

**О ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ В СКВАЖИНАХ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ НИКЕЛЯ НА ВОРОНЕЖСКОМ
КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ МАССИВЕ
(ЧАСТЬ ПЕРВАЯ — МЕТОДЫ КАРОТАЖА)**

А. А. Аузин

Воронежский государственный университет

Обострение проблем, связанных с восполнением минерально-сырьевой базы России, инициировало повышенное внимание к никеленосному району на юго-востоке Воронежского кристаллического массива (ВКМ). В такой ситуации значительный прикладной интерес представляет оценка геологической эффективности геофизических исследований, направленных на поиски и разведку месторождений никелевых руд ВКМ. Данная статья посвящена анализу результативности геофизических исследований в скважинах.

Ключевые слова: геофизические исследования в скважинах, месторождения никеля, Воронежский кристаллический массив.

Начиная с конца 50-х — начала 60-х годов прошлого века для решения различных задач, прямо или косвенно связанных с поисками и разведкой месторождений никелевых руд в пределах юго-востока Воронежского кристаллического массива (ВКМ), с различным успехом применялось или было опробовано значительное количество методов геофизических исследований в скважинах (ГИС).

Методы ГИС принято делить на две группы, одна из которых относится к скважинной геофизике, а другая — к каротажу. Основанием для подобного деления являются характерные размеры областей исследования соответствующих методов, они же определяют и сферу их применения. Методы скважинной геофизики, для которых типична значительная область исследования, предназначены для изучения околоскважинного пространства в радиусе до нескольких сотен метров, при односкважинных исследованиях, или опосредованного межскважинного пространства аналогичных размеров при проведении работ по схеме «скважина-скважина». Методы каротажа, позволяющие исследовать лишь прискважинную часть разреза в радиусе от нескольких миллиметров до первых метров, основными целями своего применения имеют: определение литологических характеристик и физического состояния вскрытых скважинами разрезов, выявление и опробование полезных ископаемых, а также исследование технического состояния

скважин [1]. В рамках данной статьи на примере работ, проведённых в пределах месторождений и рудопроявлений сульфидного никеля ВКМ, рассматриваются некоторые аспекты геологической результативности методов каротажа.

На месторождениях сульфидного никеля так называемого «еланского типа», а именно таковыми и являются рассматриваемые рудные объекты, резко преобладают вкрапленные руды, а прожилково-вкрапленные и массивные имеют ограниченное развитие (10–15 и 2–3 % соответственно). Однако, несмотря на относительно невысокую долю густовкрапленных, прожилково-вкрапленных и сплошных руд, в сумме они аккумулируют порядка половины полезных компонентов, прежде всего — никеля и кобальта. Вкрапленные руды являются халькопирит-пентландит-пирротиновыми с ограниченным развитием арсенидов и сульфидов арсенидов никеля и кобальта. Гнездово-прожилковые и сплошные (массивные) разновидности руд относятся преимущественно к пентландит-пирротиновым [2]. Для такого рода месторождений характерно сложное внутреннее строение, крайняя неустойчивость структурно-текстурных типов руд и прерывистость оруденения. Всё это существенно затрудняет расчленение разрезов и корреляцию рудных подсечений по одним лишь геологическим данным без привлечения материалов ГИС.

Физические свойства интрузивных пород (норитов, габбро-норитов, габбро-пироксенитов и пр.),

вмещающих оруденение, существенным образом зависят не только от их минерального состава и физического состояния, но и от концентрации в них рудной составляющей. В частности, удельное электрическое сопротивление безрудных норитов составляет тысячи Ом · м и закономерно уменьшается на один-два и более порядков по мере увеличения содержания в них обладающих электронной проводимостью сульфидов. Резкое падение сопротивления, вплоть до десятых-тысячных долей Ом · м, происходит, когда концентрация сульфидов достигает 80–90 % [3]. Однако если сульфиды образуют единую электропроводную матрицу, аналогичное уменьшение удельного сопротивления происходит и при существенно меньших концентрациях. В частности, у прожилковых руд, для которых характерны так называемые «сетчатые» структуры, наличия 3–5 % сульфидов может оказаться достаточным, чтобы обеспечить высокую электропроводность агрегатов в целом [4].

