

УДК 550.83:552.016

# Структурные особенности эклогитсодержащих комплексов севера Урала по гравимагнитным данным

**Т.А. Пономарева**

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН

167982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54. E-mail: TAPonomareva@inbox.ru

*(Статья поступила в редакцию 22 октября 2019 г.)*

Изложены результаты комплексных петрофизических и геофизических исследований марункеуского и неркаюского комплексов севера Урала. Выполнена качественная интерпретация магнитного и гравитационного полей. Показано, что широкий диапазон изменения магнитных свойств пород эклогитсодержащих комплексов не всегда связан с напряженностью магнитного поля. Напротив, контрастное распределение плотности в изучаемых комплексах фиксируется в локальных аномалиях повышенной интенсивности в гравитационном поле и является главным источником информации о глубинном строении неркаюского и марункеуского комплексов. В статье большое внимание уделяется анализу локальных аномалий, оказывающих существенное влияние на характер аномального гравитационного поля. Выделенным локальным аномалиям верхней и средней земной коры соответствуют участки высокоплотных (более основных) пород неркаюского и марункеуского комплексов. Результаты качественной интерпретации гравитационного поля, сходство в расшифровке глубинных характеристик эклогитсодержащих комплексов по локальным аномалиям и установление связи их с картируемыми с поверхности объектами позволяют предположить единую глубинную природу образования неркаюского и марункеуского комплексов севера Урала.

Ключевые слова: *Приполярный, Полярный, Урал, марункеуский, неркаюский, эклогитсодержащий, комплекс, глубинное строение, петрофизическая характеристика, удельная магнитная восприимчивость, плотность, геофизические поля.*

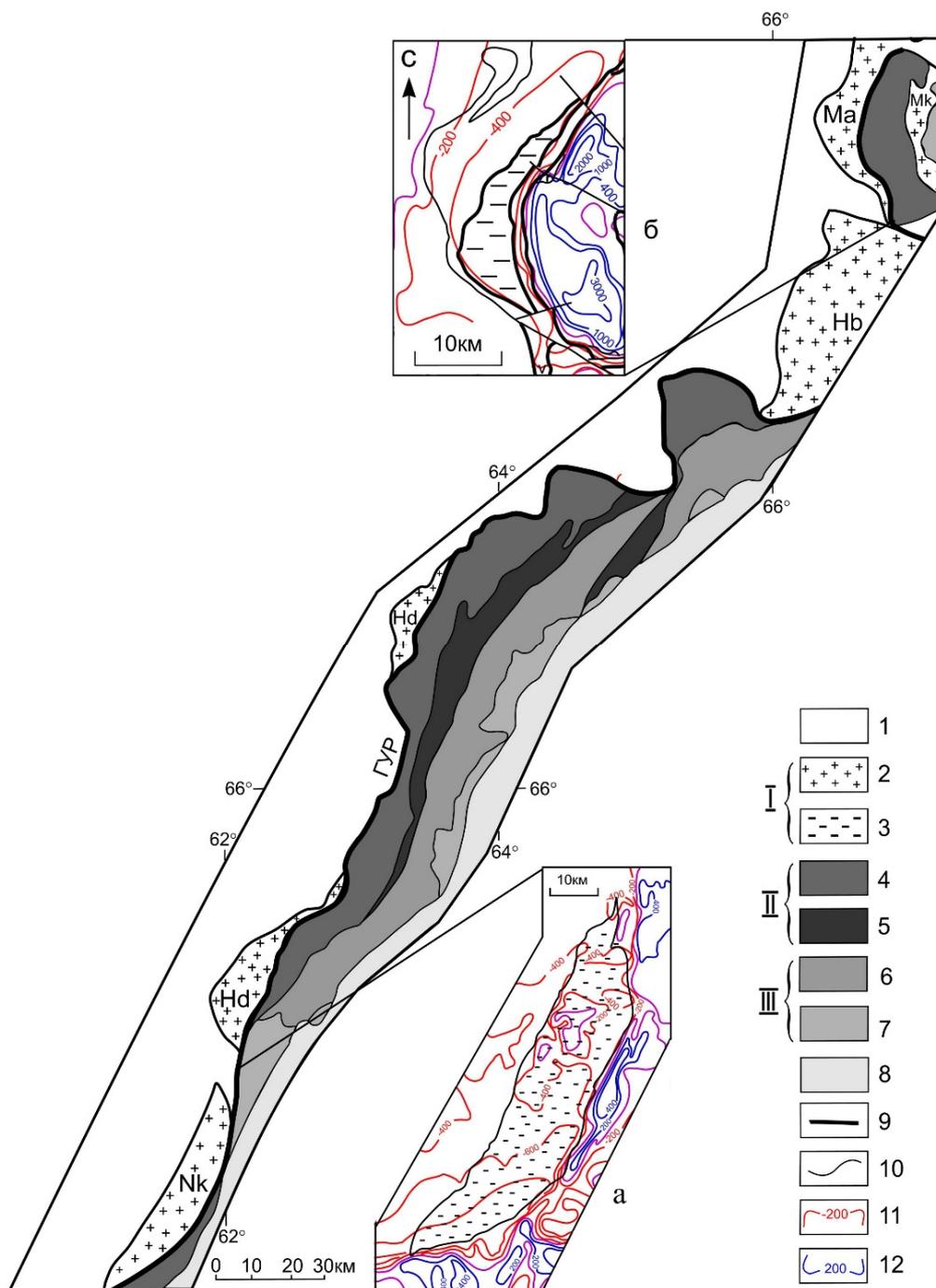
DOI: 10.17072/psu.geol.19.1.25

## Введение

На севере Урала выделяют два эклогитсодержащих метаморфических комплекса (рис.1): неркаюский эклогит-сланцевый на Приполярном Урале и марункеуский эклогит-гнейсовый на Полярном Урале (Пыстин, 1994; Стратиграфические схемы..., 1993; Душин, Сердюкова, 2007). Широкий разброс возрастных датировок и слабая изученность первичного состава протолитов метаморфитов обусловили противоречивость мнений геологов о времени и способах образования рассматриваемых комплексов. Докембрийские значения возраста пород, полученные по метаморфитам и минералам из них, а также структурный план метаморфических толщ, отличающийся от более молодых отложений, позволяют одним исследователям отнести эклогитсодержащие комплексы к раннепротерозойским образованиям (Андреичев и др., 2005; Андреичев, 2007) и считать

их «отторженцами» кристаллического фундамента древних платформ (Пыстин и др., 1994; Пыстин и др., 2019). Согласно другим работам (Glodny et al., 2003; Селятицкий, Куликова, 2017), высокобарические комплексы, приуроченные к Главному Уральскому разлому и пространственно ассоциирующиеся с гипербазитовыми массивами, относятся к фанерозойской истории (уралидам) Урала.

