

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛИЗОВАННОЙ ЗОНЫ НАДВИГА НА УЧАСТКЕ КЫЗЫЛ-СОР (СЕВЕРНЫЙ КАЗАХСТАН)

М.С. Шкиря¹, Ю.А. Давыденко², М.Г. Персова³, А.С. Башкеев⁴, Т.С. Шойхонова⁵

¹ИРНТУ, mshkiria@geo.istu.edu

² ИРНТУ, ООО «Гелиос», ИЗК СО РАН, davidenkoya@gmail.com

³НГТУ, persova@ami.nstu.ru

⁴ИРНТУ, ООО «Гелиос», abashkeev@geo.istu.edu

⁵ИРНТУ, tuyanas@list.ru

АННОТАЦИЯ

Импульсная электроразведка применялась при поисково-разведочных работах на севере Казахстана по оконтуриванию скрытых зон сульфидной минерализации медно-порфирирового типа. Основная задача работ была направлена на изучение депрессии «Кызыл-Сор» и выделение минерализованной зоны надвига. Способом решения поставленной задачи являлось комплексное применение аппарата одномерного и трехмерного моделирования данных электромагнитных зондирований.

В тезисах приводится сравнение результатов моделирования друг с другом и их сопоставление с априорной геологической информацией и данными бурения. Приводятся выводы о точности применения одномерного и трехмерного моделирования. Делается вывод о наличии или отсутствии медной минерализации в коре выветривания.

Ключевые слова: импульсная электроразведка, кора выветривания, зона надвига, штокверковая минерализация

ВВЕДЕНИЕ

Поисково-разведочные работы были проведены на участке работ «Кызыл-Сор» на территории северного Казахстана. Он располагается к северо-востоку в 200 км от города Нур-Султан и к востоку в 70 км от города Степногорск. Основной целью проведенных геофизических исследований являлось выявление скрытых зон сульфидной минерализации, для которых определяющими параметрами являются повышенные значения поляризуемости и высококонтрастные значения удельного электрического сопротивления (УЭС). Одной из задач являлось установление существования зоны надвига, в результате которого произошло разрушение штокверковой минерализации и последующий перенос минерализации в кору выветривания. Также задачей являлось оконтуривание и определение мощности коры выветривания. Для решения поставленных задач была применена технология электромагнитного зондирования и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП), а также было применено трехмерное моделирование данных электромагнитных зондирований. Полученные результаты были сопоставлены с данными бурения.

МЕТОД И ТЕОРИЯ

Метод ЭМЗ-ВП является методом импульсной электроразведки. Разрез возбуждается с помощью электрического диполя АВ, в то время как разность потенциалов измеряется на приемных электродах. В методе ЭМЗ-ВП используется установка срединного градиента (Жданов М.С., 1986). Использование установки с закрепленным генераторным источником и перемещающимся относительно него измерителем, используется в электроразведке с конца 80-х г. прошлого века (Соловейчик Ю. Г. и др., 2003; Gorunov A. et al, 2003). В различных модификациях метода вызванной поляризации (ВП) измерительные установки и временные диапазоны подбираются таким образом, чтобы минимизировать вклад индукционных процессов, которые традиционно рассматриваются как мешающий фактор (Давыденко Ю.А. и др., 2015). В методе ЭМЗ-ВП эти процессы используются для извлечения информации о строении геоэлектрического разреза. Разница напряжений между приемными электродами контролируется во времени (интервал 125 мс). Переходный процесс также регистрируется во время выключения тока. Такой подход позволяет устойчиво выделять эффект ВП в исследуемых породах и, в конечном итоге, перейти от традиционных кажущихся параметров

(кажущегося сопротивления (R_{ρ}) и кажущейся поляризуемости (η) к построению трехмерных геоэлектрических моделей по результатам решения обратной задачи, с учетом частотной дисперсии электропроводности (Пестерев И.Ю., 2012; Veeken, P. et al).

В методе ЭМЗ-ВП разрез возбуждается последовательностью прямоугольных разнополярных импульсов с помощью генераторного диполя АВ – горизонтальной электрической линией (ГЭЛ). На приемных электродах заземленной линии регистрируется полная последовательность импульсов, что позволяет рассчитать переходный процесс на заданных временных задержках, нормированных на разность потенциалов, взятую перед выключением токового импульса (Рисунок 1б).

