

УДК 553.311.2:550.382.3 (571.65)

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНЕТИТОВЫХ РУД ЮГА ОМОЛОНСКОГО МАССИВА (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Иванов Ю. Ю., Колесов Е. В., Пенъевский С. Д., Третьякова Н. И.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук, Магадан, Россия (685000), ул. Портовая 16, e-mail: pal105@neisri.ru*

Изучены петромагнитные свойства магнетитовых руд Омолонского массива (Магаданская область). Магнитные минералы определены преимущественно термомагнитным анализом, включающим исследование магнитной восприимчивости и намагниченности насыщения, в процессе нагрева до 700 °С. Установлено, что минералы представлены магнетитом с точкой Кюри около 580 °С, маггемитом и гематитом. По данным магнитного гистерезиса определен многодоменный размер частиц. Выявлена прямая корреляция содержания железа в рудах с магнитной восприимчивостью и плотностью. Руды относятся к сильномагнитным породам. Естественная остаточная намагниченность достигает 1196.362 А/м, магнитная восприимчивость – 2.388 единиц СИ. Медианное деструктивное поле составляет менее 5 мТл. Естественная остаточная намагниченность легко разрушается переменным магнитным полем. Направления намагниченности руд по первичным замерам разнонаправленные, что может вызывать аномалии разного знака и осложнять их интерпретацию.

Ключевые слова: Омолонский массив, магнетит, магнитные свойства, магнетитовые руды.

## MAGNETIC PROPERTIES OF MAGNETITE ORES FROM THE OMOLON MASSIF (MAGADAN REGION)

Ivanov Yu. Yu., Kolesov E. V., Pen'evsky S. D., Tretyakova N. I.

*North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n.a. N.A. Shilo, Far East Branch, Russian Academy Science, Magadan, Russia, e-mail: pal105@neisri.ru*

Petromagnetic properties of magnetite ores from the Omolon Massif (Magadan region) were studied. Thermomagnetic analyses including high temperature (up to 700°C) dependence of magnetic susceptibility and saturation magnetization were used to diagnostic of magnetic minerals. Magnetite with Curie point ~580°C, maghemite and hematite were identified. Magnetic hysteresis data shows multi domain particles. There is positive correlation between Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content and magnetic susceptibility and density. Ores has high values magnetic parameters. Value of is up to 1196.362 A/m, magnetic susceptibility value is up to 2.388 SI. The natural remanent magnetization is easily destroying by alternating magnetic field. The median destructive field is less 5 mT. There are different directions of the remanent magnetization which can be sources of negative and positive anomalies and complicates of magnetic anomaly interpretations.

Key words: Omolon massif, magnetite, magnetite ores, magnetic properties.

### Введение

Исследования магнитных свойств магнетитовых руд имеет важное поисково-прикладное значение. Магнетиты характеризуются высокими значениями магнитной восприимчивости ( $M_B$ ,  $k$ ) и естественной остаточной намагниченности (ЕОН,  $J_n$ ). Тела магнетитовых руд являются источниками магнитных аномалий, картируемых наземной и аэромагнитной съемками, что используется как поисковый критерий. Для правильной интерпретации магнитных аномалий необходимы сведения о магнитных характеристиках пород и руд [10]. Объектами нашего исследования явились железистые кварциты, локализованные в до-рифейском кристаллическом фундаменте южной части Омолонского массива (159.1 в.д., 63.5 с.ш.) и составляющие главный природный и промышленный тип руд Южно-Омолонского железорудного района. Железистыми кварцитами сложены многочисленные разные по вели-

чине линзовидные тела, распространение которых контролируется зонами динамометаморфизма, секущими раннедокембрийские кристаллические толщи фундамента. Большинство исследователей считает железистые кварциты метасоматическими [3, 4, 6]. Их формирование, как предполагается по изотопно-геохронологическим данным, происходило на рубеже среднего и позднего рифея во взаимосвязи с интрузивным базитовым магматизмом [2].

### **Методика исследований**

Исследованы 54 ориентированных штуфа железистых кварцитов, из которых выпилены образцы-кубики с ребром 20 мм; по 2–3 кубика из каждого штуфа.

