

М.П.КАШКЕВИЧ, канд. геол.-мин. наук, доцент, *kashmar1972@mail.ru*,
А.В.СЕРГЕЕВ, канд. геол.-мин. наук, доцент, *biolandspb@gmail.com*,
С.Е.БАЛАБАН, студент, *s.balaban2011@yandex.ru*,
И.Н.САВЕЛЬЕВ, студент, *luise_x@mail.ru*,
Санкт-Петербургский государственный университет

M.P.KASHKEVICH, PhD in geol. & min. sc., associated professor, *kashmar1972@mail.ru*,
A.V.SERGEEV, PhD in geol. & min. sc., associated professor, *biolandspb@gmail.com*,
S.E.BALABAN, student, *s.balaban2011@yandex.ru*,
I.N.SAVELYEV, student, *luise_x@mail.ru*,
Saint-Petersburg State University

ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ СУЛЬФИДНОГО СКАРНОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ В СЕВЕРНОМ ПРИЛАДОЖЬЕ

Представлены результаты комплексных геохимико-геофизических работ на учебном полигоне Санкт-Петербургского университета в Северном Приладожье. Здесь в породах питкьярантской свиты выявлены многочисленные бедные рудопроявления и точки минерализации сульфидных скарных руд, которые могут быть использованы для обучения студентов основам поисково-разведочных работ. Рассматриваются модельные объекты, соответствующие различным геологическим ситуациям: зоны тектонических нарушений, метаморфизованные карбонатно-силикатные породы – скарноиды, инфильтрационные скарны. Приводится набор признаков и критериев, позволяющих выделять скарные рудопроявления, графитизированные рудоподводящие разломы в условиях слабой обнаженности коренных пород.

Ключевые слова: естественное электрическое поле, магниторазведка, рентгенофлюоресцентный анализ, комплексная интерпретация, скарное полиметаллическое оруденение, графитизированные разломы, рудоподводящий канал.

SEARCH CRITERIONS OF SULPHIDE SKARN ORE MINERALIZATION IN THE NORTH PART OF LAKE LADOGA REGION

The results of complex geophysical and geochemical investigations on testing area, which is developed now for student field search and exploration trainings in the north part of Lake Ladoga region, are presented. Model objects corresponding to different geological situations (zones of tectonic faults, metamorphic carbonaceous-siliceous rocks and ore skarns) have been chosen for student field trainings. Manifestation of these objects in geophysical and geochemical fields is considered. Here we show a number of signs and criterions of ore skarns and graphitic deep faults (ore canals).

Key words: self-potential field, magnetic survey, x-ray fluorescent analysis, complex interpretation, skarn ore mineralization, graphitic faults, ore canal.

Введение. Работы проводились в Северном Приладожье на территории учебного полигона Санкт-Петербургского университета (СПбГУ). Юго-западная часть этого полигона представлена на рис.1. Эта территория является базовым объектом для проведения учебных и учебно-научных практик студентов геологического факультета