В методах зондирования становлением поля при использовании петлевого незаземленного источника и приемника измеряется только вторичное электрическое поле, возникающее в результате резкого изменения магнитного поля из-за выключения (или включения) электрического поля в генераторной петле, в то время как в методе ЭМЗ-ВП измеряются оба поля, т. е. ГЭЛ является источником смешанного типа. При этом сама линия является источником индуктивного типа (как петля) и возбуждает поперечное электрическое поле, в то время, как электроды, заземляющие эту линию, возбуждают поперечное магнитное поле, т. е. иными словами в земле протекает электрический ток, пропускаемый генератором через питающие электроды А и В – ток пропускания (\vec{E}_1). Наряду с этим вокруг питающего провода создается переменное магнитное поле (\vec{H}_1), которое после выключения тока в линии индуцирует вторичное электрическое поле (\vec{E}_2), которое создает вторичный электрический ток (Рисунок 1а). Поля токов при этом накладываются и при наблюдениях вблизи питающей линии регистрируются суммарные напряженности E электрического или H магнитного поля.

При одномерном моделировании, осуществляемом в программе Mars1D, расчеты велись путём использования комплексного значения УЭС, зависящего от частоты. Для описания частотной зависимости УЭС использовалась формула Cole-Cole, применение которой позволяет описать большинство экспериментальных дисперсионных зависимостей в горных породах (Cole, K.S. and R.H. Cole, 1941).

При выполнении 3D моделирования использовалось специализированное программное обеспечение (ПО) «Информационно-программная система обработки данных для сопровождения

электромагнитных технологий геологоразведки», разработанное в Новосибирском государственном техническом университете.

Это ПО реализует конечноэлементное 3D моделирование геоэлектромангнитных полей (Persova, M.G. et al) с учетом разномасштабных, контрастных и, при необходимости, криволинейных (рельеф дневной поверхности) структурных частей геоэлектрической модели и геометрическую 3D инверсию (Персова М.Г. и др., 2020), которая в ходе решения трехмерной обратной задачи позволяет определять электрофизические параметры (проводимость, поляризуемость) структурных частей геоэлектрической модели и размеры этих структурных частей. Методика 3D инверсии базируется на использовании блочных структур, которые задавались с учетом системы наблюдений. В ходе 3D инверсии для каждого из блоков определялись проводимость, поляризуемость и координаты границ блоков.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На участке работ Кызыл-Сор с использованием технологии ЭМЗ-ВП было записано 1472 точки зондирования, общим объемом 36 погонных километров на 17 профилях с шагом 25 м.

В рамках одномерных поляризуемых моделей с целью поиска слепых рудных тел на глубине, содержащих сульфидную минерализацию, была выполнена одномерная инверсия электромагнитных зондирований. В результате одномерной инверсии не удалось получить приемлемую модель среды. Вследствие этого возникла необходимость в выполнении геометрической 3D инверсии. Результатом трехмерного подбора является наиболее достоверная в данной ситуации геологическая модель.

Анализ всех имеющихся исторических данных позволил сделать вывод о том, что медная минерализация участка Кызыл-Сор с потенциальным промышленным значением контролируется такими факторами, как наличие слабо эродированных «карманов» коры выветривания, присутствие в монцодиоритах первичной Cu-Mo прожилково-штокверковой минерализации. В дополнение к расположению в пределах гранитоидного комплекса, выделяются такие рудоконтролирующие факторы, как разломы северо-западного простирания, кварцевые штокверки с бедной минерализацией меди и дайки риодацит-порфиоров, несущие рассеянную медную минерализацию. Вся потенциально-промышленная медная минерализация участка Кызыл-Сор была сформирована в зоне выветривания и окисления за счет бедной сульфидной