В статье изложен преобладающий объем проделанной работы, связанной с геофизическими исследованиями и получением информации о глубинном строении эклогитсодержащих комплексов. Глубинная характеристика геологических образований может рассматриваться как «память» о геодинамических процессах прошлого и использоваться в качестве дополнительного материала для подтверждения или опровержения ныне существующих концепций развития литосферы Тимано-Северо-Уральского региона.



**Рис. 1.** Схема расположения структурно-вещественных комплексов севера Урала (Пыстин, 1994; Стратиграфические схемы..., 1993; Душин и др., 2007). Отдельно во фрагментах выделены марункеуский эклогит-гнейсовый (а) и неркаюский эклогит-сланцевый (б) комплексы в магнитном поле: I–III – петрофизические зоны: I – палеоконтинентальная, II – палеоокеаническая, III – палеоостроводужная; 1 – верхнедокембрийско-палеозойские комплексы палеоконтинентального сектора севера Урала; 2 – нижнедокембрийские метаморфические образования; 3 – эклогитсодержащие комплексы; 4 – ультраосновные породы райизко-войкарского комплекса (O–S1); 5 – базиты кершорского и лагортинского комплексов (O3–S1); 6 – гранитоиды собского и конгорского комплексов (S2–D); 7 – вулканогенно-осадочные образования (O–D); 8 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 9 – Главный Уральский разлом (надвиg); 10 – границы структурно-вещественных комплексов; 11–12 – изолинии магнитного поля ( $\Delta T$ ): 11 – отрицательные, 12 – положительные. Названия докембрийских комплексов: Nk – неркаюский, Hd – хордьюский (PR?), Hm – хараматалоуский, Hb – харбейский, Ma – марункеуский, Mk – малыкский

При изучении глубинного положения комплексов в земной коре решались следующие петрофизические и геофизические задачи: измерение и обработка физических параметров пород; изучение зависимости физических свойств от вещественного состава и степени метаморфизма пород; исследование зависимостей между плотностью и магнитной восприимчивостью; проведение качественной интерпретации гравитационного поля: изучение характерных особенностей изменений физических полей, различающихся по знаку, интенсивности, простиранию и морфологии аномальных зон, пространственно связанных с изучаемыми комплексами; выделение и оконтуривание локальных аномалий или аномальных зон на различных глубинных срезах земной коры; установление связи локальных аномалий гравитационного поля с изучаемыми геологическими объектами.

#### **Объект и методика комплексных исследований**

При изучении глубинного строения неркаюского и марункеуского комплексов использован системный подход, который состоял из ряда последовательных, ранее отработанных, рабочих приемов. На первом этапе выполнялись многочисленные измерения плотности и магнитной восприимчивости магматических пород корового происхождения или многократно преобразованных мантйных пород, выведенных на земную поверхность. Данные о физических свойствах пород эклогитсодержащих комплексов севера Урала получены с образцов, собранных во время полевых геологических работ и любезно предоставленных научными сотрудниками Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, а также заимствованы из фондовых работ и научных публикаций (Пономарева, Пыстин, 2014, 2017). Авторские измерения проводились лабораторными методами. Плотность определялась из отношения веса образца породы к его объему. В свою очередь объем образца горной породы установлен из результатов гидростатического взвешивания и равен разности значений веса исследуемого образца породы в воздухе и в жидкости. Магнитные свойства пород также

были получены в лабораторных условиях с измерительного прибора KAPPABRIDGE KLY-2 с высокой точностью (погрешность составляет 0.2–1%). Значения плотности и удельной магнитной восприимчивости анализировались совместно с оценкой степени изменчивости физических свойств в зависимости от вещественного состава пород, от характера и степени метаморфизма, что в свою очередь позволяло систематизировать их и представить в виде серии обобщенных таблиц.

Наибольший интерес при интерпретации геофизических полей представляют данные средних значений физических параметров. Для определения средних значений плотности по неркаюскому и марункеускому комплексам в работе использовался пространственно-статистический анализ, с помощью которого вначале были построены гistogramмы распределения плотности однотипных пород по отдельным комплексам, а затем рассчитана средняя плотность по каждому исследуемому комплексу.

При интерпретации магнитного поля определялась степень влияния магнитных свойств пород на интенсивность магнитного поля (Карта аномального магнитного..., 2004). Качественная интерпретация гравитационного поля заключалась в построении и анализе карт-схем локальных аномалий, отражающих распределение гравитирующих объектов на различной глубине в земной коре. В основу расчета трансформированных карт положен метод послойного исключения аномальных составляющих из наблюдаемого гравитационного поля или метод геологической редукции (Маловичко, Тарунина, 1981). В процессе интерпретации геофизических полей учитывались интенсивность аномалий, форма, размеры, линейная направленность и глубинное размещение аномалеобразующих источников в земной коре.

#### **Геологическое положение эклогитсодержащих комплексов севера Урала**

Неркаюский эклогит-сланцевый комплекс находится в северо-восточной части Приполярного Урала (рис.1, а). Комплекс шириной 15 км заключен между двумя меридиональными глубинными разломами. На

востоке породы неркаюского комплекса контактируют с габбро и ультраосновными породами Олыся-Мусюрского массива по Главному Уральскому разлому, а на западе комплекса установлен контакт вдоль Эрепшорского разлома со слабометаморфизованными вулканогенно-осадочными отложениями керешорского комплекса (RF<sub>2-3</sub>). Комплекс, сложенный эклогитами, амфиболитами и гранат-сланцевыми кристаллическими сланцами, представлен одноименным тектоническим блоком (Пыстин, 1994).

