филатова, 1995]. Выделенный пласт протягивается под наблюдаемые на поверхности породы Имандра-Варзуги. Верхняя граница этого пласта на отдельных

участках может достигать 1,3 км. Таким образом, можно допустить, что обнаруженный пласт включает в себя присутствующие на глубине основные — ультраосновные породы Имандровского комплекса и интрузии клинопироксенит-верлитового формационного ряда, фиксируемые в юго-восточной части Мончегорского рудного района.

Породы архейского фундамента Кольского региона, вмещающие основные и ультраосновные массивы раннепротерозойско-

го возраста, в целом характеризуются пониженными значениями плотности и являются практически немагнитными. В данном случае имеющиеся петромагнитные данные Мончегорского рудного района указывают на то, что магнитная восприимчивость гнейсов Беломорского блока выше, чем у пород Главного хребта и пород, примыкающих к нему с юго-востока (супракрустальный комплекс архейского фундамента и Имандра-Варзуга) (см. рис. 4). Наблюдаемое магнитное поле района (см. рис. 5) не позволяет увязать его с измеренной намагниченностью пород. Следовательно, мигматизация архейских пород в процессе метасоматоза вызвала изменения магнитных свойств только в приповерхностном уровне гнейсового блока.

Построенная схема распределения геофизических неоднородностей показала, что архейские блоки по характеру конфигурации выявленных осей локальных магнитных аномалий выделяются как обособленные области по однородности создаваемого рисунка: Беломорский — изометричные структуры, Кольский — линейно-протяженные (см. рис. 5). Фактически все архейские структурно-вещественные комплексы в разной степени переработаны в палеопротерозойское время. Структура ориентации осей магнитных аномалий увязывается с описанным ранее (с некоторой долей условности) стилем тектонической перестройки архейских пород региона: Беломорский блок представлен структурами купольно-складчатого и сложноскладчатого строения; Кольский блок — линейно-складчатого строения [Радченко и др., 1992]. Указано, что перестройка архейского структурного плана региона на тот период в первую очередь была обусловлена наложением деформаций, проявившихся при тангенциальном сжатии [Радченко и др., 1992; Mitrofanov et al., 1995]. Естественно, что тангенциальные напряжения не могли реализоваться в земной коре равномерно. Беломорский блок представлен более мощными и жесткими сооружениями в отличие от Кольского блока, в пределах которого кора была более разогрета на фоне формиро-

вания Печенга-Имандра-Варзугской рифтогенной системы.

Выполненные ранее исследования позволили с помощью численного моделирования построить количественные модели напряженно-деформированного состояния земной коры региона с учетом ее эволюционного развития [Филатова, 2009, 2012, 2017; Filatova, 2009, 2014]. Моделирование выполнялось с помощью метода граничных элементов [Crouch, Starfield, 1983]. Направления сжатия в палеопротерозое выбирались в соответствии с направлением раздвига Печенга-Варзугской рифтогенной системы и с направлением общего фронта тектонических напряжений в регионе [Радченко и др., 1992; Mitrofanov et al., 1995]. Произведенные расчеты показали, что на фоне одноосного сжатия региона по линии юго-запад—северо-восток в земной коре формируется мозаичная картина распределения полей напряжения (рис. 6). Одновременно возникают области повышенных значений скальвающих напряжений и области, где скальвающие напряжения практически отсутствуют. В пределах Мончегорского рудного района территория развития пород Беломорского блока отмечена максимальными по абсолютной величине скальвающими напряжениями, а для Кольского блока значения скальвающих напряжений составляют 60—80 % от максимального значения по региону. Беломорский блок характеризуется как более жесткий блок в отличие от разогретого и относительно пластичного Кольского блока.

Следовательно, в зависимости от определенных факторов (векторов подвижек блоков коры как контактирующих с Мончегорским рудным районом, так и в его пределах; физических свойств ее отдельных блоков) геологические образования, различные по форме, положению в пространстве, размерам и физическому состоянию, реагировали дифференцировано на возникающее напряженно-деформированное состояние среды и подвергались неоднородным деформациям.