прожилковой и штокверковой минерализации. Практически повсеместно отмечаются процессы вторичного восстановления, которые привели к образованию халькозина и самородной меди (Гуревич Д.В., 2013). В глинистой части коры выветривания наблюдается вторичное обогащение, приводящее к формированию руд с содержанием меди до процента и более, при этом обогащение происходит за счет накопления различных минеральных форм - окисленных, карбонатных и вторичных сульфидных. По отношению к зональности, связанной с процессами выветривания и современного осадкообразования, основная доля оруденения сосредоточена в глинистых породах –структурных глинах верхней зоны коры выветривания и переотложенных глинах. Основная часть оруденения в коре выветривания была сформирована за счет гипергенного перераспределения меди и ее накопления (предположительно сорбционного) в глинистых фациях. Исходя из имеющихся палеоклиматических и геологических данных этот процесс может быть отнесен к мел-палеогеновому времени. Более поздние (неоген-четвертичные) тектонические процессы привели к неравномерному (блоковому) подъему территории и неравномерной денудации. В результате большая часть кор выветривания была эродирована, при этом часть высвобожденной меди в виде растворов мигрировала с подземными водами и переотлагалась в глинистых породах, часть – преимущественно в виде обломков и взвесей - мигрировала с поверхностными водами и фиксировалась в переотложенных (бесструктурных и слоистых) каолиновых глинах и, реже, песках.

Изучение керн скважин и минералого-петрографические данные позволили предположить, что в пределах рудной зоны Кызыл-Сор наиболее важную роль в рудоконтроле играет надвиг. Выдвинута гипотеза о разрушении штокверков в результате надвига, вследствие чего вся потенциально-промышленная медная минерализация участка Кызыл-Сор была сформирована в зоне выветривания.

По итогам инверсии были построены разрезы по данным УЭС и поляризуемости на глубину 300 метров. На разрезах УЭС отчетливо проявляются структурные особенности строения территории. По одномерной инверсии выделена кора выветривания мощностью до 50 метров (Шкиря М.С., 2020). На разрезе по результатам трехмерной инверсии, выделяется высокоомный объект (выделен синим контуром). Данные образования под корой соответствуют сульфидной минерализации. Указан предполагаемый надвиг, расположенный в зоне

депрессии (рисунок 2).

На рисунке 3 представлены результаты трехмерного моделирования по параметрам УЭС. Выделена область пониженного УЭС, скорее всего приуроченная к обводненной зоне, содержащей рассол. На карте наблюдается также раздробленность высокоомных аномалий, которую можно объяснить ранее упомянутой зоной надвига. Красным контуром обозначена зона убогой штокверковой минерализации, выделенная по данным ЭМЗ-ВП.

Выводы

При выполнении интерпретации данных, полученных на участке «Кызыл-сор» с использованием технологии ЭМЗ-ВП, было установлено, что полученная по 1D инверсии оценка мощности коры выветривания не противоречит имеющимся данным бурения и может использоваться для оценки запасов окисленных руд. Благодаря применению геометрической трехмерной инверсии удалось существенно улучшить сходимость модельных и наблюдаемых кривых, что в свою очередь, позволило получить геологически непротиворечивую модель среды.

Было выдвинуто предположение об образовании надвига в результате тектонических нарушений северо-западного направления, после чего произошло разрушение предполагаемого сульфидного штокверка, а также образование зоны депрессии.

Отмечено, что вся потенциально-промышленная медная минерализация участка Кызыл-Сор сформирована в зоне выветривания и окисления за счет бедной сульфидной прожилковой и штокверковой минерализации. Надвиг взрыхлил убогие медные штокверки и обеспечил проницаемость и перераспределение меди в коре выветривания.

Благодарности

Авторы чрезвычайно благодарны Дмитрию Владимировичу Гуревичу за творческую геологическую интерпретацию электромагнитных зондирований и активную позицию в продвижении передовых геофизических технологий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 20-67-47037 «Методологическое и программное обеспечение обработки больших объемов данных электромагнитных зондирований, гравиразведки и БПЛА-магниторазведки на основе

комплексного решения трехмерных обратных задач рудной геофизики».

электромагнитного зондирования Земли становлением поля», Сиб. журн. индустр. матем., 6:1 (2003), 138–153

ЛИТЕРАТУРА

Гуревич Д.В. Картирование куполо-кольцевых структур при поисках порфировых и эфитермальных месторождений. В кн.: Материалы конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский, с. 280-290 с. <http://www.kscnet.ru>.