Анализ физических свойств руд и вмещающих пород (см. табл. 1) позволяет с уверенностью говорить о том, что на объектах такого рода максимальной потенциальной эффективностью обладают геофизические методы исследований, основанные на дифференциации сред по удельному электрическому сопротивлению, вызванной электрической поляризуемости, магнитной восприимчивости и плотности.

Каротаж скважин, выполнявшийся на месторождениях и рудопроявлениях сульфидного никеля ВКМ, имел целью решение следующих основных задач:

- литологическое расчленение разрезов скважин и корреляция пород осадочной части разреза;
- выделение зон сульфидного оруденения, определение глубины их залегания и мощности;
- определение физических свойств пород и руд в их естественном залегании — удельного электрического сопротивления, естественной радиоактивности, магнитной восприимчивости, плотности, естественной и вызванной электрических поляризуемостей;
- оценка структурно-текстурных характеристик оруденения;
- поиски радиоактивных руд;
- оценка гидрогеологических параметров разрезов;
- определение зенитных и азимутальных углов скважин.

Комплекс методов каротажа включал в себя каротаж сопротивления (КС), гамма-каротаж (ГК), каротаж самопроизвольной поляризации (ПС), метод электродных потенциалов (МЭП), метод скользящих контактов (МСК), каротаж магнитной восприимчивости (КМВ), каротаж потенциалов вызванной поляризации (каротаж ВП) и инклинометрию. В опытно-производственном порядке проводился плотностной гамма-гамма каротаж (ГГК-П). В ограниченном количестве скважин выполнялись кавернометрия и термометрия. Кавернометрия позволяет выявлять во вскрытых скважинами разрезах тектонически ослабленные, трещиноватые зоны, для которых характерна повышенная кавернозность. С помощью скважинной термометрии фиксируется распределение темпе-

Таблица 1

Физические свойства пород и руд Еланского месторождения (по В.В. Олейникову и др., 1995)

Породы	Кол-во образцов	Физические свойства		
		среднее пределы изменения		
		δ , г/см ³	ж, Ч10 ⁻⁵ ед. СИ	η_k , %
Нориты, габбро-нориты безрудные	989	<u>2,85</u> 2,81–2,97	<u>30</u> 20–75	<u>0,64</u> 0,2–2,8
Нориты, габбро-нориты с бедной вкрапленностью сульфидов	467	<u>2,88</u> 2,81–3,16	<u>980</u> 25–37 000	<u>12,4</u> 2,5–30,4
Нориты с вкрапленностью сульфидов	178	<u>3,08</u> 2,81–2,97	<u>230</u> 160–350	<u>21,2</u> 2,9–49,1
Нориты с вкрапленностью сульфидов	184	<u>3,18</u> 2,97–3,31	<u>870</u> 270–2010	<u>44,8</u> 29,2–56,8
Вкрапленные и брекчиевидные прожилково-вкрапленные руды в норитах	152	<u>3,12</u> 2,86–3,31	<u>620</u> 165–1000	<u>51,9</u> 23,4–61,2
Густо- мелко-вкрапленные существенно пирротиновые руды в норитах	99	<u>3,2</u> 3,0–3,28	<u>660</u> 100–1980	<u>38,9</u> 28,9–68,9
Массивные жильные руды в норитах	134	<u>4,38</u> 4,06–4,56	<u>2450</u> 205–13 000	<u>72,8</u> 42,0–97,2

ратуры вдоль ствола скважины, а по этим данным вычисляются параметры, характеризующие тепловое поле разреза, — геотермический градиент и поверхностная плотность теплового потока. Тепловое поле связано с литологическими характеристиками разреза и особенностями тектонического строения не только участка работ, но и региона в целом.

КС предназначен для расчленения разрезов по удельному электрическому сопротивлению и в продуктивной части разреза позволяет выявлять хорошо проводящие ток электрически связанные между собой включения сульфидов массивной, прожилково-вкрапленной и т. п. текстур, а также обладающие повышенной электропроводностью обводнённые трещиноватые зоны.