Таким образом, применение петрофизических исследований в комплексе с ана-

лизом геофизических полей (Δg , ΔZ) позволило: 1) классифицировать массивы базит-гипербазитов с учетом их металлогенической специализации; 2) объяснить отсутствие корреляционной связи между петрофизическими свойствами блока пород супракрустального комплекса архейского фундамента и Имандра-Варзугской структуры и наблюдаемыми над ним гео-

физическими полями; 3) показать, что мигматизация гнейсов Беломорского и Кольского блоков в процессе метасоматоза проявилась в приповерхностном уровне; (4) подтвердить, что Беломорский и Кольский блоки выделяются как обособленные области относительно стиля тектонической перестройки коры региона в палеопротерозое.

Список литературы

- Галичанина Л.Д., Юдин Б.А., Сараханов В.К., Гринченко Б.М., Докучаева В.С., Дубровский М.И., Латышев Л.Н., Тюремнов В.А. Петрофизическая характеристика Мончегорского рудного района. В кн.: Петрофизическая характеристика советской части Балтийского щита. Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1976. С. 53—57.
- Загородный В.Г., Предовский А.А., Басалаев А.А., Батиева И.Д., Борисов А.Е., Ветрин В.Р., Волошина З.М., Докучаева В.С., Жангуров А.А., Козлова Н.Е., Кравцов Н.А., Латышев Л.Н., Мележик В.А., Петров В.П., Радченко М.К., Радченко А.Т., Смолькин В.Ф., Федотов Ж.А. Имандра-Варзугская зона карелид (геология, геохимия, история развития). Ленинград: Наука, 1982. 280 с.
- Калиткин Н.Н. Численные методы. Москва: Наука, 1978. 512 с.
- Каратаев Г.И., Ватлин Б.П., Захарова Т.Л. Методика комплексной геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. Новосибирск: Наука, 1973. 167 с.
- Петромагнитная карта геологических формаций восточной части Балтийского щита. Масштаб 1 : 100 000. Под ред. Н.Б. Дортман. Ленинград: Изд-во ВСЕГЕИ, 1977.
- Петроплотностная карта геологических формаций восточной части Балтийского щита. Масштаб 1 : 100 000. Под ред. Н.Б. Дортман, М.Ш. Магида. Ленинград: Изд-во ВСЕГЕИ, 1977.
- Петрофизика. Под ред. Н.Б. Дортман. Москва: Недра, 1992. Т. 1. 391 с.; Т.3. 286 с.
- Петрофизика кристаллических пород рудных районов Кольского полуострова. Под ред. В.И. Павловского. Ленинград: Наука, 1982. 119 с.
- Пожиленко В.И., Гавриленко Б.В., Жиров Д.В., Жабин С.В. Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. 359 с.
- Радченко А.Т., Балаганский В.В., Виноградов А.Н., Голионко Г.Б., Петров В.П., Пожиленко В.И., Радченко М.Г. Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита (объяснительная записка к тектонической карте масштаба 1 : 500 000). Санкт-Петербург: Наука, 1992. 110 с.
- Свяженинов Ф.И., Докучаева В.С., Яковлев Ю.Н., Гринченко Б.М., Филатова В.Т., Хохлова Т.Л., Орсоев Д.А., Жаров В.С. Перспективы никеленосности Мончегорского рудного района. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 1988. 39 с.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. Под ред. Н.Б. Дортман. Москва: Недра, 1976. 527 с.
- Филатова В.Т. Влияние напряженно-деформированного состояния среды на формирование ослабленных зон в архейском фундаменте северо-восточной части Балтийского щита. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 3. С. 41—52.
- Филатова В.Т. Мобильно-проницаемые зоны в фундаменте северо-восточной части Балтийского щита и условия их локализации. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 1. С. 50—62.