Давыденко Ю.А., Попков П.А., Новопашина А.В. Перспективы использования индукционной составляющей переходного процесса в традиционных методах постоянного тока // Геофизические исследования. 2015. Т. 16, № 4. С. 73–84.

Жданов М.С. Электроразведка: Учебник для вузов. М.: Недра, 1986. 316 с.

Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Трубачева О.С., Вагин Д.В., Киселев Д.С., Сивенкова А.П., Кошкина Ю.И. Подходы к геометрической 3D-инверсии данных электромагнитных зондирований с гальванически заземленными линиями с учетом вызванной поляризации // ГеоБайкал 2020. – Европейская ассоциация геоученых и инженеров (EAGE), 2020. – Т. 2020. №. 1. С. 1-6. УДК: 10.3997/2214-4609.202052022.

Пестерев И.Ю. а.с.2012660743 Российская федерация. Программа одномерной инверсии «Mars1D»/ Пестерев И.Ю. – заявка 2012618705 от 16.10.2012; зарег. 28.11.2012.

Соловейчик Ю. Г., Тригубович Г. М., Чернышев А. В., Рояк М. Э. «Об одном подходе к решению трехмерной обратной задачи

Шкиря М.С, Гуревич Д.В., Терешкин С.А., Белова А.Ю., Давыденко Ю.А. Применение импульсной электроразведки для выделения зон сульфидной минерализации медно-порфирового типа на территории Северного Казахстана. // ГеоБайкал 2020. – Европейская ассоциация геоученых и инженеров (EAGE), 2020. - Т. 2020. №. 1. С. 1 - 5. УДК: 10.3997/2214-4609.202052031.

Cole, K.S. and R.H. Cole, 1941, Dispersion and absorption in dielectrics. Journal of Chemical Physics, 6, 341-353.

Gorunov A., Kiselev E., I. Kondratiev, Safonov A., Tertyshnikov K. and Chernov V. The role of high-resolution electrical survey (HRES-IP) in complex of geophysical methods during exploration, prospecting and exploitation of oil and gas deposits. European Association of Geoscientists & Engineers. Source: Conference Proceedings, Geophysics of the 21st Century - The Leap into the Future, Sep 2003, cp-38-00297. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.38.F188>.

Persova, M.G., Soloveichik, Y.G., Vagin, D.V., Kiselev, D.S. & Koshkina, Y.I., 2020. Finite element solution to 3-D airborne time-domain electromagnetic problems in complex geological media using non-conforming hexahedral meshes. Journal of Applied Geophysics 172 (103911).

Veeken, P., Legeydo, P., Davidenko, Y., Kudryavceva, E., Ivanov, S., Chuvaev, A. [2009]. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration. (Vol. a). Geophysics, 74, 47-59.