ГК применяется для расчленения разрезов по естественной радиоактивности. В частности, для интервалов сульфидной минерализации характерны достаточно низкие, не превышающие 5 мкР/ч, значения естественной радиоактивности. Значительные изменения естественной радиоактивности пород могут быть обусловлены процессами метаморфизма.

ПС предназначен для расчленения разрезов по величине самопроизвольной электрической поляризации. Интервалы сульфидной минерализации на диаграммах ПС отмечаются глубокими отрицательными аномалиями, интенсивность которых против интервалов массивных руд максимальна.

МЭП фиксирует наличие в разрезах минералов, имеющих электронный тип проводимости, — сульфидов, графита и пр. Электродные потенциалы электроположительных сульфидов в ряду молибденит → сфалерит → галенит → пентландит → пирротин → арсенопирит → халькопирит → пирит → марказит последовательно увеличиваются от приблизительно +100 мВ вплоть до величин порядка +500 мВ [5], причём их величина зависит ещё и от текстурных параметров сульфидной минерализации (она максимальна у массивных руд). Таким образом, по характеру кривых МЭП можно судить не только о вещественном составе оруденения, но и о его текстурных особенностях [6].

МСК, являющийся более эффективной разновидностью токового каротажа (ТК), основан на исследовании сопротивления заземления щеточного токового электрода путем измерения силы стекающего с него тока, которая в момент попадания зонда в рудный прослой резко возрастает. МСК широко применяется для выделения в разрезах рудной вкрапленности и локализации хорошо про-

водящих рудных пластов, прослоев и маломощных жил. К положительным качествам метода следует отнести простоту его практической реализации. Однако на кривых МСК, в отличие от МЭП, отмечаются и безрудные зоны, обладающие ионным типом проводимости, в частности — обводнённые трещиноватые породы.

КМВ позволяет выявлять интервалы, обогащенные минералами-ферримагнетиками, в частности — пирротин и магнетитом. Поскольку среди сульфидов никелевых руд ВКМ преобладает пирротин, в том числе и обладающий высокой магнитной восприимчивостью, моноклинный, метод весьма эффективен для выделения в разрезах руд пирротинового состава. Как правило, КМВ осуществляется комплексной аппаратурой параллельно со скважинной магниторазведкой, что ещё более повышает эффективность исследований.

Каротаж ВП, который на ВКМ обычно проводился установкой А5М1N, позволяет фиксировать присутствие в разрезах обладающих электронной проводимостью минералов — сульфидов, графита и пр. Несомненным достоинством метода является то, что он реагирует и на наличие мелкой, электрически не связанной вкрапленности, которая практически не изменяет удельного электрического сопротивления вмещающих её пород и, как правило, не фиксируется на кривых КС. Оруденение такого рода может быть не выявлено и методом электродных потенциалов (МЭП). Поскольку скорости становления и спада вызванной поляризации зависят от текстурных особенностей руд, то изучение временных параметров ВП даёт возможность определения структурно-текстурных характеристик оруденения.

ГГК-П позволяет осуществлять расчленение разрезов по плотности. Среди факторов, снижающих его эффективность, необходимо выделить подверженность метода влиянию не связанных в вещественном составе закономерно измененной плотности, обусловленных трещиноватостью пород и кавернозностью стенок скважин, что весьма характерно для рудных интервалов никелевых месторождений ВКМ.

В качестве примера, иллюстрирующего высокую геологическую эффективность МЭП, КМВ и скважинной магниторазведки (СМ), могут выступать результаты исследований, выполненных в скв. 12 на одном из месторождений сульфидного никеля ВКМ (рис. 1). Материалы ГИС свидетельствуют об увеличении содержания сульфидов в нижней части приведённого интервала. При этом

участок разреза ниже глубины 836 м сложен преимущественно массивными, существенно пирротиновыми рудами, о чем свидетельствуют характер кривой МЭП и высокая магнитная восприимчивость пород, отмечаемая на кривой КМВ.

Таким образом, геофизические исследования скважин позволяют достаточно уверенно проводить геологическое расчленение разреза, в том числе выделять рудные пересечения, оценивать их вещественный состав и текстурно-структурные особенности.