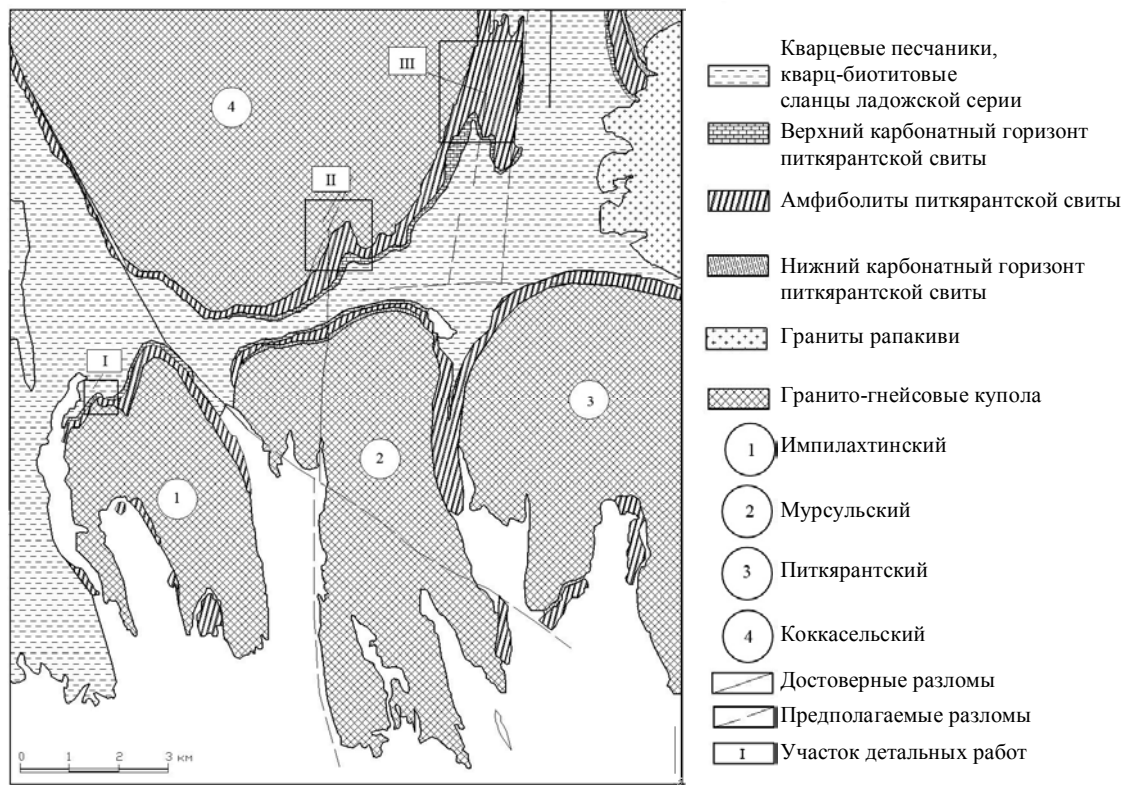


Рис. 1. Схема геологического строения юго-западной части учебного полигона СПбГУ, Северное Приладожье (по М.А.Коротаеву и др., Невская экспедиция, 1978 г.).

Участки детальных работ: I – Центрально-Импиллахтинское рудопоявление, II – участок Хиппола, III – участок оз. Рукоярви

университета. Здесь в настоящее время геолого-минералогическими, геофизическими и геохимическими исследованиями ведется поиск «модельных» объектов, пригодных для обучения студентов отработке комплекса методов и методик картировочных и поисковых работ. В перспективе планируется детально исследовать территорию всего полигона.

Как и для большинства поисково-оценочных работ, проводимых на территории Карело-Кольского региона с повсеместным развитием покровно-ледниковых отложений различной мощности, основными здесь являются геофизические и геохимические методы исследования. Для решения поставленных задач на полигоне наиболее рациональным оказался комплекс экспрессных методов, включающих в себя профилирование методом естественного поля (ЕП), магниторазведка и геохимическое опробование вторичных ореолов.

Геологическое строение Импилахтинского полигона. Импилахтинский учебный полигон находится в Северном Приладожье на территории Питкярантского поднятия южной части Балтийского щита. Территория полигона полностью находится в пределах гетерогенного раннепротерозойского метаморфического комплекса с выступами и фрагментами позднеархейских ортоплагиогнейсов с внутрикупольными амфиболитами, составляющими южную часть зоны Раахе – Ладога [5].

Породы фундамента представлены многочисленными куполами, окаймленными гранито-гнейсами, на территории полигона объединяющимися в Питкярантскую группу куполов. Каждый из них окаймлен и отделен от своих соседей синклиналиями структурами, заполненными раннепротерозойскими метаморфизованными вулканогенными и осадочными породами. Самый крупный останец фундамента – Коккасельский гранито-гнейсовый купол (20×30 км).

На побережье Ладожского озера с запада на восток последовательно наблюдаются Импилахтинский, Мурсульский и Питкярантский купола.

На территории Импилахтинского полигона межкупольные структуры сложены метаморфизованными породами питкярантской свиты сортавальской серии (верхний карелий, людиковийский надгоризонт) и вышележащими метатурбидитами ладожской серии (верхний карелий, калевийский надгоризонт) [4].

Типичный разрез обрамления куполов представлен следующей последовательностью пород (снизу вверх):

1) нижний карбонатный горизонт питкярантской свиты мощностью до 15 м (мраморы, мономинеральные кварциты, локально амфиболовые и углеродистые сланцы);

2) амфиболиты массивные, полосчатые, сланцеватые, гранатовые с мало мощными прослоями кварцитов мощностью до 250 м;

3) верхний карбонатный горизонт питкярантской свиты мощностью до 15 м (амфибол-карбонатные сланцы, локально мраморы, углеродистые сланцы, кварцито-видные породы);

4) биотит-амфиболовые сланцы ладожской серии видимой мощности более 1000 м.