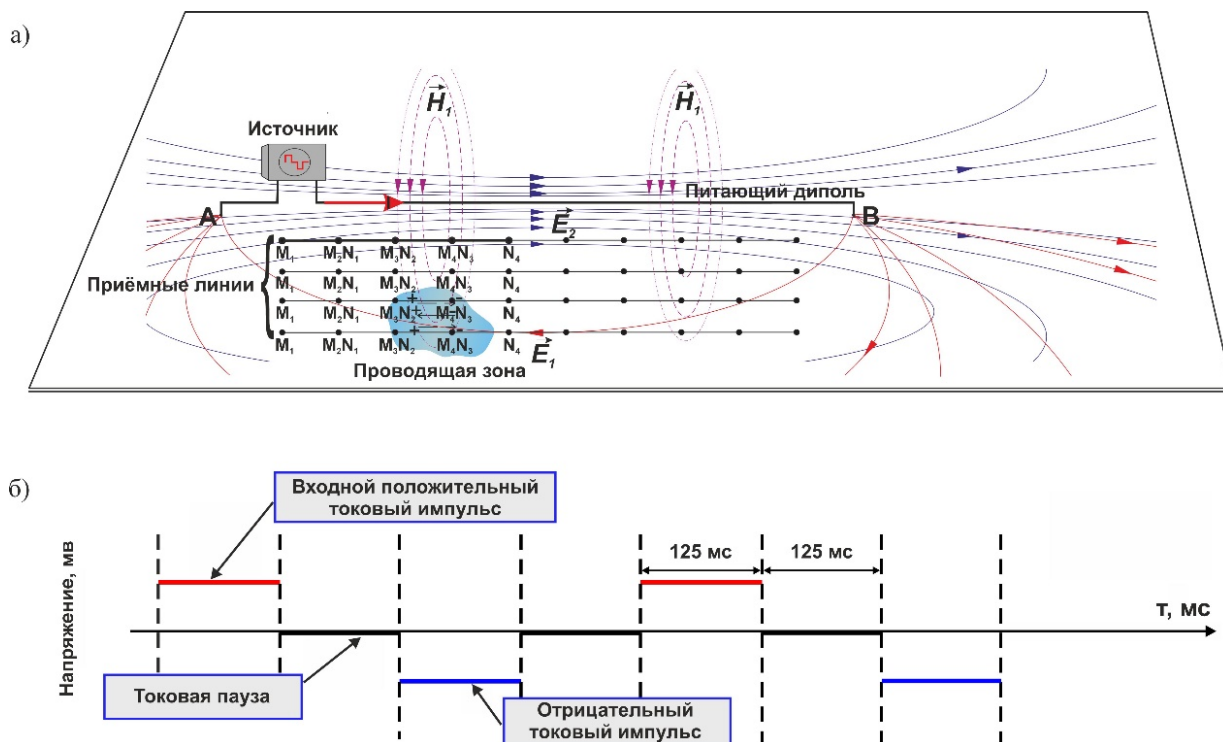


Рисунок 1. Гальванический способ возбуждения нестационарных электромагнитных полей: а) Схема установки, используемая в методе ЭМЗ-ВП; б) График зависимости напряжения от времени, отображающий форму переходных процессов.

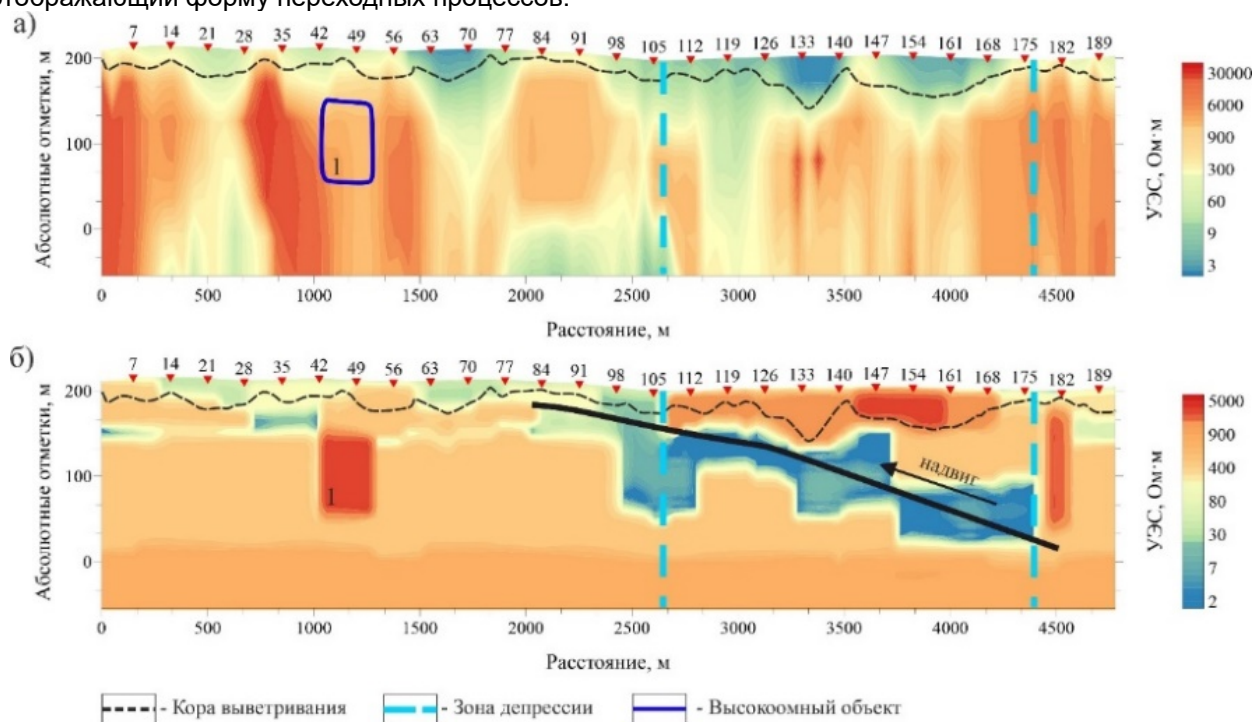


Рисунок 2. Разрезы по профилю № 4 по параметру УЭС по результатам одномерной (а) и трехмерной (б) инверсии.

