

МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ НИЛОВ

младший научный сотрудник, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)  
mnilov@rambler.ru

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ВЫДЕЛЕНИЯ Au-Cu-Mo-ПОРФИРОВЫХ ШТОКВЕРКОВЫХ ЗОН НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА КАДИЛАМПИ В ЗАПАДНОЙ КАРЕЛИИ

Объект исследования – гранитный массив Кадилампи, расположенный на российской части зеленокаменного пояса Ялонваара – Иломанси – Тулосс. В его пределах известно одноименное Au-Cu-Mo-порфировое рудопроявление. С целью выделения геофизических критериев поиска подобных объектов проведены опытные работы с использованием методик магнитометрии, электропрофилеирования ВП, а также электротомографии сопротивления и ВП. Гранитный массив выделен среди вмещающих сланцев по характеру распределения геомагнитного поля и сопротивления. Окварцованная штокверковая зона с оруденением слабоконтрастна по параметру ВП, но создает аномалии повышенного сопротивления при электропрофилеировании. Детальные исследования с использованием методики электротомографии встречными трехэлектродными установками позволили значительно уточнить морфологию штокверка и выделить наиболее перспективные области с малосульфидным оруденением. Интерпретация геофизических данных хорошо коррелирует с результатами бурения. Предложенный методический подход может быть использован на стадиях поиска рудовмещающих тел гранитов и выделения штокверковых зон с Au-содержащим Cu-Mo-порфировым оруденением.

Ключевые слова: Au-Cu-Mo-порфировое проявление, штокверк, геофизические методы, электротомография, критерии поисков, зеленокаменные пояса

### МЕСТОРОЖДЕНИЯ/ПРОЯВЛЕНИЯ AU-CU-MO-ПОРФИРОВОГО ТИПА

Группа Au-содержащих Cu-Mo-порфировых и Au-полиметаллических проявлений в Карелии (AR<sub>2</sub>) представлена примерно 20 объектами. В финской части зеленокаменного пояса (ЗП) Ялонваара – Иломанси – Тулосс с массивом Куйтиллы связано одноименное месторождение в тоналитах [3].

Cu-Mo-порфировые рудные объекты обычно локализируются в апикальной части многофазных интрузивов, представленных диоритами, гранодиоритами, гранит-порфирами, лейкогранитами и во вмещающих толщах. Штокверковые, вкрапленно-прожилковые или жильные типы руд представлены молибденитом, халькопиритом, пирротином, пиритом, галенитом, сфалеритом, иногда шеелитом, разнообразными висмутотеллуридами. Количество кварцевых прожилков в штокверке обычно не превышает 20 % от общего объема (площади) развития измененных пород. Золото на этих проявлениях обычно тяготеет к полиметаллической части руд [2].

Оконтуривание гранитных массивов в ЗП является легко решаемой с помощью магниторазведки задачей, а выделение кварцевых штокверковых зон и малосульфидного оруденения в них традиционным комплексом геофизических методов представляет большую сложность. Некоторый опыт в этом был приобретен в ходе совместных работ сотрудников ИГ КарНЦ РАН и Карельской ГЭ на участках Лобаш и Кадилампи [1; 4].

### МАССИВ КАДИЛАМПИ СЕВЕРНОЙ ПРИГРАНИЧНОЙ ПЛОЩАДИ

Небольшой 2-фазный гранитный массив Кадилампи расположен северо-восточнее одноименного озера в пределах российской части ЗП Ялонваара – Иломанси – Тулосс. Массив имеет размер 300 x 700 м, он прорывает вулканогенно-осадочную толщу и амфиболиты по основным вулканитам (рис. 1). К центральной части интрузива приурочена Au-Cu-Mo-минерализация (рудопроявление Кадилампи-1), выявленная при шлиховом опробовании, проводимом Карельской ГЭ под руководством С. Н. Юдина. Массив представлен гранодиоритами и порфировидными гранитами. В нем и вмещающих толщах встречаются пегматитовые жилы. Центральная часть интрузива сложена преимущественно розово-серыми порфировидными гранитами, вскрытыми в канавах и нескольких скважинах. Массив Кадилампи по составу сравнивается и сопоставляется [4], [7] с массивами на территории восточной Финляндии (Куйтиллы – в южной части ЗП Хатту, Валкеасуо – в северной части).