Материалы каротажа позволяют не только надежно привязывать интервалы сульфидизации по глубине, но и выявлять рудные пересечения, не установленные по результатам исследования керна, что, в числе прочего, может быть вызвано и его недостаточной представительностью. Примером подобной результативности могут служить материалы геофизических исследований в скважинах 64 и 65, пройденных в пределах одного из рудопроявлений сульфидного никеля ВКМ, где до этого оруденение было вскрыто лишь одной единственной скважиной 43, с чем и связывается его открытие в середине 70-х годов прошлого века.

Данные ГИС свидетельствуют о присутствии во вскрытом скважинами разрезе рудных пересечений, не отмеченных в геологических описаниях скважин. В частности, скважина 64 (рис. 2) на глубине 622,8 вошла в зону сульфидного оруденения, из которого не вышла вплоть до забоя, причем на глубинах 622,8—642,7 м ею вскрыто не менее трёх интервалов, сложенных массивными рудами. Именно здесь, по геологическим данным, скважиной пересечено разрывное нарушение, что косвенно подтверждает низкий выход, а, возможно, и полное отсутствие керна именно из этой части разреза. А то, что бурение скважины было остановлено в пределах интервала пород, обогащённых сульфидной вкрапленностью, наводит на мысль об аварийном её завершении. Скважиной 65 встречено два минерализованных интервала — 598,8—611,0 и 692,0—705,0 м. Чёткая выраженность сульфидизированных участков разреза в материалах КМВ и СМ свидетельствует о существенно пирротиновом характере оруденения. А именно пентландит-пирротиновый состав наиболее характерен для богатых гнездово-прожилковых и массивных руд еланского типа.

Представленные результаты ГИС служат достаточным основанием для корректировки представлений о геологическом строении рудопроявления, в частности — уточнения геологического

разреза по проходящему через скважины 65, 43 и 64 профилю (рис. 3), и могут быть использованы при определении стратегии его дальнейшей разведки.

Как известно, оптимальный комплекс исследований любого рода предполагает гарантированное решение поставленных задач входящим в него набором методов при минимизации затрат на их реализацию. В идеальном варианте состав комплекса методов ГИС должен определяться исключительно решаемыми задачами и геологической обстановкой на объекте исследований, однако при его выборе, как минимум, приходится учитывать и скважинные условия — диаметр и состояние стенок скважины, её глубину, физические параметры среды, заполняющей скважины, наличие и характеристики обсадной колонны.

Можно считать, что с оптимальным наполнением комплекса методов каротажа, направленного на поиски и разведку месторождений никелевых руд в пределах юго-востока ВКМ, существует достаточная определённость — в его состав должны входить КС, ПС, ГК, МЭП, КМВ, каротаж ВП и инклинометрия. При этом необходимо обратить внимание на обеспечение высокого качества проведения инклинометрии (чему не всегда уделяется должное внимание), поскольку адекватные данные о пространственном положении скважин имеют решающее значение при реконструкции геологических разрезов, в особенности на глубоких горизонтах месторождений [7]. Желательно включить в комплекс кавернометрию, поскольку, как это отмечено применительно к Еланскому месторождению (В. В. Олейников, 1995), она имеет прямое отношение и к другим месторождениям и рудопроявлениям сульфидного никеля ВКМ, «в подавляющем большинстве рудные тела приурочены к зонам дробления, трещиноватости и микротрещиноватости и к открытым полостям в норитах». При разбуривании подобных интервалов разреза часто наблюдается неполный выход керна, а информативность геофизических исследований может снижаться, поскольку повышенная кавернозность нередко приводит к искажению результатов каротажа.

Вместе с тем, необходимо иметь в виду, что практически все неядерные методы каротажа являются косвенными и, как правило, сами по себе в принципе не могут дать однозначного ответа на вопрос о геологической природе той или иной аномалии геофизического поля. Вероятность адекватного решения этой важнейшей проблемы повы-