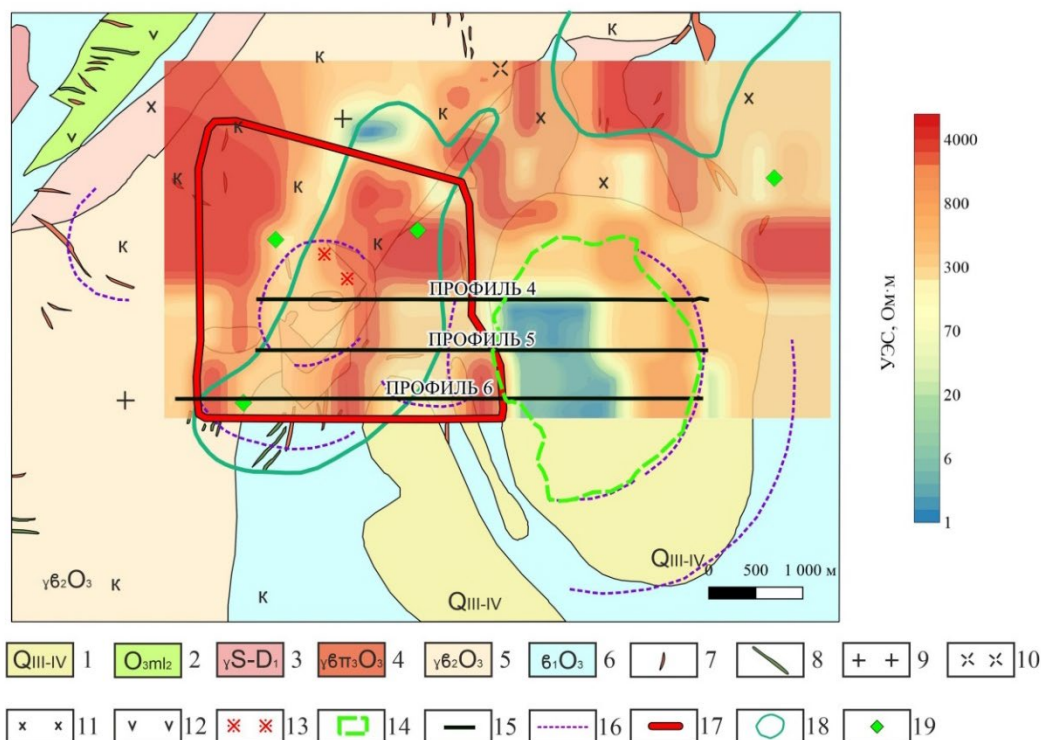


Рисунок 3. Результаты 3D моделирования по параметру УЭС. 1 – Верхний – современный отделы. Аллювиальные и озерно-болотные отложения: пески, глины, супеси; 2 - Подсвета дацитовых порфиров; 3 – Боровский интрузивный комплекс. Аляскитовые граниты; 4 – Породы фазы дополнительных интрузий ко второй интрузивной фазе. Порфиroidные гранодиориты, гранодиорит-порфиры; 5 – II главная фаза. Среднезернистые гранодиориты; 6 – Диорит; 7 – Дайки фельзит-порфиров; 8 – Дайки основного состава; 9 – Граниты; 10 – Порфиroidные гранодиориты; 11 – Диориты, кварцевые диориты; 12 – Андезитовые и дацитовые порфиры; 13 – Кварц - турмалиновые метасоматиты; 14 – Озеро «Кызыл-Сор»; 15 – Линии ЭМЗ-ВП; 16 - Элементы кольцевых структур; 17 - Зона убогой штокверковой минерализации; 18 – Ареалы вторичных ореолов меди (>0.03-0.05%); 19 – Рудопроявления меди.