Марункеуский эклогит-гнейсовый комплекс располагается в крайней северной (полярной) части Уральской складчатой области в пределах Харбейско-Марункеуского блок-антиклинория (рис. 1, б). Он находится к западу от Сыумкеуского гипербазитового массива, входящего в состав палеозойской офиолитовой ассоциации. На юге комплекс по Лонгот-Юганскому разлому глубокого заложения граничит с нижнепротерозойскими образованиями харбейского комплекса, на западе и северо-западе – с вулканогенно-осадочными отложениями верхнего докембрия. На востоке комплекса выделяется узкая обрамляющая (в несколько сотен метров) полоса относительно слабометаморфизованных пород, идентичных по составу западным и северо-западным верхнедокембрийским вулканогенно-осадочным отложениям, отделяющая марункеуский комплекс от Сыумкеуского массива. В составе комплекса выделяются собственно эклогиты, эклогитподобные породы и разнообразные метаморфиты по ним: апоэклогитовые амфиболиты, гранат-глаукофановые и глаукофановые сланцы, а также гнейсы, кристаллические сланцы и другие метаморфические породы (Пыстин, 1994; Стратиграфические схемы..., 1993; Душин, Сердюкова, 2007).

Эклогитсодержащие комплексы севера Урала характеризуются линейным типом складчатости северо-западной направленности, высокобарическими условиями ранних этапов метаморфизма пород и отсутствием или слабым проявлением процессов гранитизации. Породы эклогитсодержащих комплексов многократно дислоцированы и преобразованы последовательно проявившимися метаморфическими процессами. Фрагменты наиболее ранних структурных элементов

представлены линейными складками преимущественно западно-северо-западной ориентировки, поперечной генеральному простиранию уралид (Андреичев и др., 2005).

### **Петрофизические характеристики неркаюского и марункеуского эклогитсодержащих комплексов**

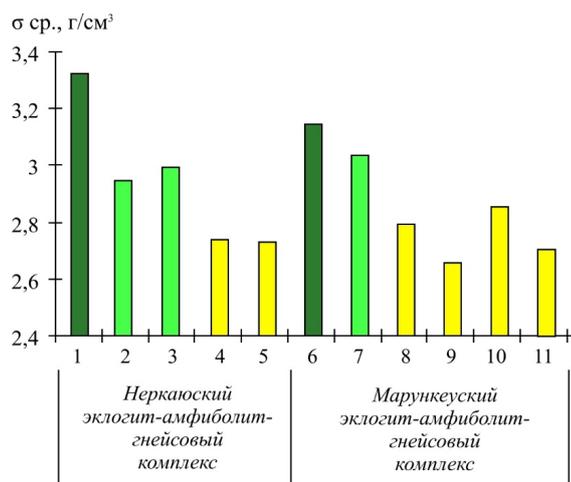
На этапе петрофизических исследований измерены физические свойства пород неркаюского (рис.1, а) и марункеуского (рис.1, б) комплексов. Полученные данные были использованы для построения гистограмм распределения плотности (рис. 2). Значения магнитной восприимчивости проанализированы, систематизированы и занесены в табл. 1 и 2, определена единая корреляционная связь между физическими свойствами (рис. 3) и найдены причины изменения физических свойств.

По анализу гистограмм распределения плотности пород видно (рис. 2), что средние значения плотности ( $\sigma_{cp}$ ) пород неркаюского комплекса распределяются следующим образом:  $3.32 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – у эклогитов;  $2.99 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – гранатовых амфиболитов;  $2.94 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – у амфиболовых, эпидот-глаукофановых и альбит-эпидот-хлорит-актинолитовых сланцев;  $2.73 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – у мезократовых и лейкократовых кристаллических сланцев и  $2.72 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – у хлорит-мусковит-альбит-кварцевых сланцев (Пономарева, Пыстин, 2014; Пономарева и др., 2016).

Плотностные характеристики пород марункеуского комплекса, представленные на гистограмме (рис. 2), имеют следующие средние значения:  $3.18 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – у метаперидитов;  $3.07 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – у габбро;  $3.14 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – у эклогитов;  $3.03 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – у амфиболитов;  $2.68 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – у плагиогнейсов и  $2.85 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – у мигматизированных пород и мигматитов (Пономарева, Пыстин, 2014; 2019).

Из анализа гистограмм распределения плотности вытекает общая для обоих комплексов зависимость плотности от основности пород.

Самыми высокими значениями плотности характеризуются породы ультраосновного и основного составов (метаперидиты, metabазиты, эклогиты, симплектит-эклогиты и амфиболиты).



**Рис. 2.** Гистограммы плотности пород эклогитсодержащих комплексов севера Урала: 1 – эклогиты, эклогитоподобные породы, 2 – амфиболиты, эпидот-глаукофановые и альбит-эпидот-хлорит-актинолитовые сланцы, 3 – эпидот-гранатовые амфиболиты, 4 – мезократовые и лейкократовые плагиогнейсы, 5 – хлорит-мусковит-альбит-кварцевые сланцы, 6 – эклогиты, 7 – амфиболиты, 8 – очковые гнейсы, 9 – амфиболитовые гнейсы, 10 – мигматиты, 11 – кварциты

Плотностные характеристики резко понижаются в местах, где породы подвержены процессам мигматизации (марункеуский комплекс), и на тех участках, где в разрезах преобладают плагиогнейсы (марункеуский комплекс) или кристаллические сланцы (неркаюский комплекс). Для решения геофизических задач были вычислены значения средней плотности. Так, для неркаюского эклогит-сланцевого комплекса  $\sigma_{ср}$  составляет  $2,96 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а для марункеуского эклогит-гнейсового –  $3,00 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Магнитные свойства пород эклогитсодержащих комплексов имеют очень широкий спектр магнитной восприимчивости (табл. 1, 2). У эклогитов, амфиболитов и гранат-глаукофановых сланцев и других пород неркаюского комплекса удельная магнитная восприимчивость ( $\chi_{уд}$ ) варьирует в пределах от 18.85 до  $95.45 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг. У кристаллических сланцев  $\chi_{уд}$  меняется в изучаемой выборке от 6.68 до  $28.19 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг; у актинолит-хлорит-альбит-эпидотовых сланцев по амфиболитам и эклогитам  $\chi_{уд}$  распределена от 227.74 до  $303.36 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг, что в несколько десятков и сотен раз больше, чем у хлорит-мусковит-альбитовых сланцев по

гнейсам, пределы значения  $\chi_{уд}$  которых составляют  $6.68-28.19 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг (табл. 1).