- <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i1.2012.116577>.
- Филатова В.Т. Объемная модель Мончегорского рудного района на основе гравимагнитных данных. *Отечественная геология*. 1995. № 10. С. 65—72.
- Филатова В.Т. Оценка напряженно-деформированного состояния геологического фундамента Мурманской области в связи с строительной и хозяйственной деятельностью человека. *СтройМного*. 2017. № 4(9). Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_32330528_72027108.pdf.
- Филатова В.Т. Численная реализация методов интерпретации геофизических данных при построении структурно-геологической модели Цагинского габбро-лабрадоритового массива (Кольский полуостров). *Геоинформатика*. 2019. № 4. С. 23—38.
- Юдин Б.А. Габбро-лабрадоритовая формация Кольского полуострова и ее металлогения. Ленинград: Недра, 1980. 167 с.
- Юдин Б.А., Кацеблин П.Л. Петрофизические особенности нижнепротерозойских габбро-лабрадоритовых массивов Кольского полуострова. В кн.: Петрофизическая характеристика советской части Балтийского щита. Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1976. С. 50—52.
- Crouch, S.L., & Starfield, A.M. (1983). *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*. London: George Allen & Unwin, 328 p.
- Mitrofanov, F.P., Pozhilenko, V.I., Smolkin, V.F., Arzamastsev, A.A., Yevzerov, V.Ya., Lyubtsov, V.V., Shipilov, E.V., Nikolayeva, S.B., Fedotov, Zh.A. (1995). *Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield)*. Apatity: Publishing House of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 144 p.
- Filatova, V.T. (2009). Evaluation of the stressed deformed State of the Earth's crust in the north-eastern part of the Baltic Shield in the Late Archaean. *Doklady Earth Sciences*, 424(1), 118—122. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X0910255>.
- Filatova, V.T. (2014). Formation of Frame Tectonogens in the Northeastern Part of the Baltic Shield. *Doklady Earth Sciences*, 455(2), 430—435. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X14040047>.

Peculiar features of correlation between petrophysical signatures of rocks and distribution of geophysical heterogeneities in the Monchegorsk ore area (Kola Peninsula, northeastern Baltic Shield)

V. T. Filatova, 2021

Geological Institute of the Federal Research Centre «Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences», Apatity, Russia

The current article presents stratified data on physical properties of rocks and ores from the Monchegorsk ore area (Kola region). The constructed petrodensity and petromagnetic maps reflect peculiar features of changes in petrophysical parameters of both Paleoproterozoic intrusive rocks and host rocks at the Archean basement of the area. To assess the complementarity degree of physical properties of the rocks and geophysical fields, we additionally analyzed the structure of geophysical anomalies (Δg , ΔZ) in the study area. It allowed constructing a distribution scheme for geophysical heterogeneity in the area and assessing their nature.

The conducted studies showed that nickel-bearing and potentially nickel-bearing

intrusions in the Monchegorsk ore area were highly dense, but composed of weakly magnetic rocks. Layering of the gabbro-labradorite massif of the Main Ridge is reflected in petrophysical parameters, i. e. endocontact gabbro and gabbro-norite show an increased density and magnetic susceptibility compared to leucocratic gabbro and labradorite in the core of the intrusion. Thus, petrophysical data indicate a general increase in the basicity of the rocks towards the bottom of the intrusion.

The discrepancy between intense geophysical anomalies and physical parameters of near-surface rocks of the block adjacent to the gabbro-labradorite massif of the Main Ridge in the southeast was revealed. This fact indicates a layer of dense rocks under the supracrustal basement rocks (a complex of gneisses and amphibolized volcanic-sedimentary rocks) and rocks of the Imandra-Varzuga structure. This layer can be composed of potentially nickel-bearing rocks of the Imandra complex, including intrusions of the clinopyroxene-wehrlite formation series exposed in some areas.

According to the configuration pattern of the identified axes of local magnetic anomalies, the Archean blocks are considered isolated areas given the uniform pattern they create, i. e. Belomorian — isometric structures, Kola — linearly extended. Therefore, during transformation of the structural plan in the Paleoproterozoic, the Archean blocks gave differentiated responses to the emerging stress-strain state of the environment and were subject to heterogeneous deformations.

The performed work, including integrated results of petrophysical studies with the analysis of the structure of geophysical anomalies in the ore region, is relevant in substantiating a strategy for prospecting for new ore occurrences and patterns of their localization, as well as for developing criteria for predicting industrial ores in the region. At the same time, the studies carried out make it possible to answer questions related to the reconstruction of the geodynamic settings that took place during the formation of the region's crust.

Key words: Monchegorsk ore area, Kola region, physical properties of rocks, geophysical fields, petrophysical research, forecasting industrial ores, numerical modeling.