Всю восточную часть полигона занимает многофазный гранитный комплекс рапакиви, входящий в состав Салминского плутона. Все возрастные датировки пород массива относятся к раннему рифею [1].

Складчатые и разрывные структуры полигона были сформированы в течение трех этапов деформаций и представляют собой сочетание складок субмеридионального и широтного простирания [5]. Дизъюнктивные нарушения в породах, «обрамляющих» купола, наиболее отчетливо наблюдаются в карбонатных горизонтах питкярантской свиты. Максимальная интенсивность их проявления характерна для участков с крутыми закруглениями куполов.

Скарново-сульфидное оруденение на территории полигона приурочено к карбонатным горизонтам питкярантской свиты и представлено, главным образом, вкраплен-

ными сульфидами: пирит, халькопирит, пирротин, галенит, сфалерит и т.д. Оруденение связывают как со свекофенскими метаморфогенно-метасоматическими процессами (скарноиды, березиты, пропилиты) с сингенетичной пирит-пирротиновой минерализацией, так и с магматогенными метасоматитами, связанными со становлением Салминского массива гранитов рапакиви. В первом случае это преимущественно скарноподобные диопсид-амфиболовые метасоматиты с редкой вкрапленностью сульфидов, в первую очередь пирротина и пирита, с фоновыми или близфовыми содержаниями цветных и редких металлов. Скарны, связанные с гранитами рапакиви, более разнообразны в минеральном плане (гранат, скаполит, эпидот) и сопровождаются медным, цинковым, свинцовым оруденением. Иногда этот тип оруденения осложняется телескопированной оловянной, вольфрамовой, бериллиевой и урановой минерализацией. Интенсивность развития такого оруденения контролируется близостью к материнской интрузии гранитов рапакиви, с одной стороны, и наличием дизъюнктивных нарушений в карбонатных горизонтах, играющих роль рудоподводящих каналов, с другой. Так, максимальная степень скарнирования и наиболее крупные рудопроявления локализованы в участках с крутыми закруглениями куполов в Питкярантском рудном поле (Старое рудное поле). На удалении от материнской интрузии гранитов рапакиви интенсивность скарнового процесса затухает и в первую очередь контролируется уже тектоническими нарушениями, имеющими доорогенный и орогенный возраст. В пределах всех гранито-гнейсовых куполов Питкярантского поднятия известны рудопроявления описанного выше типа.

Методы и методики исследования.

Для выбора перспективных участков детальных комплексных работ использовались данные литогеохимической съемки по вторичным ореолам, входившей в комплекс работ при геологическом картировании территории полигона в масштабе 1:25000. Мощность четвертичных отложений здесь варьирует от нескольких десятков сантиметров