Удельная магнитная восприимчивость марункеуского комплекса пород варьирует в более широких пределах (табл. 2). Наиболее магнитными являются метаперидотиты, у них значения  $\chi_{уд}$  рассредоточились в интервале от 290 до  $1513 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг. Наиболее высокое значение удельной магнитной восприимчивости отмечено у серпентинизированного метаперидотита, содержащего вкрапления новообразованного магнетита. У остальных пород основного состава  $\chi_{уд}$  изменяется от 13.43 до  $339.66 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг. При этом интервал значений  $\chi_{уд}$  у неизменных или слабо измененных первичных магматических пород – габброидов – составляет  $95.45-339.66 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг. Метаморфические породы основного состава, представленные эклогитами и амфиболитами, характеризуются относительно небольшими вариациями  $\chi_{уд}$  –  $13.43-28.49 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг. При этом массивные апогаббровые эклогиты отличаются от исходных габбро низкой удельной магнитной восприимчивостью ( $13.99-17.49 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг). Несколько выше этот показатель имеют полосчатые эклогиты ( $17.60-22.00 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг). Значения удельной магнитной восприимчивости амфиболитов ( $13.43-22.56 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг) перекрывают вариационные интервалы  $\chi_{уд}$  массивных и полосчатых эклогитов. Это может быть связано с тем, что в выборке присутствуют амфиболиты, образовавшиеся как по массивным (апогаббровым), так и по полосчатым (апобазальтовым) эклогитам. Породы кислого состава (плагиогнейсы и мигматиты) характеризуются наиболее низкими значениями  $\chi_{уд}$ , в пределах  $6.56-15.97 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг.

Результаты анализа магнитной восприимчивости пород неркаюского и марункеуского комплексов показали, что магнитные свойства пород при полиметаморфизме могут сильно меняться. Так, при эклоготизации габбро удельная магнитная восприимчивость снижается на порядок. Гранитизация, как правило, также приводит к снижению магнитной восприимчивости. Процессы низкотемпературного диафореза чаще всего сопровождаются повышением магнитной восприимчивости, это особенно характерно для ультраосновных пород. Напротив, при

средне-высокотемпературном диафторезе магнитная восприимчивость метаморфитов практически не меняется, что мы видим при сравнении  $\chi_{уд}$  эклогитов и апоэклогитовых амфиболитов (Уляшева и др., 2015).

При обработке материалов петрофизических исследований была выявлена еще одна

важная корреляционная связь между магнитными и плотностными параметрами, представленными в виде графика зависимости магнитной восприимчивости от плотности пород исследуемых комплексов (рис. 3).

**Таблица 1.** Магнитные свойства пород неркаюского комплекса

Номер пробы	Породы	Магнитная восприимчивость, $\chi$ , $\mu \times 10^{-8}$
<i>Основного состава</i>		
Н-114-1	Метадолерит	57.81
Н-145-2	Габбро-долерит	95.45
Н-168-1	Метагаббро	35.88
Н-138-1	Эклогиты	39.72
Н-145-1	Эклогиты	41.81
Н-145-3	Эклогиты	38.18
Н-146-2	Эклогиты	55.71
Н-146-3	Эклогиты	63.04
Н-151-2	Эклогиты	43.35
Н-207	Эклогиты	70.02
Н-223	Эклогиты	64.08
Н-138-1	Эклогиты	39.72
Н-145-1	Эклогиты	41.81
НК-18-1	Амфиболит	60.52
НК-19	Амфиболит	30.85
Н-102-1	Амфиболит	40.16
Н-103-1	Амфиболит	18.85
Н-105-1	Амфиболит	34.57
Н-108-1	Амфиболит	26.40
Н-108-2	Амфиболит	46.03
Н-209	Амфиболит	26.42
Н-214	Амфиболит	46.55
Н-218	Амфиболит	31.45
Н-61	Амфиболит	34.82
Н-209	Амфиболит	26.42
Н-214	Амфиболит	46.55
<i>Сланцы по амфиболитам и эклогитам</i>		
Н-182-2	Актинолит-хлорит-альбит-эпидотовый сланец	227.74
Н-182-3	Актинолит-хлорит-альбит-эпидотовый сланец	240.85
Н-184-1	Актинолит-хлорит-альбит-эпидотовый сланец	287.27
Н-185-1	Амфиболовый сланец	303.36
<i>Сланцы по гнейсам</i>		
НК-14	Хлорит-мусковит альбитовый сланец	19.19
НК-16	Кристаллический сланец	19.53
НК-16-1	Кристаллический сланец	12.48
НК-17	Кристаллический сланец	15.64
НК-25	Кристаллический сланец	28.19
Н-62	Кристаллический сланец	6.86

Таблица 2. Магнитные свойства пород марункеуского комплекса

Номер пробы	Породы	Магнитная восприимчивость, $\chi$ , $\text{п} \times 10^{-8}$
<i>Ультраосновного состава</i>		
409-02	Метаперидотит	290.00
409-01	Метаперидотит	726.00
406-01	Метаперидотит	1513.00
<i>Основного состава</i>		
404-01	Габбро	188.32
505-01	Габбро	95.45
505-10	Габбро	339.66
404-03	Пироповый эклогит	13.99
404-02	Пироповый эклогит	16.42
404-04	Пироповый эклогит	17.49
110-10	Альмандиновые эклогиты	21.33
110-23	Альмандиновые эклогиты	17.60
419-01	Альмандиновые эклогиты	22.00
414-01	Альмандиновые эклогиты	20.40
409-03	Апоэклогитовый амфиболит	28.49
414-02	Амфиболит	13.43
414-02	Амфиболит	22.56
414-06	Амфиболит	20.00
<i>Кислового состава</i>		
408-01	Биотит-полевошпатовый гнейс	8.73
408-01	Биотит-мусковит-полевошпатовый гнейс	7.56
408-02	Полевошпат-биотитовый гнейс	10.89
408-03	Гранат-мусковит-полевошпатовый гнейс	4.57
408-04	Кварц-полевошпат-биотит-мусковитовый гнейс	9.10
414-07	Мусковит-кварц-полевошпатовый гнейс	14.97
418-01	Мигматит	6.56
418-02	Мигматит	5.51

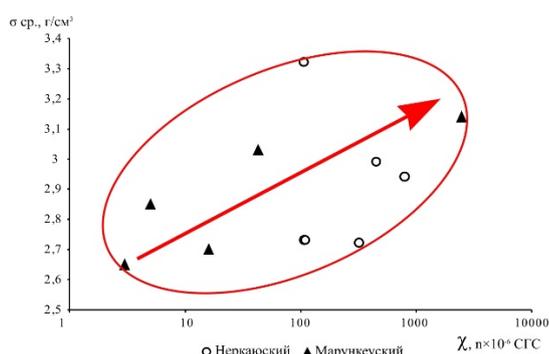


Рис. 3. Диаграмма зависимости удельной магнитной восприимчивости и плотности пород эклогитсодержащих комплексов

Прямолинейный график зависимости этих двух параметров показывает, что для высокоплотных пород характерны высокие значения удельной магнитной восприимчивости и, наоборот, породы с низкой плотностью практически немагнитны.