Толщи, вмещающие массив Кадилампи, юго-западнее участка представлены прокварцованными гнейсами и биотитизированными амфиболитами по базальтам. Северо-западнее массива развиты K-Na-полевошпатовые метасоматиты [4].

Задачей данной опытно-методической работы является установление геофизических критериев, по которым можно выделять малосульфидные штокверковые зоны в гранитах.

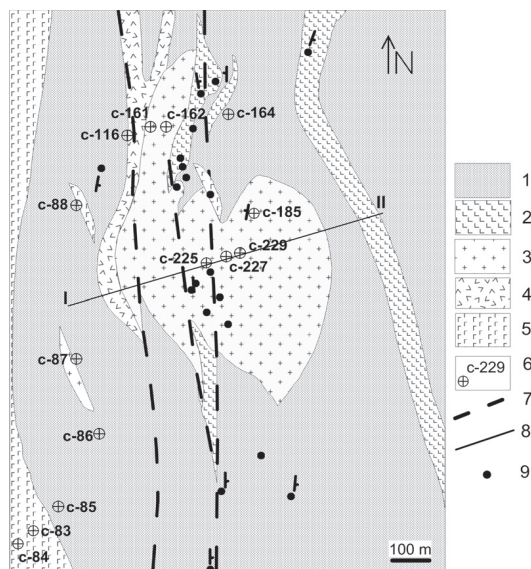


Рис. 1. Схема геологического строения участка Кадиламп-1 по [5] с дополнениями автора: 1 – туфы и сланцы основного состава; 2 – амфиболиты; 3 – граниты; 4 – метасоматиты; 5 – габбро; 6 – скважины и их номера; 7 – тектонические нарушения; 8 – опытно-методический профиль; 9 – обнажения

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА УЧАСТКЕ КАДИЛАМПИ-1

Геофизические работы на участке Кадиламп-1 проводились в 2004 году сотрудниками Карельской ГЭ и ИГ КарНЦ РАН с целью картирования гранитного массива и оконтуривания в нем кварцевого штокверка с пирит-молибденитовым оруденением. Проводились электроразведочные работы методом вызванной поляризации (ВП) установкой срединного градиента по сети (50 x 20 м) и магнитометрия с шагом по профилям 10 м [4]. Результаты этих исследований представлены на рис. 2а, б. Характер магнитного поля (рис. 2а) в восточной и центральной частях участка спокойный, без существенных градиентов. Интенсивность приведенных значений составляет от -150 до -200 нТл, что характерно для гранитного тела, зафиксированного в обнажениях. Оси положительных магнитных аномалий в западной части с интенсивностью до 300–500 нТл можно сопоставить с зонами повышенного (до 9500 Ом\*м) кажущегося удельного сопротивления (аномалии № 1 и 2) и существенного отклонения сдвига фазы ВП порядка  $-1,2^\circ$ . Вероятно, это связано с развитием в краевой части интрузива метасоматитов по вмещающим породам, с повышенным содержанием магнетита и сульфидов, выявленных также и севернее массива.

В центральной части гранитного массива зафиксированы две линейные системы зон повышенного (до 10000–12000 Ом\*м) кажущегося удельного сопротивления, не находящие отражения в магнитном поле. Оси аномалий № 4–7 имеют ССВ (субмеридиональное) простирание, а № 2 – азимут  $340^\circ$ . Зоны № 4, 5 и 6 прослежи-

ны на 50–150 м и имеют мощность от 50 до 100 м. Наиболее протяженной является зона № 7, по всей видимости, выходящая за область проведения геофизических работ, ее мощность на некоторых профилях превышает 100 м. Четкого сопоставления со значениями угла сдвига фазы ВП не выявлено, лишь на ПР 5 ПК 280 зафиксировано существенное отклонение  $-1,26^\circ$ , смещенное на 25 м к востоку от оси зоны № 4.