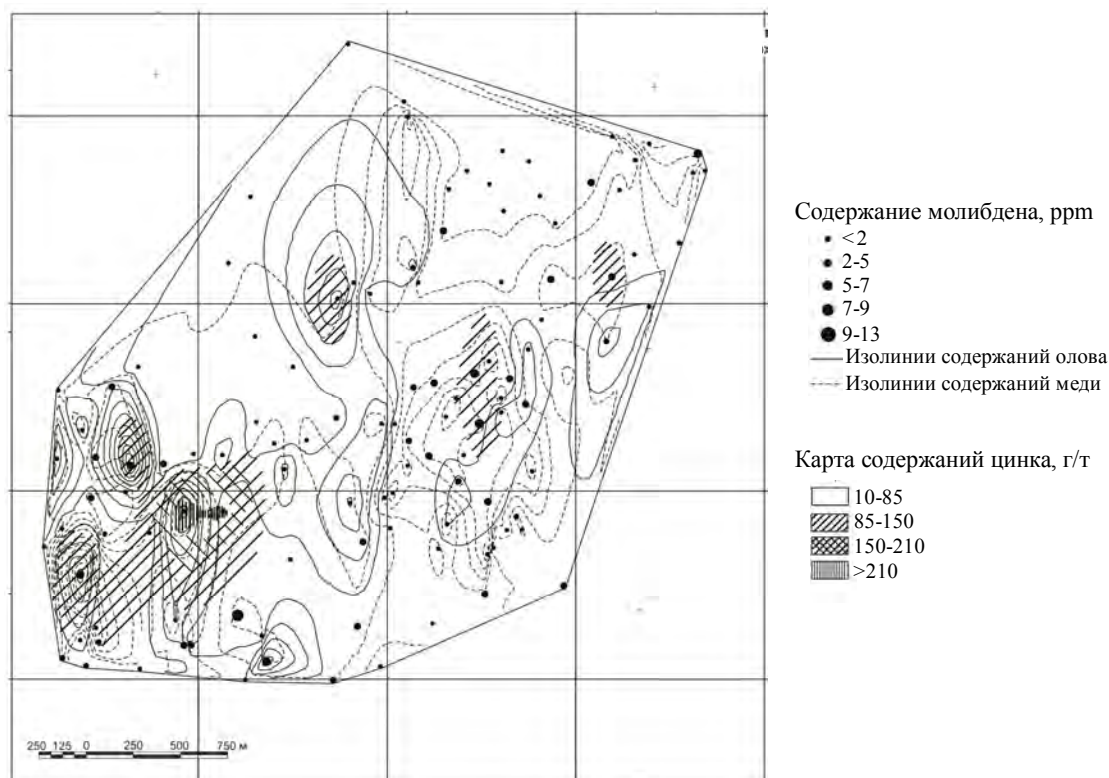


Рис.2. Схема геохимических аномалий в почвах участка детальных работ II (Хиппола, Восточное обрамление Коккасельского купола), построенная по результатам литохимического опробования в масштабе 1:25000, 2010 г.

до нескольких метров. На всех трех изученных участках (рис.1) породы питкьярантской свиты характеризуются повышенными значениями концентрации рудных элементов, прослеживающимся в виде цепочки слабоконтрастных аномалий. На их фоне выделяются аномалии повышенной интенсивности, часто коррелирующие с повышенными концентрациями олова, молибдена и урана. По всей видимости, слабоконтрастные мозаичные аномалии связаны с зонами развития скарноидов по карбонатным горизонтам питкьярантской свиты, а участки с высокими концентрациями Zn, Cu, Pb, а также Sn, Mo и U – со скарнами. Карта геохимических аномалий участка II представлена на рис.2. Аномалии повышенной интенсивности были изучены дополнительно в масштабе 1:10000 по профилям вкостр простирания пород. Плановая привязка каркаса профильной сетки, выходов профилей на магистрали выполнена с помощью спутниковой системы навигации GPS (Garmin GPSMAP-60CSx). Погрешность определения координат ± 5 м.

Комплекс поисковых методов включал в себя детальные геологические, минералого-петрографические, геохимические и геофизические исследования. Геологические наблюдения заключались в изучении выходов коренных пород, отборе образцов, составлении детальной геологической карты. Образцы были изучены микроскопически в проходящем и отраженном свете.

Геохимическое опробование проводилось для почвенного горизонта A1 (гумусовый горизонт, верхние 10 м). Для всех проб был проведен количественный рентгено-флуоресцентный анализ на портативном анализаторе «Omega» (Innov X systems). Относительная погрешность определения содержания элементов 20 %.

Геофизические исследования включали: магнитную съемку с протонными магнитометрами «МИНИМАГ», электроразведку методом естественного поля, на отдельных участках – электроразведку на постоянном токе методом сопротивления в

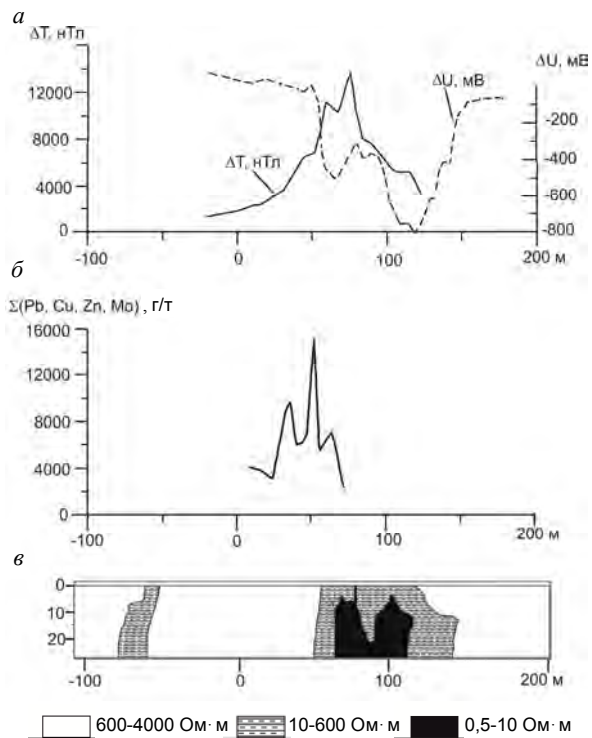


Рис.3. Результаты комплексных исследований на участке Центрально-Имплахтинского рудопоявления, 2009 г.:

a – графики аномального магнитного поля и потенциала ЕП; *б* – график суммы рудных элементов по результатам опробования почв; *в* – геоэлектрический разрез по данным электротомографии

томографическом варианте с установкой градиента с использованием программы обработки Zond Res2D [2].

Результаты исследования. Результаты представлялись в виде планов графиков аномального магнитного поля, потенциала естественного электрического поля, геоэлектрических разрезов и концентраций рудных химических элементов. Выделено три основных типа корреляции геофизических и геохимических полей.

Первый тип характеризуется положительными аномалиями магнитного поля ΔT_a (до нескольких тысяч нанотесл), коррелирующими с повышенными содержаниями халькофильных элементов Cu, Pb, Zn (суммарно до 300 г/т), и фоновыми значениями потенциала ЕП. Такой набор признаков, по нашему мнению, соответствует метаморфическим скарноидам с бедной вкрапленностью пирротина, сфалерита, реже халькопи-

рита и галенита. Геоморфологически такие зоны, как правило, никак не проявлены.

Второй тип, выделяемый нами как зоны разломов, характеризуется сверхинтенсивными аномалиями естественного электрического поля (до -900 мВ), отсутствием или слабым проявлением магнитного поля, иногда сопровождающимися повышенными концентрациями ряда рудных элементов, в том числе Mo, U и Sn. В рельефе такие зоны часто отмечаются вертикальными смещениями блоков пород с амплитудами до 10 м, депрессиями, зонами интенсивной меланитизации, обохренности пород и другими признаками тектонических нарушений. Столь интенсивные аномалии естественного поля почти всегда связаны с уходящими на глубину субвертикальными зонами графитизации [3, 6]. Природа графита здесь может быть различной: эманиции мантийного углерода по глубинным разломам, перераспределение углерода из вмещающих углеродсодержащих толщ в тектонически ослабленные зоны. В любом случае формирование таких графитизированных разломов связано с этапами интенсивного перераспределения вещества: метаморфизмом или метасоматозом. Прослой мономинального графита мощностью до 20 м, залегающий согласно плоскости тектонического нарушения, был обнаружен нами в одной из таких зон.

Третий тип характерен для участков интенсивного скарнирования карбонатных горизонтов питкьярантской свиты. Один из таких объектов был изучен наиболее детально – это Центрально-Имплахтинское рудопоявление урана (рис.3). Здесь наблюдается следующая закономерность в поведении физических полей: выделяется два рядом расположенных пика на графиках потенциала ЕП разной интенсивности (до -900 мВ и около 400 мВ), меньший по амплитуде пик совпадает с интенсивной аномалией магнитного поля (до 12000 нТл) и с контрастными положительными аномалиями распределения рудных элементов.

Наиболее интенсивно скарнирование проявлено в области высоких значений ΔT_a , аномалии ЕП средней интенсивности и мак-

симальными для этого участка концентрациями изучаемых элементов (до 800 г/т) и пространственно совпадает с контактом карбонатного горизонта пород питкьярантской свиты и тектонической зоны, отделяющей биотитовые сланцы ладожской серии. Сама тектоническая зона отвечает сверхинтенсивной аномалии ЕП.

Минералого-петрографические исследования шлифов и аншлифов показали здесь интенсивные метасоматические изменения пород:

- амфибол-биотит-кальцитовые породы замещаются диопсид-актинолит-эпидотовыми ассоциациями;

- формируется комплекс рудных минералов (моноклинный и гексагональный пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит, пирит, молибденит, настуран);

- биотит вмещающих пород интенсивно мусковитизируется со сбросом железа в магнетит по плоскостям спайности в слюде (количество магнетита может достигать 10 %);

- углеродная минерализация в скарнах представлена рассеянным графитом в сростаниях с пирротинном и халькопиритом.