Измерения естественной остаточной намагниченности ( $J_n$ , ЕОН) проведены на спинмагнетометре JR-5A (AGICO Ltd.), магнитной восприимчивости ( $MВ$ ,  $k$ ) вкуче с исследованием ее при высоких температурах – на многофункциональном каппаметре MFK1-FA с термодриставкой CS-3 (AGICO Ltd.). Скорость нагрева и остывания составляла около 12–13 °С/мин, максимальная температура нагрева – 700 °С. Параметры магнитного гистерезиса, включающие остаточную намагниченность насыщения ( $J_{rs}$ ), намагниченность насыщения ( $J_s$ ), индуктивную намагниченность ( $J_i$ ), коэрцитивную силу ( $B_c$ ), остаточную коэрцитивную силу ( $B_{cr}$ ), измерены на автоматическом коэрцитиметре J-meter [1]. Относительное содержание парамагнитной компоненты намагниченности рассчитывалось по формуле [ $J_i$  (при 500 мТл) –  $J_s$  (ферромагнитная компонента)]/  $J_i$  (при 500 мТл). Анализ зависимости намагниченности насыщения от температуры  $J_s(T)$  выполнен на магнитных весах в поле индукции 500 мТл [1]. Образцы грелись до 700 °С со скоростью нагрева около 100 °С в минуту. Измерения плотности пород проводились на денситометре ИМТ-3.

Полуколичественный силикатный анализ руд выполнен на рентгеновском спектрометре S4-Pioneer.

### **Результаты исследований**

*Магнитная минералогия.* Магнитные минералы руд исследовались термомагнитным анализом. Кривые зависимости магнитной восприимчивости от температуры указывают, что основным магнитным минералом является магнетит с точкой Кюри около 580 °С. Однако все кривые отличаются в деталях. На кривых нагрева некоторых образцов отмечаются перегибы в области температур 400–450 °С, обусловленные катиондефицитным магнетитом (маггемитом) (рис. 1а–в). Этот минерал неустойчив к нагреву, в процессе которого переходит в гематит [1, 8]. После нагрева магнитная восприимчивость уменьшается, так как  $MВ$  гематита в сотни раз ниже магнетита и маггемита, при этом кривые остывания лежат ниже кривых нагрева. Кривые зависимости намагниченности насыщения от температуры также указывают на присутствие магнетита, маггемит на кривых выражен не отчетливо (рис. 1г–е). Кривые

второго нагрева многих образцов лежат ниже кривых первого нагрева, что обусловлено