References

- Galichanina, L.D., Yudin, B.A., Sarakhanov, V.K., Grinchenko, B.M., Dokuchaeva, V.S., Dubrovskiy, M.I., Latyshev, L.N., & Tyuremnov, V.A. (1976). *Petrophysical characteristics of the Monchegorsk ore area*. In *Petrophysical characteristics of the Soviet part of the Baltic Shield* (pp. 53—57). Apatity: Publ. by the Kola Branch of the USSR Academy of Sciences (in Russian).
- Zagorodnyy, V.G., Predovskiy, A.A., Basalaev, A.A., Batieva, I.D., Borisov, A.E., Vetrin, V.R., Voloshina, Z.M., Dokuchaeva, V.S., Zhangurov, A.A., Kozlova, N.E., Kravtsov, N.A., Latyshev, L.N., Melezhik, V.A., Petrov, V.P., Radchenko, M.K., Radchenko, A.T., Smolkin, V.F., & Fedotov, J.A. (1982). *Imandra-Varzuga zone of the Karelides (geology, geochemistry, history development)*. Leningrad: Nauka, 280 p. (in Russian).
- Kalitkin, N.N. (1978). *Numerical methods*. Moscow: Nauka, 512 p. (in Russian).
- Karataev, G.I., Vatlin, B.P., & Zakharova, T.L. (1973). *Methodology for a complex geological interpretation of gravitational and magnetic anomalies*. Novosibirsk: Nauka, 167 p. (in Russian).
- Dortman, N.B. (Ed.). (1977). *Petromagnetic map of geological formations in the eastern Baltic Shield. Scale 1 : 100 000*. Leningrad: Publ. by VSEGEI (in Russian).
- Dortman, N.B., & Magid, M.Sh. (Eds.). (1977). *Petrodensity map of geological formations in the eastern Baltic Shield. Scale 1 : 100 000*. Leningrad: Publ. by VSEGEI (in Russian).
- Dortman, N.B. (Ed.). (1992). *Petrophysics*. (Vol. 1, 391 p.; Vol. 3, 286 p.). Moscow: Nedra (in Russian).
- Pavlovsky, V.I. (Ed.) (1982). *Petrophysics of crystalline rocks in ore districts of the Kola Peninsula*. Leningrad: Nauka, 119 p. (in Russian).
- Pozhilenko, V.I., Gavrilenko, B.V., Zhironov, D.V., & Zhabin, S.V. (2002). *Geology of mineral areas of the Murmansk region*. Apatity: Publ. by the

- Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 359 p. (in Russian).
- Radchenko, A. T., Balaganskiy, V. V., Vinogradov, A. N., Golionko, G. B., Petrov, V. P., Pozhilenko, V. I., & Radchenko, M. K. (1992). *Pre-cambrian tectonics of the northeastern Baltic Shield (explanatory note to the tectonic map, scale 1 : 500 000)*. St. Petersburg: Nauka, 111 p. (in Russian).
- Sviyazheninov, F. I., Dokuchaeva, V. S., Yakovlev, Yu. N., Grinchenko, B. M., Filatova, V. T., Khokhlova, T. L., Orsoev, D. A., & Zharov, V. S. (1988). *Potential nickel content of the Monchegorsk ore area*. Apatity: Publ. by the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 39 p. (in Russian).
- Dortman, N. B. (Ed.) (1976). *Petrophysical properties of rocks and minerals (petrophysics). Geophysics Handbook*. Moscow: Nedra, 527 p. (in Russian).
- Filatova, V. T. (2009). Impact of the stress-strain state of the environment on formation of weakened zones in the Archean basement in the northeastern Baltic Shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 31(3), 41—52 (in Russian).
- Filatova, V. T. (2012). Mobile-permeable zones in the foundation of the north-eastern part of the Baltic Shield and the conditions for their localization. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 34(1), 50—62. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i1.2012.116577> (in Russian).
- Filatova, V. T. (1995). Volumetric model of the Monchegorsk ore area based on gravimagnetic data. *Otechestvennaya geologiya*, (10), 65—72 (in Russian).
- Filatova, V. T. (2017). Estimation of the stress-strain state of the geological basement of the Murmansk region in relation to human construction and economic activities. *StroyMnogo*, (4). Retrieved from https://elibrary.ru/download/elibrary_32330528_72027108.pdf (in Russian).
- Filatova, V. T. (2019). Numerical implementation of methods for the interpretation of geophysical data in the construction of a structural-geological model of the Tsaga gabbro-labradorite massif (Kola Peninsula). *Geoinformatika*, (4), 23—38 (in Russian).
- Yudin, B. A. (1980). *Gabbro-labradorite formation of the Kola Peninsula and its metallogeny*. Leningrad: Nauka, 169 p. (in Russian).
- Yudin, B. A., & Katseblin, P. L. (1976). Petrophysical features of Lower Proterozoic gabbro-labradorite massifs on the Kola Peninsula. In *Petrophysical characteristics of the Soviet part of the Baltic Shield* (pp. 50—52). Apatity: Publ. by the Kola Branch of the USSR Academy of Sciences (in Russian).
- Crouch, S. L., & Starfield, A. M. (1983). *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*. London: George Allen & Unwin, 328 p.
- Mitrofanov, F. P., Pozhilenko, V. I., Smolkin, V. F., Arzamastsev, A. A., Yevzerov, V. Ya., Lyubtsov, V. V., Shipilov, E. V., Nikolayeva, S. B., Fedotov, Zh. A. (1995). *Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield)*. Apatity: Publishing House of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 144 p.
- Filatova, V. T. (2009). Evaluation of the stressed deformed state of the Earth's crust in the north-eastern part of the Baltic Shield in the Late Archaean. *Doklady Earth Sciences*, 424(1), 118—122. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X09010255>.
- Filatova, V. T. (2014). Formation of Frame Tectonogens in the Northeastern Part of the Baltic Shield. *Doklady Earth Sciences*, 455(2), 430—435. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X14040047>.