На основании проведенных исследований установлены следующие закономерности: аномалия магнитного поля, коррелирующая с отрицательной аномалией ЕП меньшей интенсивности и сопровождающаяся контрастными положительными аномалиями халькофильных элементов и урана, отражает зоны сульфидной рудной вкрапленности в скарнированных карбонатсодержащих горизонтах питкьярантской свиты. Интенсивность аномалии магнитного поля определяется общим количеством и соотношением ферромагнитных минералов: магнетита и пирротина. Естественные электрические поля возникают здесь благодаря наличию ориентированных по слоистости электропроводящих рудных минералов (магнетита; пирротина, пирита и других сульфидов). Не исключается и вклад в это явление рассеянного графита.

Интенсивная отрицательная аномалия ЕП (-900 мВ), которая может быть связана только с вертикальными электронными

проводниками большой протяженности (факт наличия таких проводников подтверждает и электротомография), и не сопровождающаяся аномалиями магнитного поля, отвечает графитизированному разлому, выполняющему роль рудоподводящего канала для скарнирующих растворов.

Заключение. Таким образом, скарны, скарноиды и рудоподводящие каналы в породах питкьярантской свиты отражаются в геофизических и геохимических полях в виде разных наборов признаков.

Для скарноидов характерны магнитные аномалии слабой интенсивности, связанные с бедной вкрапленностью пирротина, слабоконтрастные аномалии Zn, Pb, Cu низкой продуктивности, возможно, появление аномалий ЕП до - 300 мВ.

Рудоподводящие каналы фиксируются сверхинтенсивными аномалиями ЕП, отвечающие графитизированным разломам.

При пересечении такими разломами карбонатсодержащих горизонтов питкьярантской свиты могут сформироваться участки инфильтрационных скарнов. Они отражаются в планах графиков геофизических и геохимических полей совмещением аномалий ЕП разного типа, аномалией магнитного поля высокой интенсивности и высокими значениями концентраций элементов рудного комплекса. Источником вещества для таких скарнов, вероятно, были растворы, продуцировавшие массивом гранитов рапакиви в период его становления.

Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра «Геомодель» СПбГУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист Р-(35)-37-Петрозаводск: Объяснительная записка / Гл. ред. Ю.Б.Богданов, отв. ред. К.Э.Якобсон; ВСЕГЕИ. СПб, 2000. 322 с.

2. Каминский А.Е. Донная электротомография при решении инженерно-геологических задач // <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1183715>

3. Кашкевич М.П. Геофизический образ графитизированных глубинных разломов: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб: Изд-во СПбГУ. 2000. 23 с.

4. Матреничев В.А. Стратиграфия и особенности вещественного состава раннепротерозойских мета-

вулканитов сортавальского поднятия (Северное Приладожье) / В.А.Матреничев, К.И.Степанов, О.Н.Пупков // Вестник СПбГУ. 2004. Сер.7, вып.2. С.31-44.

5. Ранний докембрий Балтийского щита / Отв. ред. В.А.Глебовицкий. СПб.: Наука, 2005. 711 с.

6. *Frost B.Ronald et al.* Grain boundary graphite in rocks and implications for high electrical conductivity in the lower crust // *Nature*. 1989. 340. P.134-136.

REFERENCE

1. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1 000 000. List P-(35)-37, Petrozavodsk, Explanatory Note / Ch. Ed. J.B. Bogdanov, Ed. K.E. Jacobson; VSEGEI. Saint Petersburg. 2000. 322 p.

2. *Kaminski A.E.* Bottom electrical tomography for solving geotechnical problems // <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1183715>

3. *Kashkevich M.P.* Geophysical image of the graphitic deep faults: Research Paper ... PhD in geol. & min. sc. Saint Petersburg: SPbGU, 2000. 23 p.

4. *Matrenichev V.A., Stepanov K.I., Pupkov O.M.* Stratigraphy and material composition of Early Proterozoic metavolcanics Sortavala raise of the north part of Lake Ladoga region // *Vestnik SPbGU*. 2004, Ser.7, iss.2. P.31-44.

5. Early Precambrian of the Baltic Shield / Ch. ed. V.A.Glebovitskiy. Saint Petersburg: Nauka, 2005. 711 p.

6. *B. Ronald Frost et al.* Grain boundary graphite in rocks and implications for high electrical conductivity in the lower crust // *Nature*. 1989. 340. P.134-136.