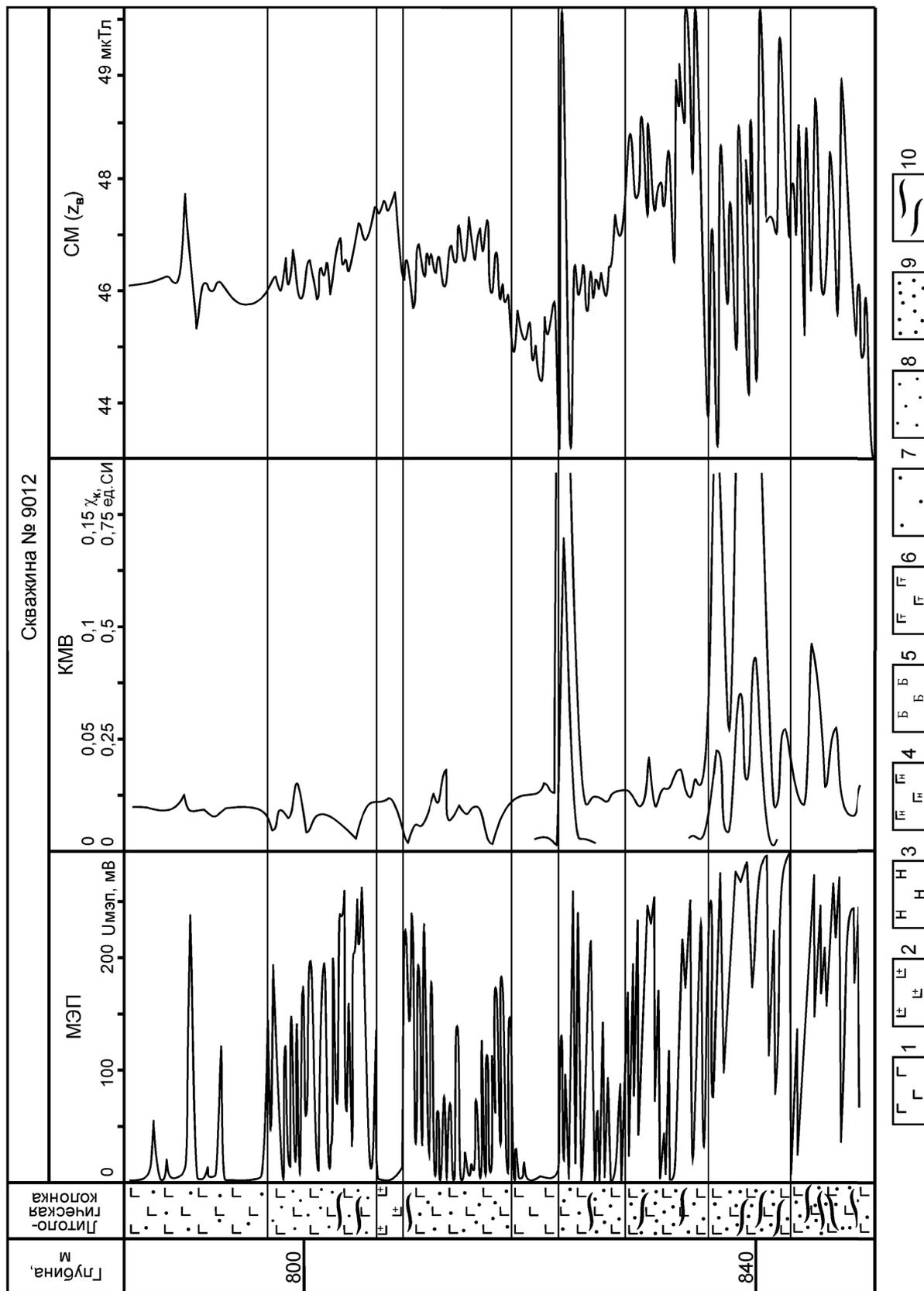


Рис. 1. Результаты ГИС в скв. 12: 1 — нориты; 2 — диориты; 3 — пироксениты; 4 — габбро-пироксениты; 5 — биотититы; 6 — троктолиты; 7 — редкая вкрапленность сульфидов; 8 — тонкая вкрапленность сульфидов; 9 — сульфидные руды; 10 — электрически связанные сульфиды массивной, прожилковой и т. п. текстур