### Характер и особенности геофизических полей неркаюского и марункеуского эклогитсодержащих комплексов

На этапе качественной интерпретации геофизических полей важно было найти подтверждение выявленным при петрофизических исследованиях закономерностям изменения физических свойств пород, связанным с изменением состава пород, характера и степени метаморфизма, особенно низкотемпературного, и использовать их, потому что любые изменения в физических параметрах отражаются на повышении или понижении интенсивности аномалий гравитационного и магнитного полей.

Так, над неркаюским эклогит-сланцевым комплексом, породы которого имеют слабо- и среднемагнитные свойства, наблюдается отрицательное магнитное поле, напряженно-

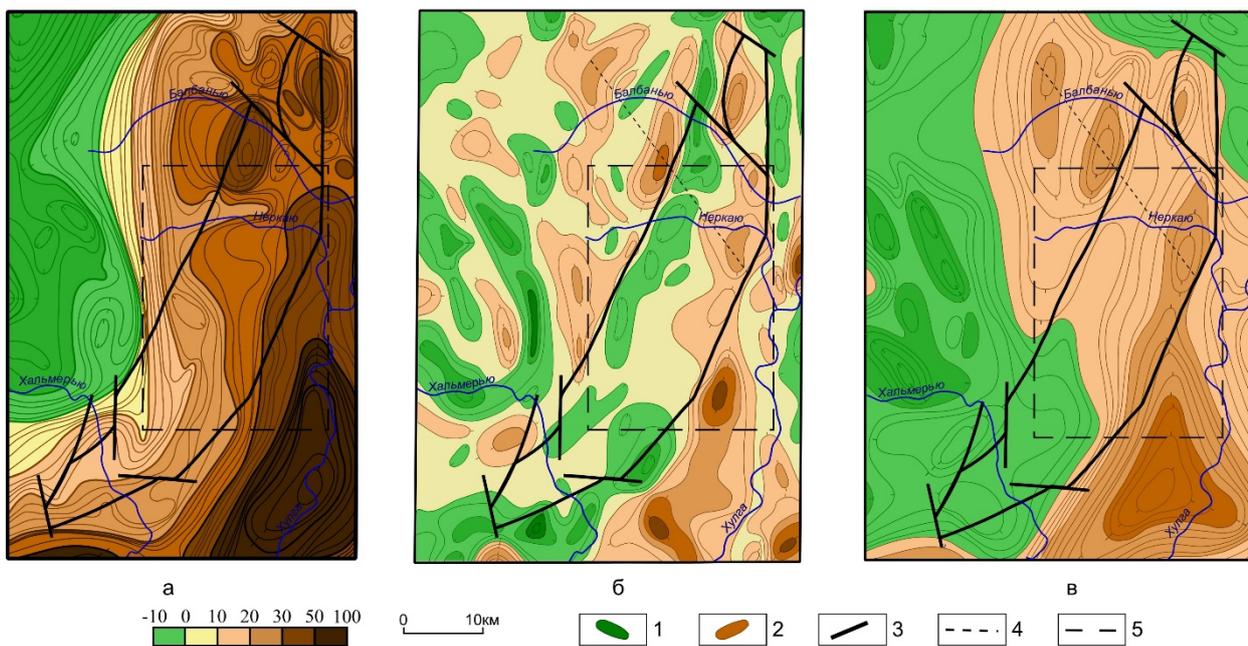
сти которого варьируют от минус 400 до минус 600 нТл (рис. 1, а). Только при деталь-ных геолого-геофизических исследованиях можно выделить отдельные локальные по-ложительные аномалии, оси которых имеют северо-западную ориентировку, совпадаю-щую с генеральным простиранием структур неркаюского комплекса (Пыстин, 1994).

Слабомагнитные метаморфические поро-ды (эклогиты, амфиболиты, плагиогнейсы, мигматиты) марункеуского комплекса также создают отрицательное магнитное поле. Магнитная аномалия, вытянутая в плане в север-северо-восточном направлении, имеет интенсивность до минус 500 нТл (рис.1, б). Основной вклад в север-северо-восточную ориентировку магнитных аномалий вносят зоны низкотемпературных диафоритов, об-разование которых связано с процессами формирования уралит. На восточной грани-це этой аномалии слабомагнитные породы

марункеуского комплекса резко контрасти-руют с сильномагнитными породами гипер-базитового массива Сьумкеу.

Несмотря на то, что породы неркаюского и марункеуского комплексов имеют доста-точно широкие пределы вариаций магнитной восприимчивости, они практически не по-вливали на характеристику магнитного поля. Поэтому магнитная восприимчивость поли-метаморфических образований в изучаемых комплексах является наименее стабильной их характеристикой.

В отличие от магнитного поля, на анома-лии которого влияют магнитные свойства пород верхней части разреза (первые кило-метры) земной коры, гравитационное поле отражает суммарный эффект плотностных неоднородностей всех структурно-вещественных слоев земной коры и верхней мантии (рис. 4,а; 5,а).



**Рис. 4.** *Отображение неркаюского эклогит-сланцевого комплекса Приполярного Урала в гравитационном поле: а – карта аномального гравитационного поля (Сводная гравиметрическая..., 1974); б – карта локальных аномалий близповерхностного слоя верхней коры; в – карта локальных аномалий средней коры. 1–2 – аномалии: 1 – положительные; 2 – отрицательные; 3 – тектонические границы неркаюского комплекса и смещающие их разломы; 4 – центральная ось зоны локальных максимумов, связанных с высокоплотными источниками аномалий, расположенными в средней коре; 5 – границы геологической карты*