Особливості кореляційного зв'язку петрофізичних характеристик порід з розподілом геофізичних неоднорідностей у межах Мончегорського рудного району (Кольський півострів, північний схід Балтійського щита)

В.Т. Філатова, 2021

Геологічний інститут Федерального дослідного центру «Кольський науковий центр Російської академії наук», Апатити, Росія

Наведено результати досліджень щодо систематизації отриманих даних стосовно фізичних властивостей гірських порід і руд, поширених у Мончегорському рудному районі (Кольський регіон). Побудовано петрогустинну й петромагнітну карти, які відображають особливості зміни петрофізичних параметрів як інтрузивних порід, що сформувалися в палеопротерозої, так і вмісних порід архейського фундаменту району. Для оцінювання ступеня комплексності фізичних властивостей порід і геофізичних полів додатково виконано аналіз структури геофізичних аномалій (Δg , ΔZ), які спостерігають у межах досліджуваної території, що дало змогу побудувати схему розподілу геофізичних неоднорідностей району та оцінити їх характер.

Згідно з дослідженнями, у Мончегорському рудному районі нікеленосні та потенційно нікеленосні інтрузії мають підвищену густину, але складені слабوماгнітними породами. Розшарування габро-лабрадоритового масиву Головного хребта відображене у петрофізичних параметрах: ендоконтатні габро і габро-норити мають підвищену густину і магнітну сприйнятливість порівняно з такими параметрами лейкократових габро і лабрадоритів ядерної частини інтрузиву. Таким чином, петрофізичні дані вказують на загальне збільшення основності порід до придонної частини інтрузії.

Виявлені невідповідності інтенсивних геофізичних аномалій і фізичних параметрів приповерхневих порід блока, що примикає з південного сходу до габро-лабрадоритового масиву Головного хребта, вказують на те, що під супракрystalними породами фундаменту (комплекс гнейсів і амфіболітів по вулканогенно-осадових породах) і породами Імандра-Варзуги залягає пласт щільних порід. Цей пласт може бути складений потенційно нікеленосними породами Імандрівського комплексу із включенням інтрузій клінопіроксеніт-верлітового формаційного ряду, відслонених на окремих ділянках.

Архейські блоки за характером зміни виявлених осей локальних магнітних аномалій виділено як відособлені райони за однорідністю створюваного малюнка: Біломорський — ізометричні структури, Кольський — лінійно-протяжні. Отже, в період перебудови структурного плану в палеопротерозої архейські блоки реагували диференційовано на виникнення напружено-деформованого стану середовища і зазнавали неоднорідних деформацій.

Виконана робота, що охоплює комплексування результатів петрофізичних досліджень з аналізом структури геофізичних аномалій у межах рудного району, актуальна при обґрунтуванні стратегії пошуків нових рудопроявів і закономірностей їх локалізації, а також для розробки критеріїв прогнозування промислових руд у районі. При цьому результати дослідження дають можливість відповідати на питання, пов'язані з реконструкцією геодинамічних обстановок, що існували під час формування земної кори регіону.

Ключові слова: Мончегорський рудний район, Кольський регіон, фізичні властивості порід, геофізичні поля, петрофізичні дослідження, прогнозування промислових руд, чисельне моделювання.