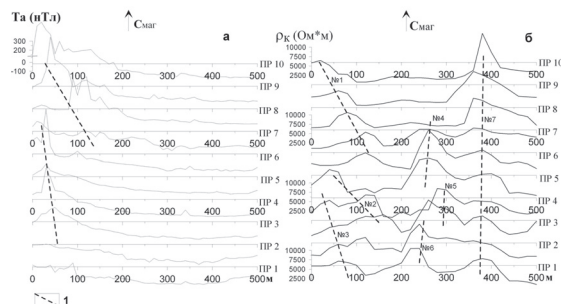


Рис. 2. Графики аномального магнитного поля (а) и кажущегося удельного сопротивления (б) на участке Кадиламп-1: 1 – оси аномалий

Опираясь на результаты геологического изучения обнажений, канав и скважин детального участка, для объяснения выявленных аномалий сделано предположение о штокверковом окварцевании интрузива и развитии прожилков по системе зон с доминирующим субмеридиональным и менее выраженным северо-западным направлением. Области наиболее интенсивного окварцевания обусловили повышение удельного сопротивления пород. Присутствующие в кварцевых жилах включения вкрапленно-прожилковой минерализации молибдена и других сульфидов, отмеченные в скважинах и канавах, не нашли отражения в результатах электропрофилирования и магнитометрии из-за совокупности неблагоприятных факторов: неравномерного распределения проводящих включений, крайне низких процентных содержаний и редкой сети наблюдений. Увеличение поляризуемости зафиксировано лишь на ПР 5 ПК 280, что, по видимому, приурочено к локальному повышению концентрации рудных минералов.

Малая информативность полученных результатов на участке Кадиламп-1 поставила вопрос о поиске методического подхода к выделению слабоконтрастных зон с бедной минерализацией и разработке геофизических критериев поиска. Для этого в 2011 году автором совместно с сотрудниками лаборатории геофизики ИГ КарНЦ РАН были проведены опытно-методические работы. В качестве опорного был выбран буровой профиль, проходящий через центральную часть ПР 5 (по работам Карельской ГЭ в 2004 году), длиной до 850 м (рис. 3). По всей его длине выполнена магнитометрия с шагом 2 м и электропрофилорвание ВП установкой срединного градиента шагом MN 5 м. По форме аномалий  $\rho_k$  и Та осуществлена привязка к предыдущим исследованиям.

В результате удалось выделить зону метасоматитов в западном экзоконтакте (ПК -220 – ПК -280), по аномалии геомагнитного поля до 500 нТл обрамленной повышенными до 2,5 % значениями поляризуемости, и восточный контакт (ПК 335) гранитного массива с вмещающими сланцами, отчетливо проявленный в смене характера кривых  $T_a$  и  $\rho_k$ , а также интрузию габбро-амфиболитов (рис. 3). Граниты массива Кадилампи характеризуются неравномерным распределением кажущегося удельного сопротивления и поляризуемости в области спокойного геомагнитного поля.

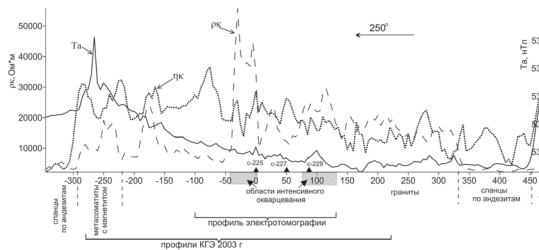


Рис. 3. Графики геофизических параметров по профилю I–II на участке Кадилампи-1

Помимо уменьшения шага измерений в ходе опытных работ предпринята попытка увеличения плотности тока и времени зарядки с целью фиксации слабых эффектов ВП над зонами бедной сульфидной вкрапленности. Имеющиеся аппаратные возможности и тщательное обустройство заземлений питающей линии позволили пропускать импульсы амплитудой до 1 А через весьма высокоомный разрез. Суммарно методические манипуляции позволили зафиксировать ряд аномалий ВП амплитудой до 2,5 % при времени зарядки 820 мс. Эксперименты с различной длительностью импульсов показали нецелесообразность ее дальнейшего увеличения ввиду существенного повышения затрат времени при отсутствии качественных изменений получаемых данных. На представленных графиках (рис. 3) прослеживается закономерность распределения пиков вызванной поляризации, как правило, они тяготеют к аномалиям  $\rho_k$  либо их крайним частям. Подобную корреляцию можно считать картировочным геофизическим признаком для слабоминерализованных зон.

**Электротомография.** Для получения детальной информации о характере распределения окварцевания и сульфидной минерализации в массиве применена методика электротомографии сопротивления и ВП аппаратным комплексом «Скала 48», разработанным в Сибирском отделении РАН, используя две двадцатичетырех-электродные косы с шагом между электродами 5 м. Измерения сопротивления и заряжаемости (одной из характеристик эффекта ВП) выполнены встречными трехэлектродными (pole-dipole) установками А-MN и MN-B, что обеспечило наибольшую глубину исследования при необ-

ходимой детальности и точности замеров [6]. По результатам математической обработки массива полученных замеров построен непрерывный геоэлектрический разрез кажущегося удельного сопротивления (рис. 4а) и заряжаемости (рис. 4б).