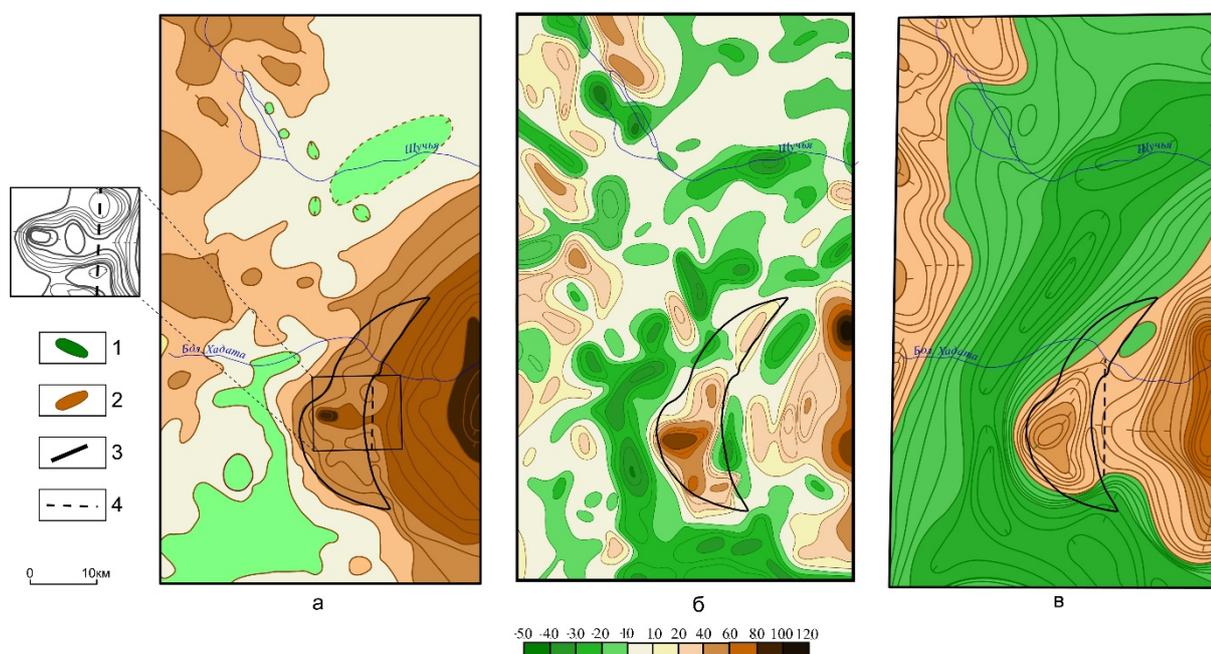
Ряд исследователей считает, что наиболее высокоградиентная часть аномального гравитационного поля обусловлена источниками аномалий, расположенными до глубин

12–15, реже 20 км (Ананьева и др., 1983). На этапе качественной интерпретации гравитационного поля эти объекты и являются главным предметом нашего изучения.

Качественная интерпретация гравитационного поля заключалась в анализе локальных карт-срезов ( $\Delta g_n$ ), отражающих распределение аномалеобразующих источников на различных глубинных срезах земной коры (рис. 4, б, в; рис. 5, б, в), совместно с петрофизическими и геологическими данными.

Положительное аномальное гравитационное поле над неркаюским комплексом по конфигурации (форме и размерам) и интенсивности аномалий делит его на две части: северо-восточную и северо-западную (рис. 4, а). Северо-восточная (нижняя) часть комплекса состоит из изометричных интенсивных положительных аномалий  $\Delta g_n$  в местах, где широко распространены породы основного состава (апоецлогитовые амфиболиты и

продукты их низкотемпературного диафтореза). Для них характерны, как было отмечено выше, самые высокие значения плотности и неширокий диапазон их изменения. Юго-западная часть комплекса характеризуется пониженными значениями поля силы тяжести, отсутствием аномалий и представлена параллельными изолиниями  $\Delta g_n$ , интенсивность которых уменьшается в юго-восточном направлении. Преимущественно отрицательное аномальное поле силы тяжести отмечается над большинством участков распространения слюдястых кристаллических сланцев разного состава и низкотемпературных диафторитов по ним. Они, как правило, имеют значительно меньшие плотности и более широкий разброс их значений.



**Рис. 5.** *Отображение марункеуского эцлогит-гнейсового комплекса пород Полярного Урала в гравитационном поле: а – карта аномального гравитационного поля; б – карта локальных аномалий близповерхностного слоя верхней коры; в – карта локальных аномалий средней коры. 1–2 – аномалии: 1 – положительные; 2 – отрицательные; 3 – тектонические границы марункеуского комплекса и смещающие их разломы; 4 – ось перегиба изоаномал в  $\Delta g_n$*

Резко меняют картину гравитационного поля трансформированные локальные поля (рис. 4, б, в). На карте локальных аномалий, которые дают представление о распределении аномалеобразующих объектов в близповерхностном слое земной коры (рис. 3, б), мы наблюдаем только северо-восточную часть комплекса, а вся юго-западная часть неркаюского комплекса относится к области пониженного и отрицатель-

ного поля. Линейная отрицательная аномалия, вытянутая вдоль северо-западной границы, близкой к Эрепшорскому разлому, соотносится с местами активного проявления низкотемпературного диафтореза, который и является главной причиной разуплотнения пород (Пономарева и др., 2016).

Различия в плотностных свойствах пород, слагающих северо-восточную и юго-западную части неркаюского комплекса, еще

более отчетливо проявились в локальных полях, отражающих распределение источников аномалий в средней коре на глубине 12.5–20 км (рис. 4,в). На данной карте в северо-восточной части комплекса выделена серия линзовидных положительных локальных аномалий одинаковой интенсивности. Аномалии объединяются в линейно вытянутую зону, которая пересекает неркаюский комплекс и окончательно отделяет от него юго-западную часть. Выделенная аномальная зона имеет выраженную север-северо-западную направленность и, возможно, отражает структурно-вещественные неоднородности нижнедокембрийского основания и прослеживается, по крайней мере, до ГУР (Главный Уральский разлом). Сравнение рис. 4,а–в свидетельствует о взаимосвязи поверхностных структур неркаюского комплекса с локальными аномалиями самой верхней и средней частей земной коры.

Над марункеуским комплексом, как и над ультраосновными породами Сыум-Кеуского массива, расположенными восточнее, наблюдается положительная аномалия  $\Delta g_n$  интенсивностью свыше 100 мГал, известная в литературе как Уральский супермаксимум. На западном крае этого максимума благодаря пережиму изолиний  $\Delta g_n$  отделяется обособленная аномалия интенсивностью 70 мГал (рис. 5,а). В локальном поле, где сосредоточены источники аномалий от близповерхностного слоя земной коры, происходит разделение комплекса по интенсивности и характеру аномалий, как и в неркаюском комплексе, на южную и северо-восточную части (рис. 5,б). Локальному максимуму в плане отвечают высокоплотные породы марункеуского комплекса, представленные метаперидотитами, эклогитами и апоэклогитовыми амфиболитами, выходящие на земную поверхность в южной части марункеуского блока, соотносимого со Слюдяной горкой. Напротив, над северо-восточной частью марункеуского комплекса отмечается слабоинтенсивные знакопеременные локальные аномалии, в плане которым соответствуют породы кислого состава: плагиогнейсы, гнейсы и продукты их мигматизации.