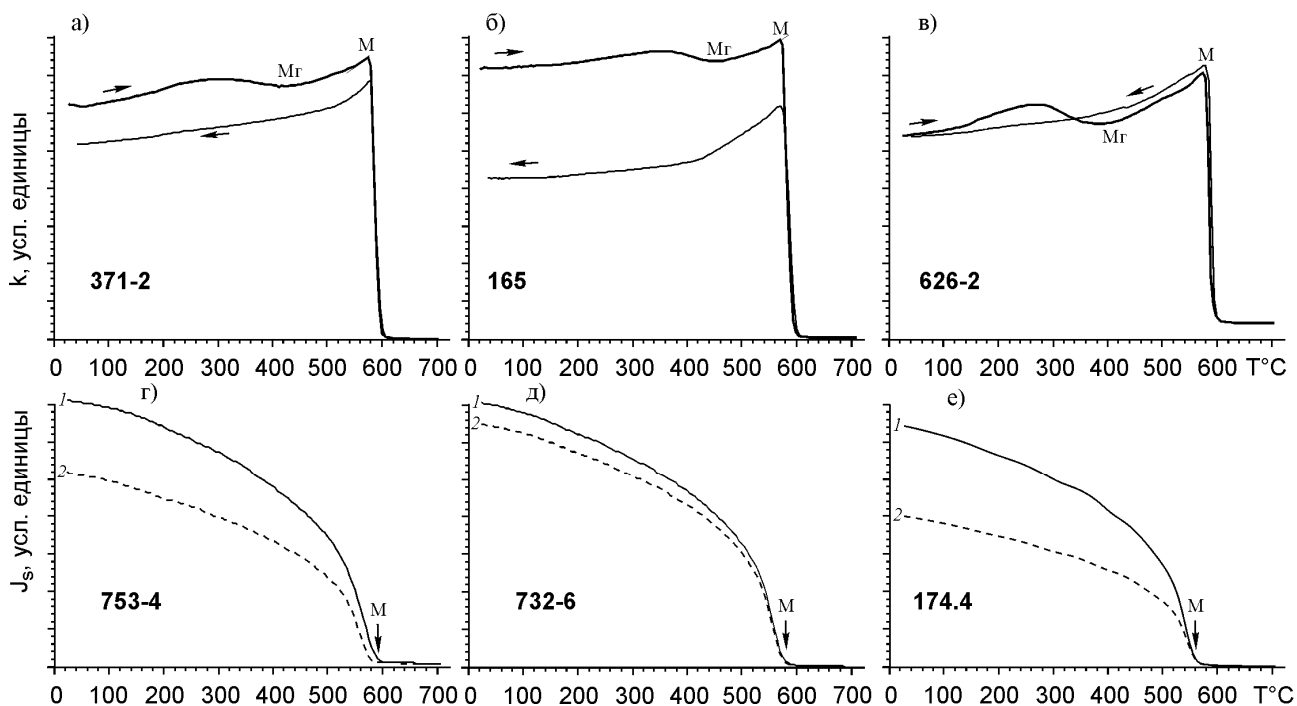


Рис. 1. Кривые термомагнитного анализа образцов руд. М – магнетит, Mg – маггемит. Жирным шрифтом обозначены номера образцов, стрелками – кривые нагрева и остывания, 1 (2) – кривые первого (второго) нагрева

окислением магнетита в процессе нагрева, а также переходом маггемита в гематит.

Гистерезисные характеристики руд показывают, что парамагнитная составляющая индуктивной намагниченности, как правило, невелика и не превышает 10 %. Коэрцитивная сила составляет 0.1–19.9 мТл (среднее 2.9), остаточная коэрцитивная сила – 0.2–58.4 мТл (среднее 16.4). Судя по распределению отношений  $J_{rs}/J_s$ ,  $B_{cr}/B_c$  на диаграмме Дея [7], магнитные минералы представлены преимущественно многодоменными частицами (рис. 2а).

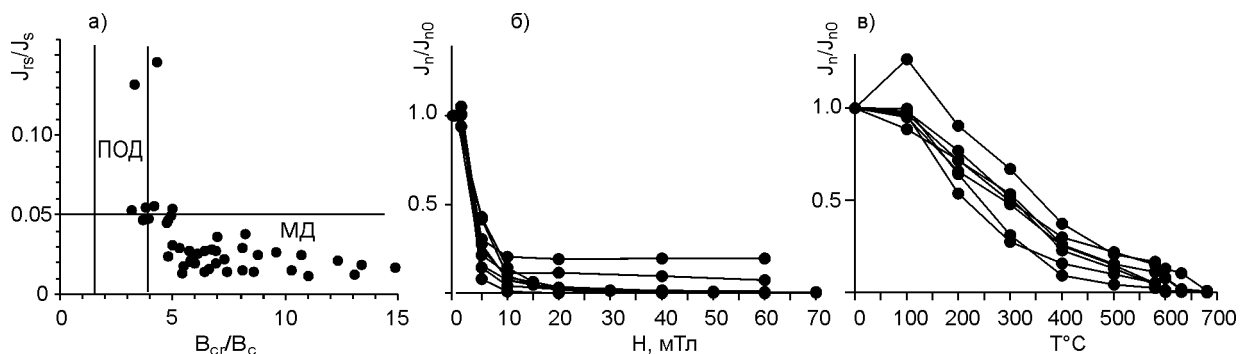


Рис. 2. Диаграмма Дея (а) и кривые размагничивания образцов переменным магнитным полем (б) и температурой (в). ПОД – область псевдо-однодоменных частиц, МД – область многодоменных частиц