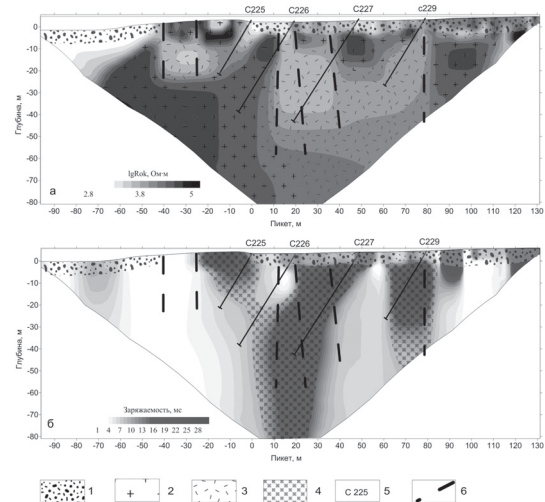


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы сопротивления (а) и заряжаемости (б) на участке Кадилампи-1: 1 – четвертичные отложения; 2 – монолитные, окварцованные граниты; 3 – зоны катаклаза и рассланцевания, биотитизации и пиритизации; 4 – области с сульфидной минерализацией; 5 – номера скважин; 6 – тектонические нарушения

Основными факторами, влияющими на распределение сопротивления в пределах одного литотипа, являются степень трещиноватости либо брекчирования пород, наличие и характер окварцевания. При этом присутствие убогой сульфидной минерализации может отразиться лишь на увеличении вызванной поляризации (заряжаемости). При сопоставлении полученного геоэлектрического разреза с имеющейся геологической информацией удалось оконтурить зону дислоцированных пород в центральной части гранитного массива и наиболее крупные тектонические нарушения. Повышенная степень трещиноватости в указанной области обусловила понижение кажущегося удельного сопротивления относительно более монолитных, окварцованных и менее измененных гранитов в крайних частях разреза (рис. 4а). Наличие сульфидной вкрапленности отмечено повышением заряжаемости до 20–30 мс (рис. 4б). Пространственное распределение по разрезу областей с различными электрическими свойствами имеет сложный характер, но в целом максимальный эффект ВП наблюдается в градиентных зонах кажущегося удельного сопротивления при переходе от максимальных значений к минимальным, что приводит к выводу о нахождении наибольших концентраций сульфидов на контакте между монолитными, интенсивно прокварцованными гранитами и зонами их дислокации.

Выполненные опытно-методические работы показали возможность стадийного наращивания

информативности результатов геофизических исследований от профильных работ на этапе картирования перспективных зон до использования методики электротомографии при детальном исследовании разреза с целью наиболее оптимального планирования буровых работ.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявление малосульфидных объектов на закрытых площадях в гранитах оказалось наиболее сложной задачей. Малосульфидный кварцевый штокверк в гранитах был установлен на

небольшой обнаженной площади и прослежен геофизическими методами. Установлено, что детальное расчленение слабоконтрастных областей, перспективных на Au-содержащее Cu-Mo-порфировое оруденение, возможно с помощью методики электротомографии сопротивления и ВП. Методы электротомографии позволили выделить наиболее перспективные участки штокверка размером до 100 м, повышенные значения заряжаемости и вариации кажущегося удельного сопротивления могут быть отнесены к поисковым признакам в слабоконтрастных полях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородулин Ю. Д., Кулешевич Л. В. Анализ геофизических полей участка Лобаш (Центральная Карелия) // Геология и геохимия докембрийских образований Карелии. Петрозаводск, 1986. С. 42–49.
2. Лавров О. Б., Кулешевич Л. В. Минералогия золотосодержащих медно-молибден-порфировых руд в архейских зеленокаменных поясах Карелии // Материалы Всероссийской конференции «Самородное золото». М., 2010. Т. I. С. 313–315.
3. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2005. 280 с.
4. Нилов М. Ю., Юдин С. Н., Кулешевич Л. В. Геологическое строение и геофизические исследования Северной Приграничной площади зеленокаменного пояса Ялонвара-Хатту-Тулоос // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. 2006. С. 100–120.
5. Юдин С. Н. Информационный отчет о результатах поисков месторождений золота и МПГ на участке Приграничный Северный в пределах гранит-зеленокаменной области Ялонвара – Иломантси за 2004 г. Петрозаводск: ТГФ, 2004.
6. Dahlin T., Zhou B. A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with Ten Electrode Arrays // Geophysical Prospecting, 2004. № 52. P. 379–398.
7. Geological development, gold mineralization and exploration methods in the Cate Archean Hattu Shist belt, Ilomantsi, eastern Finland / Ed. by Pekka A. Nurmi and P. Sorjonen-Ward // Geological Survey of Finland. Sp. paper 17. Espoo, 1993.