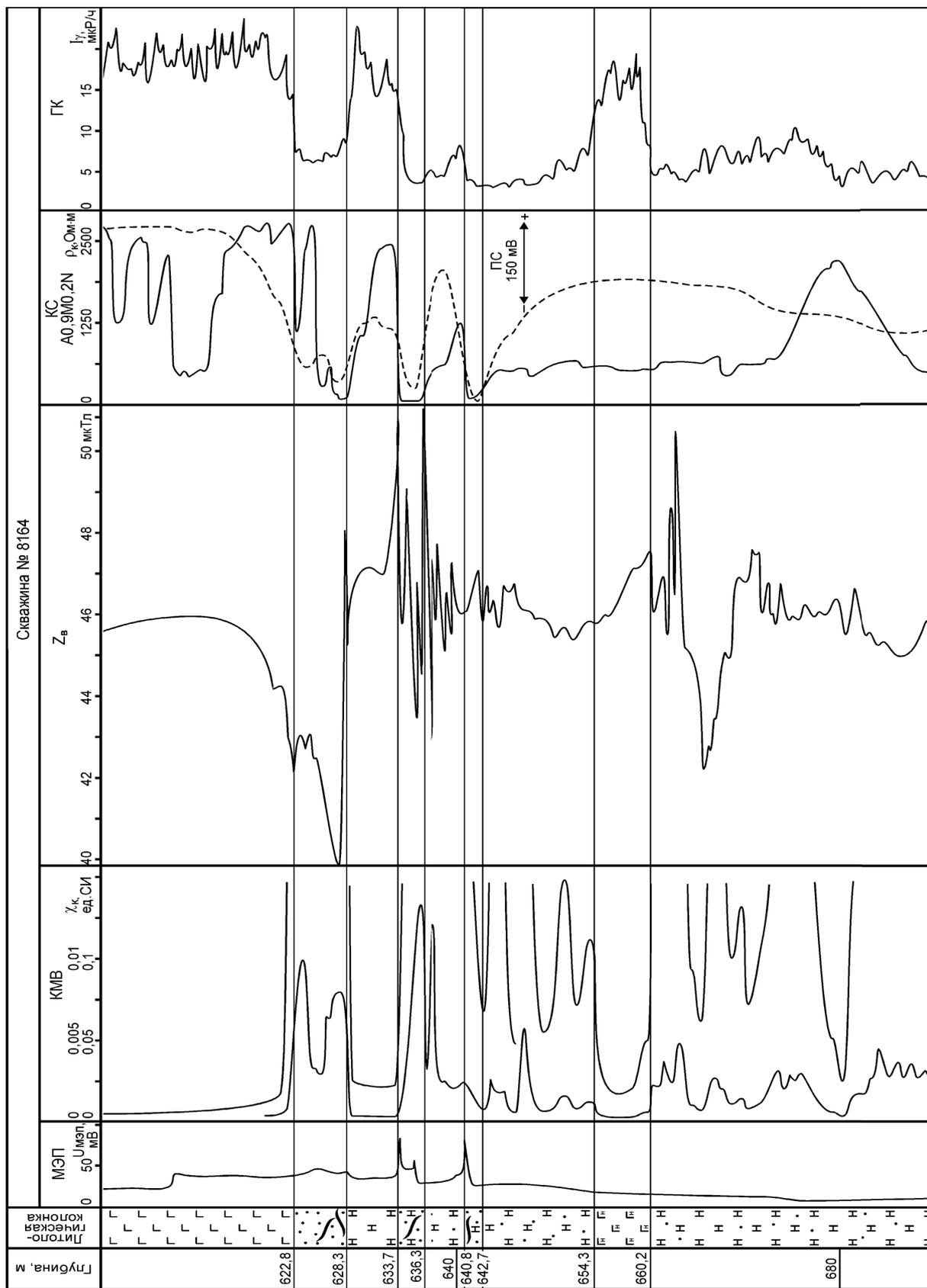


Рис. 2. Результаты каротажа скв. 64: условные обозначения см. на рис. 1

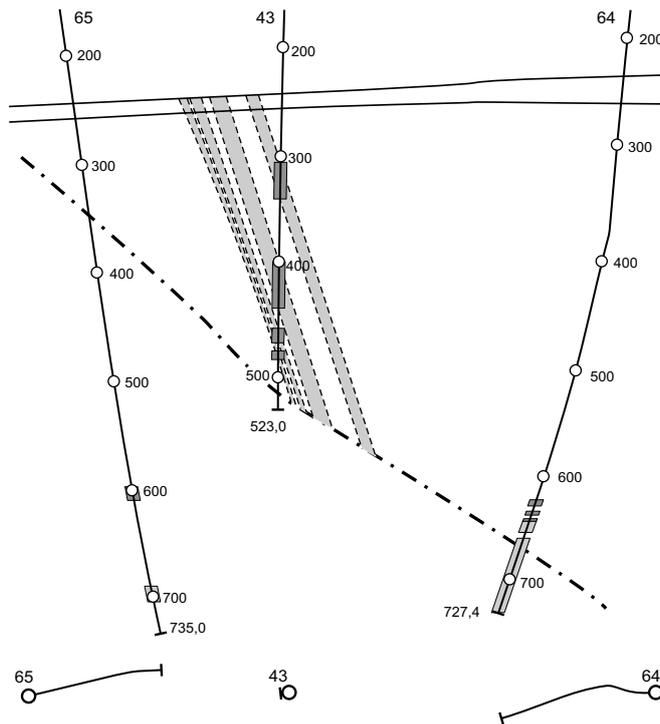


Рис. 3. Геологический разрез через скважины 65, 43 и 64 (по В. В. Олейникову, 1982, с упрощениями). Показаны рудные пласты и элементы разрывной тектоники. На скважины вынесены рудные пересечения (более тёмным цветом показаны массивные руды)

шается, если исследования осуществляются обоснованным комплексом геофизических методов, в особенности, когда физические основы входящих в него методов различны.

Для устранения самой возможности пропуска никельсодержащих интервалов разреза следует предусмотреть введение в комплекс каротажа методов, которые бы позволили реализовать геофизическое опробование стенок скважин на никель (возможно, молибден и другие элементы). В качестве таковых могут выступать спектрометрической нейтронный гамма-каротаж (НГК-С), нейтрон-нейтронный каротаж по тепловым нейтронам (ННК-Т) и, возможно, рентгенорадиометрический каротаж (РРК). Опыт проведения исследований скважин на месторождениях медно-никелевых руд свидетельствует, что НГК-С и ННК-Т обеспечивают точность определения содержания никеля до

0,12–0,15 % [8, 9]. Вместе с тем, необходимо отметить, что проблема геофизического опробования требует дополнительного, более предметного изучения.

В заключение, автор выражает свою признательность руководству ОАО «Воронежгеология», предоставившему возможность ознакомиться с некоторыми фондовыми материалами, касающимися рассмотренной проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аузин А. А. Геофизические исследования в скважинах: вопросы терминологии и классификации / А. А. Аузин // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. — 2005. — № 1. — С. 216–221.