Отметим, что многодоменные частицы относятся к магнитомягким и легко перемагничиваются современным магнитным полем. Стабильная естественная намагниченность свя-

зана, как правило, с однодоменными и псевдо-однодоменными частицами. Однако установлено, что в лабораторном магнитном поле, после выдержки в положениях «по полю» и «против поля», намагниченность образцов руд практически не претерпела изменений. Тем не менее, намагниченность в большинстве случаев состоит из магнитомягкой компоненты. При размагничивании образцов переменным магнитным полем отмечается резкий спад величины намагниченности в малых полях. Медианное деструктивное поле составляет менее 5 мТл (рис. 2б). Кривые терморазмагничивания однотипные и характеризуются постепенным уменьшением намагниченности в процессе нагрева (рис. 2в). Для большинства образцов после нагрева до 600 °С остается менее 1 % от первоначальной величины намагниченности. В этих образцах намагниченность связана с магнетитом. Для некоторых образцов намагниченность после нагрева до этих температур составляет 10–25 % первоначальной величины, которая разрушается выше точки Кюри гематита.

*Петрофизические и палеомагнитные характеристики.* Естественная остаточная намагниченность железистых кварцитов варьирует в пределах  $11519\text{--}1196362 \times 10^{-3}$  А/м (среднее 204195), магнитная восприимчивость  $182\text{--}2388 \times 10^{-3}$  СИ (среднее 1227), фактор Q (отношение остаточной намагниченности к индуктивной) – 0.3–30.9 (среднее 4.6), плотность –  $2.79\text{--}3.90$  г/см<sup>3</sup> (среднее 3.46) (рис. 3).

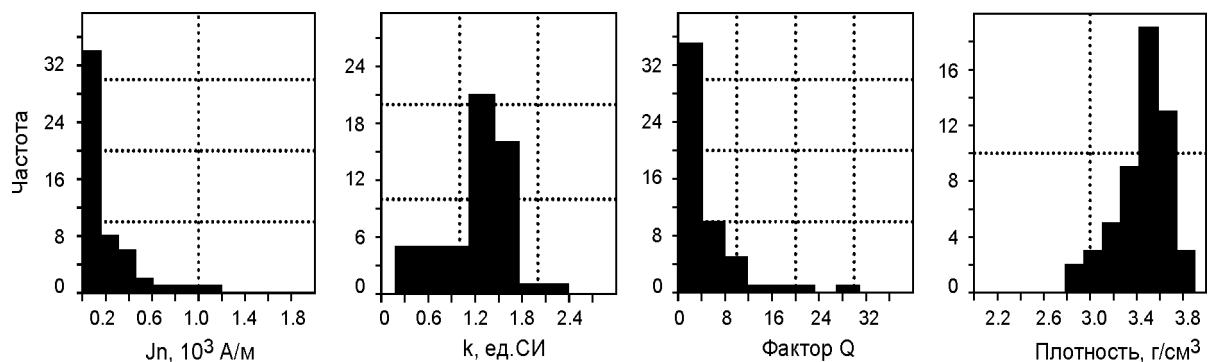


Рис. 3. Гистограммы петрофизических свойств магнетитовых руд

Распределение магнитных минералов в рудах крайне неравномерное. Образцы, выпиленные из одного штуфа, могут в несколько раз отличаться по величинам магнитных параметров и плотности. Сильные вариации фактора Q указывают на сложное соотношение естественной остаточной и индуктивной намагниченности.

Для выяснения связи магнитных величин с содержанием железа проведен геохимический анализ образцов с известными магнитными характеристиками. Установлено, что содержание железа в рудах (данные полуколичественного анализа) не превышает 60 % (табл. 1)

и отвечает средним рудам подобного геологического типа. Содержания остальных элементов также типичны для руд месторождений железистых кварцитов. Они отвечают комплексу рудообразующих минералов: кварц, небольшое количество силикатных фаз, незначительная примесь фосфора, связанная в апатите. Содержания титана весьма низкие.