Nilov M. Yu., Institute of Geology of Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

#### GEOPHYSICAL CRITERIA FOR PROSPECTING Au-Cu-Mo-PORPHYRY STOCKWORK DEPOSITS: CASE STUDY OF KADILAMPI SITE IN WESTERN KARELIA

The goal of the project is to study the Kadilampi granite massif located in the Russian extension of Yalonvaara-Ilomantsi-Tuulos greenstone belt. It is known to host a cognominal Au-Cu-Mo-porphyry ore occurrence. To select geophysical criteria for prospecting similar massifs, experiments with the use of magnetometry, IP electrical profiling, resistance, and IP electrotomography methods were conducted. The granite massif was identified in host schist by the distribution patterns of the geomagnetic field and its resistance. The silicified stockwork zone with mineralization is faint negative according to IP parameter, but it creates elevated resistance anomalies upon electrical profiling. Based on the detailed study, using electrical tomography with reverse three-electrode set-ups, stockwork morphology was determined much more accurately. The most promising prospects with low-sulphide mineralization were delineated. The interpretation of the obtained geophysical data correlates well with drilling records. The proposed approach can be used for prospecting ore-bearing granite bodies and for identification of stockwork zones with Au-bearing Cu-Mo-porphyry mineralization.

Key words: Au-Cu-Mo-porphyry occurrence, stockwork, geophysical methods, electrotomography, searching criteria, greenstone belts

#### REFERENCES

1. Borodulin Yu. D., Kuleshevich L. V. The analysis of geophysical fields of Lobash site [Analiz geofizicheskikh poley uchastka Lobash]. *Geologiya i geokhimiya dokembriyskikh obrazovaniy Karelii*. Petrozavodsk, 1986. P. 42–49.
2. Lavrov O. B., Kuleshevich L. V. Mineralogy of auriferous copper-molybdenum porphyry ores in Archaean greenstone belts of Karelia [Mineralogiya zolotosoderzhashchikh medno-molibden-porfirovyykh rud v arkheyskikh zelenokamennykh poyasakh Karelii]. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii "Samorodnoe zoloto"* [Materials of the Russian Conference "Native gold"]. Vol. 1. Moscow, 2010. P. 313–315.
3. *Mineral'no-syr'evaya baza Respubliki Kareliya* [Mineral resources of the Republic of Karelia]. Petrozavodsk, Karelia Publ., 2005. 280 p.
4. Nilov M. Yu., Yudin S. N., Kuleshevich L. V. Geology and geophysical exploration of Northern Border area of Yalonvaara-Khattu-Tuulos greenstone belt [Geologicheskoe stroenie i geofizicheskie issledovaniya Severnoy Prigranichnoy ploshchadi zelenokamennogo poyasa Yalonvara-Khattu-Tulos]. *Gelologiya i poleznye iskopaemye Karelii*. Issue 9. 2006. P. 100–120.
5. Yudin S. N. *Informatsionnyy otchet o rezul'tatakh poiskov mestorozhdeniy zolota i MPG na uchastke Prigranichnyy Severnyy v predelakh granit-zelenokamennoy oblasti Yalonvara – Ilomantsi za 2004 g.* [Information report on the results of exploration of gold and PGM in the area within the northern boundaries of the granite-greenstone-Yalonvara Ilomantsi for 2004 y.]. Petrozavodsk, TGF. Publ., 2004.
6. Dahlin T., Zhou B. A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with Ten Electrode Arrays // *Geophysical Prospecting*. 2004. № 52. P. 379–398.
7. Geological development, gold mineralization and exploration methods in the Late Archean Hattu Schist belt, Ilomantsi, eastern Finland / Ed. by Pekka A. Nurmi and P. Sorjonen-Ward // Geological Survey of Finland. Sp. paper 17. Espoo, 1993. 386 p.

Поступила в редакцию 24.01.2013