2. Чернышов Н. М. Сульфидные платиноидно-медно-никелевые месторождения еланского типа (геология, закономерности размещения, минералогическо-геохимические особенности руд, геолого-генетическая модель формирования) / Н. М. Чернышов // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. — 1998. — № 5. — С. 120–151.
3. Аузин А. А. Влияние структуры пород на их удельную электрическую проводимость / А. А. Аузин // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. — 1998. — № 5. — С. 195–198.
4. Опыт применения геофизических методов исследования скважин при разведке медно-никелевых месторождений. Бюллетень научно-технической информации. Серия: Региональная, разведочная и промысловая геофизика. — № 18. — М. : ВИЭМС, 1969. — 70 с.
5. Свешников Г. Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях / Г. Б. Свешников. — Л. : Изд-во ЛГУ, 1967. — 160 с.
6. Мейер В. А. Каротаж скважин при разведке полиметаллических месторождений / В. А. Мейер. — Л. : Изд-во ЛГУ, 1960. — 208 с.
7. Аузин А. А. Некоторые проблемы реализации данных инклинометрии скважин / А. А. Аузин, В. В. Глазнев // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. — 1998. — № 5. — С. 241–243.
8. Инструкция по проведению геофизических исследований рудных скважин / под ред. Е. П. Лемана и А. П. Савицкого. — СПб. : ВИРГ-Рудгеофизика, 2000. — 414 с.
9. Скважинная ядерная геофизика. Справочник геофизика / под ред. В.М. Запорожца. — М. : Недра, 1978. — 247 с.