На уровне средней коры (рис. 5,в) в поле локальных аномалий наблюдается только «серпообразный» максимум, который схо-

жим образом соотносится с породами повышенной плотности (основности), обнажающимися в южной части марункеуского комплекса. Отсутствие северо-восточной части в картине локального поля предполагает незначительную глубину залегания пород более кислого состава.

### Заключение

В результате проведенных петрофизических и геолого-геофизических исследований глубинного строения эклогитсодержащих комплексов севера Урала можно сделать следующие выводы.

1. Существует единая прямая пропорциональная зависимость между плотностью и магнитной восприимчивостью. Так, для высокоплотных пород эклогитсодержащих комплексов характерны высокие значения удельной магнитной восприимчивости ( $\chi_{уд}$ ) и, наоборот, породы с низкой плотностью практически немагнитны.

2. Латеральная дифференцированность значений удельной магнитной восприимчивости практически не влияет на напряженность магнитного поля над неркаюским и марункеуским комплексами. Напротив, аномальное гравитационное поле и его локальные трансформанты содержат в себе ценные сведения о распределении плотностных неоднородностей в верхней и средней земной коре.

3. Анализ гравитационного поля позволил установить в неркаюском и марункеуском комплексах единую закономерность, проявившуюся в их делении на две части: северо-восточную и юго-западную (неркаюский комплекс) или северную и южную (марункеуский комплекс).

4. Пространственные связи локальных аномалий гравитационного поля на уровне средней коры с самыми высокоплотными (более основными) участками неркаюского (северо-восточная часть) и марункеуского (южная часть) комплексов являются дополнительным важным признаком их, возможно, единой глубинной природы образования.

*Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований РАН №15-18-5-17.*

**Библиографический список**

- Андреичев В. Л., Родионов Н. В., Ронкин Ю.Л. U-Pb и Sm-Nd датирование эклогитов марункеуского блока Полярного Урала: новые данные // *Метаморфизм, космические, экспериментальные и общие проблемы петрологии: матер. Международного (X Всероссийского) петрографического совещания*. 2005. Т.4. С. 17–19.
- Ананьева Е.М., Горонович Е.Б. и др. Методические рекомендации по интерпретации геофизических данных при крупномасштабном геологическом картировании. Свердловск: Уралгеология, 1983. 301 с.
- Андреичев В. Л., Ронкин Ю. Л., Серов П. А. и др. Новые данные о докембрийском возрасте эклогитов Марункеу (Полярный Урал) // *ДАН*. 2007. Т. 413, № 4. С. 503–506.
- Душин В. А., Сердюкова О. П., Малюгин А. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Листы Q-42-I, П. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 340 с.
- Карта аномально магнитного поля (ΔT)а России и прилегающих акваторий. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004.
- Маловичко А.К., Тарунина О.Л. Использование высших производных при обработке и интерпретации результатов геофизических наблюдений. М.: Недра, 1981. 186 с.
- Пономарева Т.А., Пыстин А.М. Петрофизическая характеристика пород полиметаморфических комплексов севера Урала // *Известия Коми НЦ УрО РАН*. 2014. №2. С.68–74.
- Пономарева Т.А. Петрофизическая зональность в структурно-вещественных комплексах севера Урала // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2017. № 1. С. 8–15.
- Пономарева Т.А., Пыстин А.М. Структурные особенности марункеуского эклогит-гнейсового комплекса Полярного Урала по гравимагнитным данным // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2019. № 2. С. 8–15.
- Пономарева Т.А., Пыстин А.М., Кушманова Е.В. Глубинная характеристика неркаюского эклогит-сланцевого комплекса Приполярного Урала по гравиметрическим данным // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2016. № 17. С. 9–15.
- Пыстин А. М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб.: Наука, 1994. 208 с.
- Пыстин А.М., Кушманова Е.В., Пыстина Ю.И., Панфилов А.В., Потапов И.Л. Возраст протолитов и геохронология метаморфизма неркаюского эклогит-сланцевого комплекса Приполярного Урала // *Вестник Пермского университета. Геология*. 2019. Т. 18, № 2 С. 96–107. DOI: 10.17072/pstu.geol.18.2.96
- Сводная гравиметрическая карта Северного, Приполярного и Полярного Урала в редукции Буге с  $\sigma = 2.67$  г/см<sup>3</sup> масштаба 1:200000 (второе поколение) / Урал. гос. ун-т. Свердловск, 1974.
- Селятицкий А.Ю., Куликова К.В. Эволюция химического состава граната при метаморфизме перидотитов УНР-комплекса Марун-Кей (Полярный Урал) // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2017. № 8. С. 36–43.
- Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). Екатеринбург: Уралгеолком, 1993.
- Уляшева Н. С., Пыстин А. М., Панфилов А.В., Потапов И.Л. Две серии первично-магматических пород в марункеуском эклогит-гнейсовом комплексе (Полярный Урал) // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2015. №11. С. 3–19.
- Glodny J., Austrheim H., Molina J. F., Rusin A., Seward D. Rb/Sr record of fluid-rock interaction in eclogites: The MarunKeu complex, Polar Urals, Russia // *Geoch. Cosm. Acta*. 2003. Vol. 67. P. 4353–4371.

## Structural Characteristics of Marunkeu Eclogite-Gneiss Complex in the Polar Urals Inferred from Gravitational magnetic data

T.A. Ponomareva

Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 54 Pervomayskaya Str., 167982 Syktyvkar, Russia

E-mail: TAPonomareva@inbox.ru

The paper presents the results of integrated petrophysical and geophysical studies of Marunkeu and Nerkeyu complexes in the north of the Urals. Qualitative interpretation of magnetic and gravitational fields is performed. It is shown that a wide range of changes in the magnetic properties of rocks of eclogite-containing complexes is not always connected with the magnetic field strength. On the contrary, contrasting density distribution in the studied complexes is recorded in the local anomalies of increased intensity in a gravitational field and is the main source of information on the deep structure of Nerkeyu and Marunkeu complexes. In this article, big attention is paid to the analysis of local anomalies that have a significant impact on the nature of the anomalous gravitational field. Dedicated local anomalies of the upper and middle crust represent areas of high-density (more mafic) rocks of Nerkeyu and Marunkeu complexes. The results of the qualitative interpretation of the gravity field, the similarity for the deep characteristics of eclogite complexes in local anomalies, and their connection with mapped surface objects allow suggesting a unified deep nature of Nerkeyu and Marunkeu complexes.