Таблица 1. Результаты полуколичественного анализа образцов руд (мас. %)

Анализ	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<i>k</i> , 10 <sup>-3</sup> СИ
1	41	0.1	1.2	57	0.1	0.6	0/2	0.2	785
2	48	0.1	0.2	50	-	1.0	0.7	0.2	1230
3	35	0.5	1.0	55	0.1	3.5	4.4	0.4	1055
4	47	-	0.2	49	0.1	2.2	1.6	0.2	1624
5	37	0.2	0.9	60	0.1	0.2	1.8	0.2	1478
6	39	0.1	0.5	58	-	0.6	1.2	0.2	1450
7	66	-	0.1	32	0.2	0.7	2.0	0.1	446
8	36	-	2.3	56	0.1	1.7	2.7	0.3	997
9	47	-	0.3	51	-	0.6	0.6	0.2	1415
10	41	0.1	0.2	56	-	1.0	1.4	0.2	1534

Для всей коллекции образцов значимой корреляции между ЕОН и МВ ( $r = 0.14$ ), между ЕОН и плотностью ( $r = 0.19$ ) не наблюдается. Однако коэффициент корреляции ( $r$ ) между магнитной восприимчивостью и плотностью, магнитной восприимчивостью и содержанием общего железа составляет 0.48 и 0.56, соответственно. Слабая корреляция между магнитными величинами объясняется сложным составом магнитных минералов, включающим магнетит, маггемит и гематит, многокомпонентностью намагниченности, а также низкотемпературным окислением магнетита. Вклад гематита в ЕОН и МВ весьма незначительный. Магнитные характеристики (ЕОН, МВ) гематита ниже магнетитовых [11]. Специальные исследования смеси в различных соотношениях гематита и магнетита, показали, что гематит проявляется в магнитных параметрах, если его будет более 95 % [9].

Первичные измерения и анализ векторов естественной остаточной намагниченности выявили сложное распределение направлений на сфере (рис. 4а).

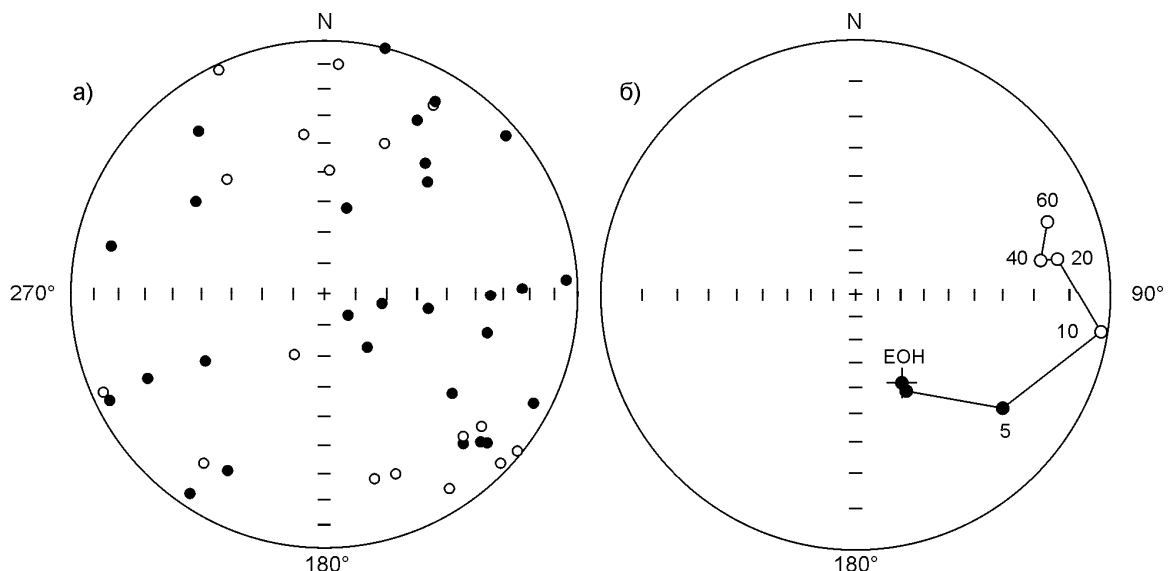


Рис. 4. Распределение направлений естественной намагниченности после первичных замеров (а) и пример размагничивания образца переменным магнитным полем (б). Залитые (открытые) символы – проекции направлений намагниченности на нижнюю (верхнюю) полусферы, цифры рядом с символами – амплитуда переменного поля

Большинство образцов имеют прямую полярность. Для обратномагнитных образцов характерны, как правило, пологие значения магнитного наклона. Результаты размагничивания переменным магнитным полем указывают на многокомпонентность намагниченности. Многие образцы меняют знак полярности в процессе размагничивания (рис. 4б). Прямополярная компонента намагниченности обусловлена, по-видимому, вязкой намагниченностью.