Keywords: *Circumpolar; Polar; Urals; Marunkeu; Nerkeyu; eclogite-containing; complex; deep structure; petrophysical characteristics; mass magnetic susceptibility; density; geophysical fields.*

## References

- Ananeva E.M., Goronovich E.B. et al.* 1983. Metodicheskie rekomendatsii po interpretatsii geofizicheskikh dannykh pri krupnomasshtabnom geologicheskom kartirovanii [Methodological recommendations for the interpretation of geophysical data in large-scale geological mapping]. *Uralgeologiya*, Sverdlovsk, p. 301. (in Russian)
- Andreichev V.L., Rodionov N.V., Ronkin Yu. L.* 2005. U-Pb and Sm-Nd datirovanie eklogitov Marunkeuskogo bloka Polyarnogo Urala: novye dannye [U-Pb and Sm-Nd dating of eclogites of the Marunke block of the Polar Urals: new data]. In: *Metamorfizm, kosmicheskie, eksperimentalnye I obshchie problem petrologii. Apatity. Kolskiy SC RAS*, pp. 17–19. (in Russian)
- Andreichev V.L., Ronkin Yu. L., Serov P.A. et al.* 2007. Novye dannye o dokembriyskom vozraste eklogitov Marunkeu (Polyarnyy Ural) [New data on the Precambrian age of the Marunkeu eclogites (the Polar Urals)]. *Doklady nauk o Zemle*, 413(4):503–506. (in Russian)
- Dushin V.A., Serdyukova O.P., Malyugin A.A. et al.* 2007. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200000. Izdanie vtoroe. Seriya Polyarno-Uralskaya. Listy Q-42-I, II. Obyasnitel'naya zapiska. [State geological map of Russian Federation, scale 1:200000. Second edition. Series Polar Ural. Sheets Q-42-I, II. Explanatory note.]. VSEGEI, SPb. p. 340. (in Russian)
- Karta anomlnogo magnitnogo polya Rossii i prilgayushikh akvatoriy* (Map of anomalous magnetic field of Russia and adjacent territories). VSEGEI, Sankt-Peterburg. (in Russian)
- Malovichko A.K., Tarunina O.L.* Ispolzovanie vysshikh proizvodnykh pri obrabotke i interpretatsii rezultatov geofizicheskikh nablyudeni [The use of the higher derivatives in processing and interpreting the results of geophysical observations]. *Nedra*, Moskva, p. 186. (in Russian)
- Ponomareva T.A., Pystin A.M.* 2014. Petrofizicheskaya kharakteristika porod polimetamorficheskikh kompleksov severa Urala [Petrophysical characteristics of rocks of the polymetamorphic complexes in the north of the Urals]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra RAN*. 2(18):68–74. (in Russian)
- Ponomareva T.A.* 2017. Petrofizicheskaya zonalnost v strukturno-veshchestvennykh kompleksakh severa Urala [Petrophysical zonation in structural-material complexes in the North of the Urals]. *Vestnik IG Komi SCUB RAS*. 1:8–15. (in Russian)
- Ponomareva T.A., Pystin A.M.* Strukturnye osobennosti marunkeuskogo eklogit-gneysovogo kompleksa Polyarnogo Urala po gravimagnitnym dannym [Structural features of Marunkeu eclogite-gneiss complex of Polar Ural according to gravity and magnetic data]. *Vestnik Instituta geologii Komi NTs UrO RAN*. 2:8–15. (in Russian)
- Pystin A.M.* 1994. Polimetamorficheskie komplekсы zapadnogo sklona Urala [Polymetamorphic complexes in the western slope of the Urals]. *Nauka*, SPb., p. 208. (in Russian)
- Pystin A.M., Kushmanova E.V., Pystina Yu.I., Panfilov A.V., Potapov I. L.* 2019. Vozrast protolitov i geokhronologiya metamorfizma nerkeyuskogo eklogit-slantsevogo kompleksa Pri-polyarnogo Urala [Age of Protolithes and Geochronology of Metamorphism of the Nerkeyuskiy Eclogite-Schist Complex of the Subpolar Urals]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 18(2):96–107. doi: 10.17072/psu.geol.18.2.96 (in Russian)
- Svodnaya gravimetricheskaya karta v reduktsii Buge s  $\sigma = 2.67$  g/sm<sup>3</sup> masshtaba 1:200000 (vtoroe pokolenie)* [Generalized gravimetric map in Bougue reduction with  $\sigma = 2.67$  g/cm<sup>3</sup> of scale 1:200000 (second generation)]. UGU, Sverdlovsk, 1974. (in Russian)
- Selyatitskiy A.Yu., Kulikova K.V.* 2017. Evolyutsiya khimicheskogo sostava granata pri metamorfizme peridotitov UHP-kompleksa Marun-Keu (Polyarnyy Ural) [Evolution of the chemical composition of the garnet in the metamorphism of the peridotites of the Marun-Keu UHP complex (Polar Ural)]. *Vestnik Instituta geologii Komi NTs UrO RAN*. 8:36–43. (in Russian)

*Stratigraficheskie skhemy Urala (dokembriy, paleozoy). Obyasnitelnaya zapiska [Stratigraphic charts of the Urals (Precambrian, Paleozoi)]. Explanatory note. Materials and decisions of the IV Urals interdepartmental stratigraphic meeting. Ekaterinburg, 1993. 152 p. (in Russian)*

*Ulyasheva N.S., Pystin A.M., Panfilov A.V., Potapov I. L. 2015. Dve serii pervichno-magmaticheskikh porod v marunkeuskom ehklogit-gneysovom komplekse (Polyarnyy Ural) [Two series*

*of primary igneous rocks in Marunkeu eclogite-gneiss complex (Polar Urals)]. Vestnik IG Komi SCUB RAS. 11:3–12. (in Russian)*

*Glodny J., Austreim H., Molina J. F. et al. 2004. Protolith ages of eclogites, Marun-Keu Complex, Polar Urals, Russia: implications for the pre- and early Uralian evolution of the northeastern European continental margin. Geological Society of London Memoir, pp. 87–105.*