Железистые кварциты относятся к сильномагнитным породам, тела которых способны создавать магнитные аномалии. Суперпозиция индуктивной и естественной остаточной намагниченностей определяет величину и знак наблюдаемого аномального магнитного поля [5]. Фактор  $Q$ , выражающий отношение остаточной намагниченности к индуктивной, для 25 % изученных образцов составляет менее 1. Эти образцы характеризуются высокой индуктивной намагниченностью, которая будет доминировать в образовании аномального поля. В оставшейся группе образцов фактор  $Q > 1$  и в некоторых образцах достигает десятки единиц. Однако, как указывалось выше, намагниченность этих образцов связана с многодоменными, магнитомягкими частицами, несущими вязкую намагниченность – переменное магнитное поле амплитудой менее 5 мТл разрушает до 90 % первоначальной величины намагниченности. Таким образом, и в этом случае основной вклад в суммарное магнитное поле будет вносить индуктивная намагниченность.

### **Выводы**

1. Железистые кварциты Омолонского массива характеризуются высокими значениями естественной остаточной намагниченности и магнитной восприимчивости;
3. Магнитные минералы кварцитов представлены многодоменными магнетитом, маггемитом и гематитом;
3. Основной вклад в наблюдаемое магнитное поле над кварцитами вносит индуктивная намагниченность.

*Исследования частично поддержаны грантом ДВО РАН № 12-III-A-08-191.*

### **Список литературы**

1. Буров Б. В., Нургалиев Д. К., Ясонов П. Г. Палеомагнитный анализ / [под. ред. В. П. Боронина]. Казань: Изд-во КГУ, 1986. – 167 с.
2. Гагиева А. М. Интрузивный базитовый магматизм в позднедокембрийской истории Омолонского массива (геологические и геохронометрические данные) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2011. – № 3. – С. 18–29.

3. Гельман М. Л., Титов В. А., Фадеев А. П. Омолонская железорудная провинция // Докл. АН СССР. – 1974. – Т. 218. – № 2. – С. 419–422.
4. Жуланова И. Л. Земная кора Северо-Востока Азии в докембрии и фанерозое. – М.: Наука, 1990. – 304 с.
5. Магниторазведка. Справочник геофизика / [под ред. В. Е. Никитского, Ю. С. Глебовского]. – М.: Недра, 1980. – 367 с.
6. Фадеев А. П. Железорудные проявления Южно-Омолонского района // Колыма. – 1975. – № 6. – С. 41–43.
7. Day R., Fuller M., Schmidt V. A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1977. – Vol. 13. – P. 260–267.
8. Dunlop D. J., Özdemir Ö. Rock magnetism: fundamental and frontiers // Cambridge University Press, 1997. – 573 p.
9. Frank U., Nowaczyk N. R. Mineral magnetic properties of artificial samples systematically mixed from haematite and magnetite // Geophys. J. Int. – 2008. – Vol. 175. – P. 449–461.
10. Pechersky D. M., Genshaft Yu. S. Petromagnetism of the continental lithosphere and the origin of regional magnetic anomalies: A review // Russian Journal of Earth Sciences. – 2001. – Vol. 3 – № 2. – P. 97–124.
11. Peters C., Dekkers M. J. Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size // Physics and Chemistry of the Earth. – 2003. – Vol. 28. – P. 659–667.

**Рецензенты:**

Жуланова Ирина Львовна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории стратиграфии и тектоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан.

Борходоев Владимир Яковлевич, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией рентгеноспектрального анализа Федерального государственного бюджетного учреждения науки Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан.