

УДК 552.08.53(550.834)

ГЛУБИННАЯ СТРУКТУРА ЮГО-ВОСТОКА ЯНО-КОЛЫМСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ СИСТЕМЫ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАНЫМ И ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ЗОЛОТОРУДНЫХ УЗЛОВ

И.М. Хасанов, В.М. Шарафутдинов

Аннотация

В результате выполненных комплексных геолого-геофизических исследований изучено глубинное строение территории юго-востока Яно-Колымской складчатой системы. На базе большого объема фактического материала (6 профилей, 167 точек магнитотеллурического зондирования) построены геоэлектрические разрезы (до глубин 20–25 км) и выделены три основных элемента глубинной структуры региона; выявлены субвертикальные зоны повышенной проводимости, которые отождествляются с глубинными рудоконтролирующими разломами и проекции которых на дневную поверхность совпадают с размещением основных золоторудных узлов. По результатам комплексного анализа полученных геоэлектрических разрезов, гравитационного и магнитного полей установлено пять критериев глубинного строения золоторудных узлов. Предложена геологическая интерпретация выявленных локальных геоэлектрических неоднородностей, концентрирующихся в верхней части разреза исследуемой территории.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, субвертикальные зоны повышенной электропроводности.

Введение

Актуальность изучения глубинного строения рудных узлов и их периферии в пределах Яно-Колымской складчатой системы обусловлена выявлением роли эндогенных геологических факторов, формирующих рудолокализирующую структуру золоторудных месторождений, которые во многом определяют металлогенический потенциал территории. Эти исследования актуальны для Северо-Востока России в связи с истощением россыпных месторождений и, как следствие, необходимостью поиска новых рудных месторождений золота, преимущественно крупнообъемных морфогенетических типов.

Исследуемый район (рис. 1), юго-восточная часть Яно-Колымской складчатой системы (ЯКСС), охватывает Балыгычанское поднятие (БП), южную и центральную части Аян-Юряхского антиклинория (АЮА) и Иньяли-Дебинского синклинория (ИДС). Изучением строения региона занимались С.Г. Бялобжеский, А.С. Бяков, Ю.Я. Вашилов, С.Д. Вознесенский, М.Л. Гельман, Н.А. Горячев, В.И. Гончаров, И.Е. Драпкин, И.Л. Жуланова, Л.И. Измайлов, В.М. Кузнецов, Н.Г. Манафов, Б.Ф. Палымский, Г.М. Сосунов, И.С. Чанышев, И.В. Шпикерман и др.

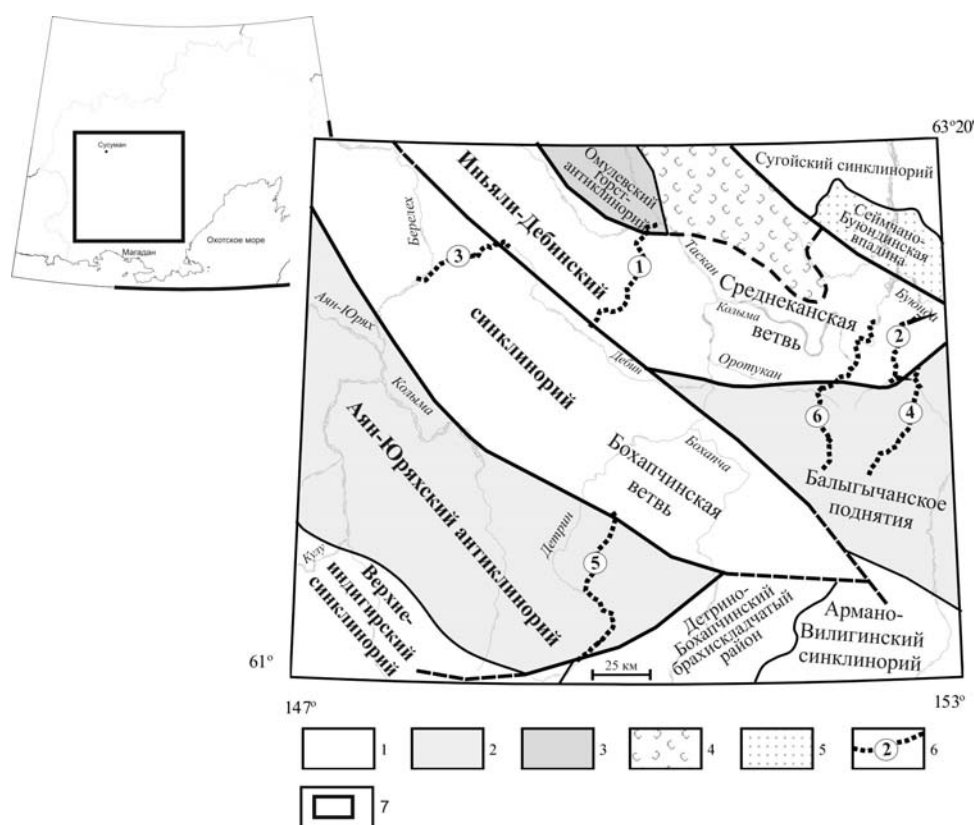


Рис. 1. Схема размещения крупнейших тектонических элементов (по В.М. Кузнецову [1]) с расположением профилей МТЗ: 1–2 – Яно-Колымская складчатая система: 1 – синклинории; 2 – антиклинории и внутренние поднятия; 3 – Приколомы-Черско-Полу-сененская складчатая система; 4 – орогенные впадины мезозой; 5 – неотектонические впадины; 6 – профили МТЗ и их номера: Ягодное – Таскан – 1, Сабарга – 2, Сусуман – Калинина – 3, Стрелка – Кузьмичан – 4, Усть-Омчуг – Обо – 5, Герба – Сеймчан – 6; 7 – контур исследуемой территории

Краткая геолого-геофизическая характеристика. Геологическая структура района исследований определяется [2, 3] последовательной сменой по вертикали пяти качественно различных и разновозрастных структурно-вещественных мегакомплексов регионального распространения, разделенных резкими угловыми и стратиграфическими несогласиями: рифейско-нижнепалеозойский, среднепалеозойский, верхнепалеозойско-мезозойский, верхнемезозойский, кайнозойский.

1. Рифейско-нижнепалеозойский структурный этаж. Породы этого структурного этажа составляют единый карбонатно-терригенный комплекс общей мощностью до 6000 м и метаморфизованы до зеленосланцевой, местами до амфиболитовой фации.

2. Среднепалеозойский структурный этаж. Образования этажа располагаются с несогласием, состоят из комплекса преимущественно терригенных формаций общей мощностью до 5000 м. В его составе обособляются известняково-глинистая, терригенно-карбонатная, доломитово-карбонатная и терригенно-вулканогенная формации.

3. Верхнепалеозойско-мезозойский структурный этаж составляют толщи верхоянского комплекса. В пределах ЯКСС породы верхоянского комплекса слагают основные структуры, представляют собой мощный (суммарно до 10 км) комплекс преимущественно терригенных пород. В пределах этого структурного этажа, часто в тесной пространственной (парагенетической) связи с малыми интрузиями, локализована большая часть известных (в границах исследуемой территории) золото-кварцевых месторождений и ассоциирующих с ними россыпей.

4. Верхнеюрский-меловой структурный этаж составляют большей частью существенно вулканогенные образования мощностью до 3–4 км, которые с угловым несогласием перекрывают подстилающие толщи. Предполагается парагенетическая связь оловянного, молибден-порфирового, редкометального и золото-серебряного оруденения с образованиями этого этажа.

5. Кайнозойский структурный этаж. Представлен локально распространенными палеоген-неогеновыми и плейстоценовыми рыхлыми отложениями. По составу представляют собой континентальные угленосные терригенные молассы мощностью до 1.5 км. В наиболее полном виде представлены в Сеймчано-Буюндинской впадине.

Значительная роль в геологической истории и тектоническом устройстве региона принадлежит разномасштабным разломам, среди которых различают сбросы, сдвиги, взбросы и надвиги. Их плоскости смещения вертикальны или круто падают на северо-восток. На некоторых участках разрывы выполаживаются, переходя в надвиги. Ширина зон разломов достигает 20 км, а ширина отдельных швов – 200–600 м. Амплитуда вертикального смещения достигает первых километров.

На карте гравитационного поля исследуемой территории выделяются региональные максимум (восток-северо-восток территории) и минимум (запад-северо-запад территории), отвечающие двум крупным геоблокам, очевидно, с различным по составу кристаллическим фундаментом. Линейные аномалии повышенных (до 20 мГл) значений гравитационного поля в основном северо-западного простирания обусловлены структурно-вещественными неоднородностями кристаллического фундамента. Зоны повышенных градиентов поля силы тяжести (40 мГл на 10 км) соответствуют межблоковым, а иногда и магмоконтролирующим разломам. Локальные аномалии пониженных (менее 24 мГл) значений гравитационного поля различной формы интенсивности и размеров фиксируют гранитоидные интрузии. Величины плотности у различных групп интрузивных пород изменяются в диапазоне 2.48–2.65 г/см³. Очаговые структуры и зоны глубинных разломов, выделенные по гравиметрическим данным, чаще всего являются региональными критериями локализации рудных месторождений полезных ископаемых.

Анализ геомагнитного поля юго-востока ЯКСС позволил разделить [3] всю исследуемую территорию на три, отличных друг от друга, крупные области, отвечающие структурам Аян-Юряхского антиклинория, Иньяли-Дебинского синклинория, Балыгычанского поднятия с краевой частью Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. По данным специализированных работ [4] повышенными магнитными свойствами (магнитная восприимчивость $(16 \div 1670) \cdot 10^{-6}$ ед. СИ) обладают измененные осадочные породы, в значительно меньшей степени – дайковые

(магнитная восприимчивость $(0.72 \div 8.0) \cdot 10^{-6}$ ед. СИ), практически немагнитными являются гранитоиды. Повышенные магнитные параметры свойственны, как правило, породам, содержащим пирротин и создающим наблюдаемое аномальное магнитное поле интенсивностью до 200–500 нТл.

По данным сейсмических исследований структура верхней части земной коры юго-восточной части ЯКСС характеризуется наличием трех уровней сравнительно резкого снижения степени неоднородности, повышения сейсмической прозрачности и скорости упругих волн, обычно интерпретируемых как контакты осадочного чехла, кристаллической коры слоев коры и собственно коры и мантии – границы Мохо [5, 6].

Распределение параметра сопротивления свидетельствует о наличии в верхней части геоэлектрического разреза неоднородного, относительно высокоомного слоя общей мощностью до 20 км, состоящего, вероятно, из верхоянского терригенного, рифейско-нижнепалеозойского терригенно-карбонатного комплексов и, возможно, кристаллических образований архея. На глубинах 16–26 км отмечается залегание проводящего горизонта, который может интерпретироваться как коровый проводящий слой [7].

Несмотря на проводимые ранее исследования, достаточно проблемными в плане изученности глубинного строения остаются территории рудных узлов, в силу отсутствия необходимого объема геологической информации (глубоких скважин) и поставленных специализированных геофизических методов, в том числе магнитотеллурического зондирования (МТЗ).

Целью исследований, результаты которых изложены в настоящей статье, является выявление геоэлектрических особенностей глубинного строения территории и расположенных в ее пределах рудных узлов.

Фактический материал, методика исследований

Электроразведочные работы проводились по системе профилей северо-восточного простирания, пересекающих ряд крупных рудных узлов (зон), входящих в Яно-Колымский металлогенический пояс (см. рис. 1).

Исследования методом МТЗ проводились станцией СГС-Е (производства ФГУП «Иркутскгеофизика») под руководством одного из авторов. Шаг съемки определялся исходя из линейных размеров складок, интрузий и прочих геологических неоднородностей (10–15 км) и составил 3–5 км. Всего выполнено 6 профилей МТЗ (167 ф.т.) общей протяженностью 710 км. Установка для регистрации магнитотеллурического (МТ) поля представляет собой два взаимно перпендикулярных заземленных диполя (M_1N_1 и M_2N_2) для измерения электрических составляющих поля (E_x и E_y). Магнитные составляющие (H_x и H_y) регистрировались индуктивными датчиками. Все точки МТ-зондирования отработаны в интервале времен 0.1–500 с. Азимут линии MN при регистрации электрической составляющей МТ-поля выбирался в соответствии с направлением осей неоднородности и определялся «вращением» вектора поляризации. В среднем на каждой точке азимут определялся после 2–3-кратного перемещения линии MN . Длина MN составила 100 м. Средние расхождения основных компонент тензора импеданса по результатам контрольных измерений (объем 5%) не превышают 3%.

Табл. 1

Комбинации магнитотеллурических параметров

Магнитотеллурические параметры	Мерность разреза			
	1D	2D	2D + 3D	3D
N	0	$\gg 0$	$\gg 0$	$\gg 0$
$Skew$	0	0	$\gg 0$	$\gg 0$
η	0	0	0	$\gg 0$

При интерпретации данных МТЗ была применена многоэтапная схема обработки.

На первом этапе для всех профилей и на всех периодах были рассчитаны следующие магнитотеллурические параметры: N – параметр неоднородности, $Skew$ – параметр, характеризующий степень асимметрии среды и η – фазочувствительный параметр асимметрии [8].

Анализ комбинаций указанных параметров (табл. 1) позволял отнести разрез к одному из следующих типов: горизонтально-слоистый (1D), двумерный (2D), двумерный с локальными приповерхностными неоднородностями (2D + 3D), трехмерный (3D). Важной особенностью частотных разрезов модуля параметра N является низкий уровень значений в области коротких периодов, достигающих 1 с и более. Для восстановления некоторых фрагментов верхней части разреза проводилась интерпретация в рамках одномерной модели. Аномальные зоны повышенных значений, проявляющиеся в основном на низких частотах, объясняются существенной горизонтальной неоднородностью разреза в целом по региону. Частотные разрезы параметров $Skew$ и η характеризуются преобладанием малых значений, что говорит о незначительном вкладе трехмерных искажений в образование низкочастотных аномалий и свидетельствует о преимущественно двумерном строении среды. Повышенные значения параметра $Skew$ (более 1) связаны с локальными трехмерными неоднородностями. Те участки разреза, где параметр η не превышает 0.2, характеризуются преимущественно двумерной структурой поля, которая осложнена влиянием приповерхностных неоднородностей.

Анализ частотных разрезов параметров неоднородности и асимметрии среды указывает на то, что геоэлектрический разрез неоднороден и изменяется от преимущественно двумерного к двумерному с трехмерными приповерхностными искажениями от приповерхностных неоднородностей.

На втором этапе производилась нормализация кривых МТЗ. Задачей нормализации прежде всего является исключение влияния локальных приповерхностных неоднородностей. Нормализация проведена для всех кривых одновременно. При интерпретации использовался период нормализации: $\sqrt{T} = 10 \text{ с}^{1/2}$, радиус сглаживания $R = 5$ км. Нормализованные компоненты тензора импеданса использованы для построения разрезов кажущегося сопротивления.

Третий этап заключался в качественной интерпретации разреза по наблюдаемым кривым МТЗ, при этом использовались все имеющиеся априорные геологические и геофизические данные. К одномерной модели с двумерными неоднородностями отнесены территории с относительно простым строением. Это небольшие участки с выдержанным почти горизонтально-слоистым разрезом, расположенные в центральной части ИДС (рис. 2, а, б). Продольная и попереч-

ная кривые параметра сопротивления очень близки. К двумерной с приповерхностными трехмерными неоднородностями (рис. 2, в, г) модели относятся значительные, преимущественно центрально-осевые части Берелехской и Среднеканской синклиналей, Тенькинской антиклинали, Сеймчано-Буюндинской впадины. Близкими к трехмерным моделям (рис. 2, д, е) являются районы, приуроченные к гранитоидным интрузиям – локальным непроводящим неоднородностям. Наиболее яркими примерами служат район Балыгычанского поднятия и юг Аян-Юряхского антиклинория. Таким образом, в результате анализа геофизических и геологических данных интерпретационная модель представляется нам квазидвумерной, осложненной различными трехмерными неоднородностями. Простираение основных геологических структур центральной части Инь-Яли-Дебинского синклинория и Аян-Юряхского антиклинория – северо-западное, а в пределах Среднеканской ветви ИДС – субширотное. Поэтому для центральной части ИДС и АЮА продольными кривыми являются кривые XU (X – на юго-восток, U – на юг-запад), тогда как для Среднеканской ветви ИДС продольными кривыми являются кривые XU (X – на восток, U – на юг).

На последнем этапе проводилась двумерная инверсия МТ данных по программе Р. Мэки [9], при этом на основе геологических, гравиметрических, сейсмических источников информации задавалось положение некоторых возможных геоэлектрических границ. Инверсия проводилась совместно по продольным и по поперечным кривым – бимодальная инверсия с одновременным подбором амплитудных и фазовых кривых.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований изложены в следующей иерархической последовательности: глубинное строение Яно-Колымской складчатой системы, субвертикальные зоны проводимости как рудоконтролирующие факторы, глубинное строение золоторудных узлов.

Глубинное строение Яно-Колымской складчатой системы по геофизическим данным. Результаты работ, выполненных с использованием метода МТЗ, позволяют построить разрезы параметра сопротивления до глубин 20–25 км.

Обобщенная модель геоэлектрического разреза южной части Яно-Колымской складчатой системы на изученную глубину и площадь (рис. 3) имеет двух- и (или) трехслойный характер (сверху – вниз):

1) сложно построенный (горизонтально-неоднородный) слабо проводящий метаморфизованный осадочный чехол, имеющий двух-, трехчленное (пакетное) геоэлектрическое строение общей мощностью от 6 до 13 км (5–125 Ом·м);

2) высокоомное основание – предполагаемый комплекс метаосадочных пород и кристаллический фундамент (125–2300 Ом·м);

3) на части территории на глубинах 15–20 км и более установлен коровый проводящий слой (менее 5 Ом·м).

Первый слой (0–13 км) преимущественно высоко электропроводный (5–15 Ом·м) сопоставляется с областью развития пород осадочного чехла, частично высокоуглеродистых, подвергнутых умеренным метасоматическим преобразованиям. Он осложнен элементами более высокого порядка. В качестве этих элементов выступают:

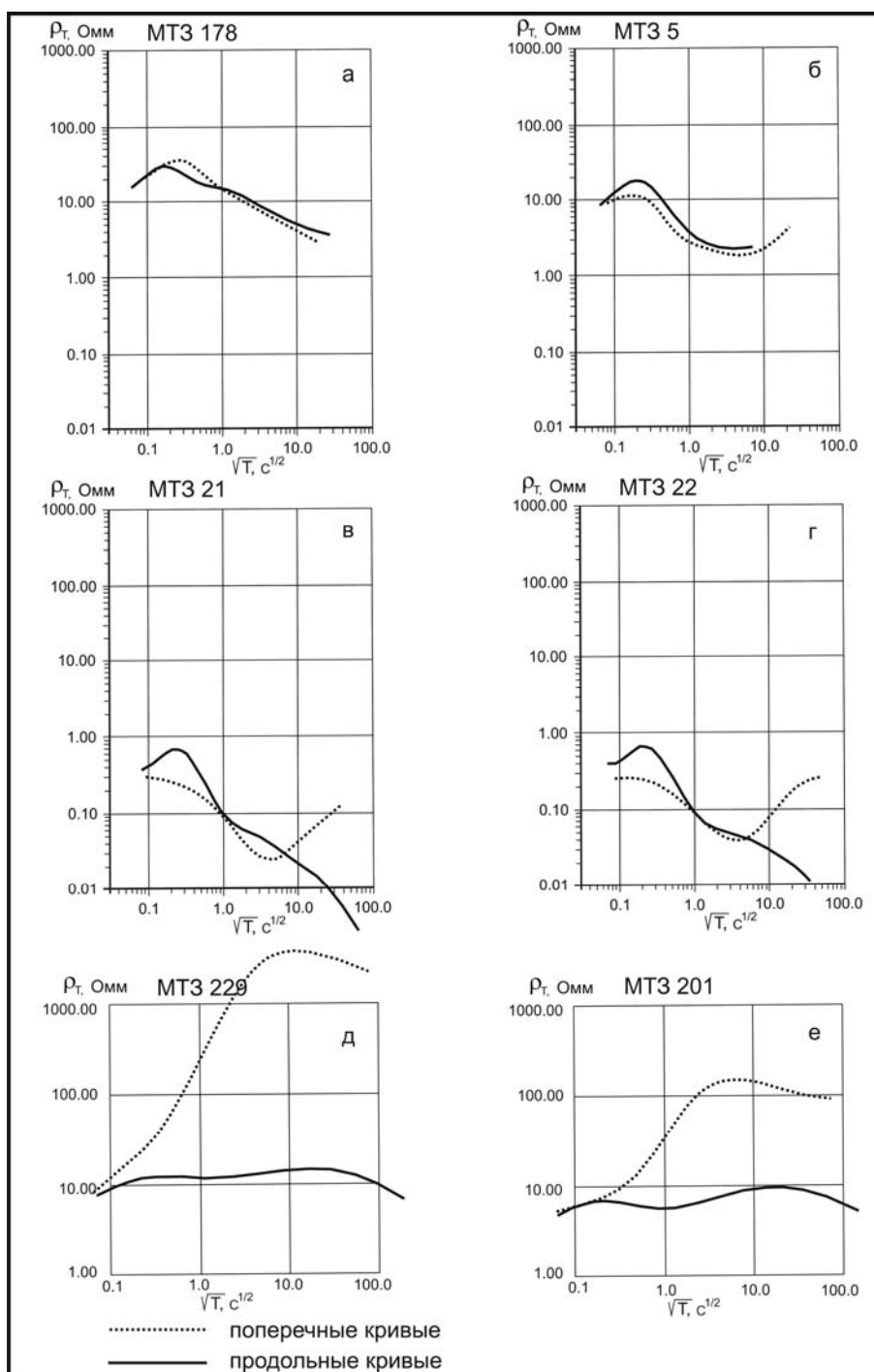


Рис. 2. Кривые кажущегося сопротивления: а, б – наблюдаемые над одномерной средой; в, г – наблюдаемые над двумерной средой с приповерхностными трехмерными неоднородностями; д, е – наблюдаемые над двумерной средой с трехмерными неоднородностями

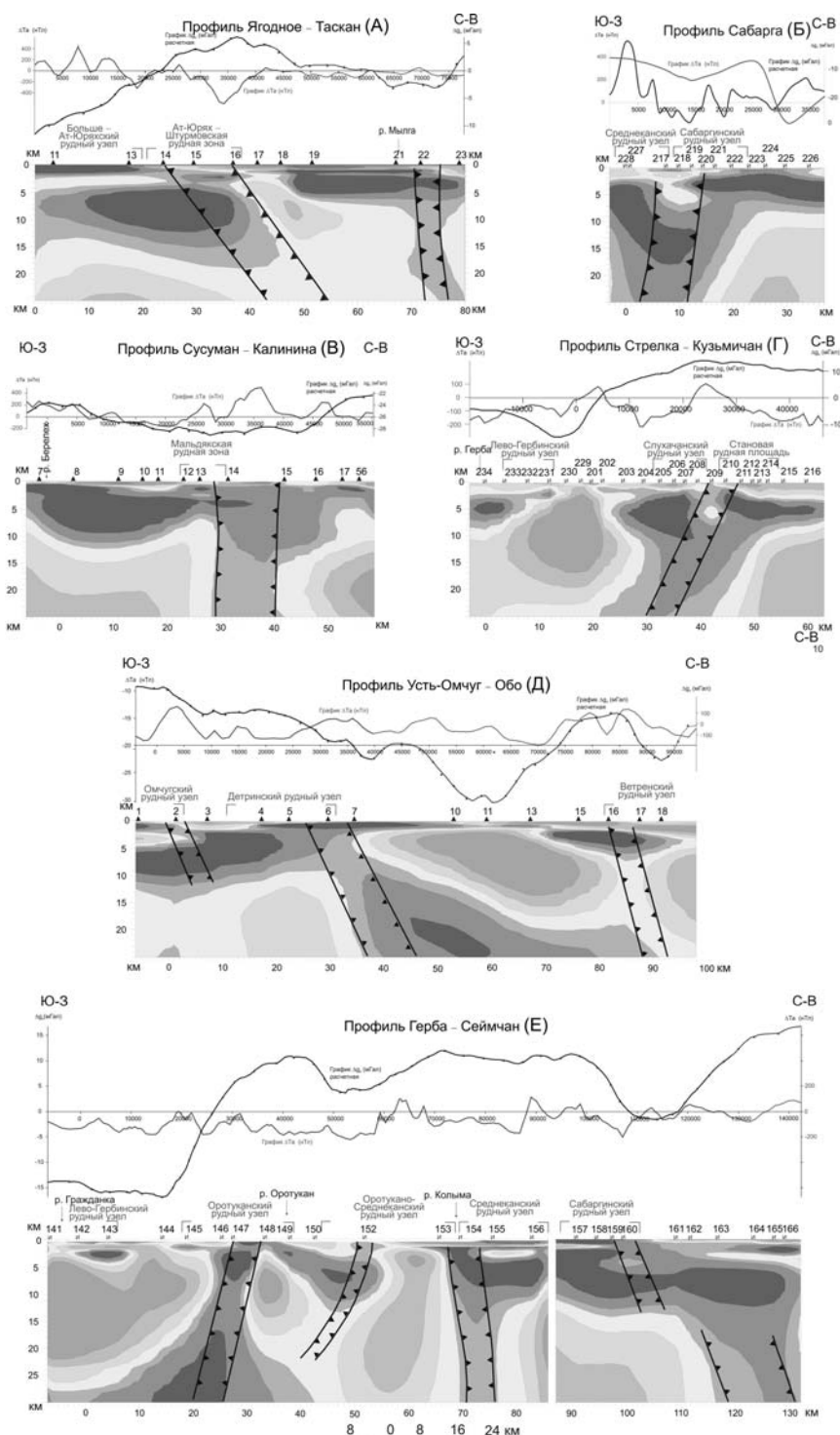


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы по данным МТЗ: градация значений сопротивления в Ом·м: 1 – менее 5, 2 – 5–15, 3 – 15–45, 4 – 45–125, 5 – 125–350, 6 – 350–1000, 7 – 1000–23000, 8 – более 23000; 9 – точки зондирования и их номера; 10 – субвертикальные зоны проводимости

– овалы вертикальные или наклонные относительно высокоомные (до 200 Ом·м) участки, как правило, имеющие резкоградиентные границы, размер первые десятки километров. Там, где эти объекты оказываются у поверхности и над ними наблюдаются локальные отрицательные гравиметрические аномалии, они трактуются как нескрытые гранитоидные массивы;

– поверхностные и близповерхностные относительно высокоомные (в среднем до 300–500 Ом·м) тела линзовидной или пластообразной формы мощностью первые сотни метров – первые километры и протяженностью несколько десятков километров. Те из них, которые совпадают с контурами отрицательных аномалий силы тяжести, интерпретируются как диапиры гранитных тел (см. рис. 3, б, ПК 217–219). Прочие пластообразные аномалии повышенных сопротивлений (не сопровождаемые отрицательными локальными гравитационными аномалиями) связываются с толщами песчаников и туфопесчаников (см. рис. 3, а, ПК 11–14, Г ПК 211–216).

Со вторым слоем сопоставляются погруженные на глубину более 10 км обширные (десятки километров в поперечнике) аномалии повышенных (до тысяч Ом·м) сопротивлений, трактуемые как комплекс метаосадочных пород или кристаллический фундамент (см. рис. 3, в, ПК 7–13, Д 1–7).

Третий слой определяет положение в разрезе наиболее глубоко (более 20–25 км) залегающего, фрагментарно развитого корового проводящего слоя (см. рис. 3, д, ПК 7–17). Сопротивление пород в его пределах (менее 5 Ом·м) в несколько раз меньше, чем в вышележащих породах. Положение корового проводящего слоя в пределах юго-востока Яно-Колымской складчатой системы совпадает с коровым сейсмическим волноводом, выделенным по данным интерпретации отраженных волн [10]. Авторы считают, что основной причиной подобной физико-геологической характеристики в отмеченном диапазоне глубин является ее флюидонасыщение. Наличие флюидонасыщенного слоя в средней и нижней коре приводит к закономерному изменению реологических свойств и, вероятнее всего, имеет тектонические последствия.

Субвертикальные электропроводящие зоны. Первый и второй слои расчленены субвертикальными электропроводящими зонами мощностью 4–10 км (см. рис. 3). Субвертикальные проводящие зоны отождествляются с глубинными рудоконтролирующими разломами, которые сопровождаются интенсивным смятием, расщеплением, кварц-углеродистым метасоматозом пород и разгрузкой рудоносных растворов, образовавших золото-кварцевые месторождения и рудопроявления. Субвертикальные проводящие зоны (см. рис. 3: а – ПК 14–16, б – ПК 220–227, в – ПК 145–148, ПК 153–156 и т. д.) генетически, наиболее вероятно, связаны с третьим – коровым проводящим слоем (КПС). Выходы проводящих зон на дневную поверхность в большинстве случаев коррелируются с положением известных глубинных рудоконтролирующих разломов, которые часто дополнительно фиксируются локальными аномалиями магнитного и гравитационного полей (например, рис. 3, д, ПК 2–3; рис. 3, в, ПК 14–15).

Совместный анализ электропроводности верхней части земной коры, геологического строения и данных металлогении юга Яно-Колымской складчатой системы позволяет выявить закономерности в строении геоэлектрических разрезов и размещении полезных ископаемых. В процессе изучения выяснилось,

что большинство рудных полей, месторождений и рудопроявлений явно тяготеют к локальным субвертикальным линейным зонам с характерной повышенной проводимостью (см. рис. 3). Омчугский рудный узел в разрезе приурочен к неявно (слабо) выраженной вертикальной зоне проводимости – фрагменту Тенькинской зоны разломов (см. рис. 3, д). Детринский и Ветренский рудные узлы в разрезе на глубинах 3–5 км сопровождаются вертикальными зонами проводимости (см. рис. 3, д), предположительно зонами Тенькинского (?) и Чай-Юрьинского глубинных разломов. В геоэлектрическом разрезе Ат-Юрях-Штурмовского рудного узла установлена субвертикальная зона проводимости (см. рис. 3, а) – глубинный разлом Дарпир. В глубинном строении Сабаргинского и Среднеканского рудных узлов принимает участие единая достаточно мощная вертикальная зона проводимости (см. рис. 3, е) – Правооротуканский глубинный разлом (см. рис. 3, б). Слухачанский рудный узел и Становая рудоносная площадь в глубинном сечении приурочены к одной и той же мощной вертикальной зоне проводимости – Паутовскому глубинному разлому (см. рис. 3, з).

Геоэлектрический разрез осадочного чехла исследуемых геоструктур (АЮА, ИДС, БП) имеет от двух до четырех геоэлектрических слоев. Отличительной особенностью строения разрезов является наличие опорного высокоомного горизонта (слоя), который отождествляется с комплексом горных пород существенно туфо-песчанистого состава (АЮА – верхнепермские, БП – триасовые и ИДС – средне-позднеюрские отложения).

Сравнение всех приведенных геоэлектрических разрезов с данными интерпретации гравиметрических наблюдений позволяет отметить, что глубины границ осадочного комплекса, верхней кромки высокоомного основания и интрузивных образований согласуются между собой [11].

Для изучения геологической природы выявленных субвертикальных проводящих зон, а также объяснения аномалий других геофизических полей было изучено распределение петрофизических параметров (ПФП) и исследован минералогический состав горных пород по латерали и вертикали в пределах одного из рудных полей, приуроченного к локальной субвертикальной зоне электропроводности. В качестве эталона было выбрано Наталкинское рудное поле. Здесь расположено достаточно детально изученное в геологическом и геофизическом аспекте крупнейшее одноименное месторождения золота России, которое является наиболее интересным и перспективным примером крупнообъемного месторождения золото кварцевой формации. Для Северо-Восточного региона России комплекс глубинных электроразведочных, петрофизических и геолого-минералогических исследований на крупнообъемном золоторудном месторождении проводится впервые.

Основной целью исследований было изучение и корреляция петрофизической зональности рудных полей с типами минерализации, а также попытка объяснения на этой основе природы глубинной части субвертикальной зоны высокой электрической проводимости, охватывающей весь рудный узел. Для этого были отобраны образцы как по площади (в том числе и за пределами рудного узла), так и в разрезе до 800 м.

В пределах рудного поля наблюдается возрастание плотности горных пород (σ) с запада на восток от $2.48 \cdot 10^3$ до $2.76 \cdot 10^3$ кг/м³, при этом рудная залежь

месторождения характеризуется дифференцированно повышенными значениями σ ($(2.60 \div 2.76) \cdot 10^3$ кг/м³) и ограничивается с востока зоной высоких градиентов. Магнитная восприимчивость (χ) пород в пределах рудного поля возрастает с юго-запада на северо-восток от 0.7 до $60.8 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, характеризуясь в контуре рудной залежи сложным дифференцированным распределением. В северной и центральной частях рудного поля отслеживается ряд локальных аномалий пониженных и повышенных значений χ (при преобладании последних), в юго-восточной части – монотонное петромагнитное поле. В обобщенном виде график распределения ПФП с минимумами в центральных частях и максимумами на флангах имеет рисунок, близкий к «М-образному» как в границах рудной залежи, так и в пределах всего рудного поля в целом. Такой характер распределения ПФП подтверждается и лабораторными экспериментами [12].

В процессе изучения распределения петрофизических параметров и золотого оруденения, на глубоких горизонтах месторождения установлено, что рудная залежь и ее зальбанды обладают повышенной плотностью (от $2.7 \cdot 10^3$ до $2.87 \cdot 10^3$ кг/м³) и магнитной восприимчивостью ($(17.5 \div 65.3) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) [13]. При этом обогащенные участки рудной залежи (рудные зоны) фиксируются локальными аномалиями пониженных значений этих параметров и зонами их градиентов.

Анализ изменения ПФП в пределах рудного поля позволяет сделать вывод о двухэтапной (или двухуровневой) петрофизической зональности [13].

Первым уровнем является повышение значений ПФП и постепенное площадное изменение физических свойств горных пород в определенном направлении. Это связано с насыщением халькофильными и сидерофильными группами металлов больших по объему масс горных пород и может быть обусловлено влиянием глубинного разлома, который фиксируется выявленной нами субвертикальной зоной проводимости.

Второй уровень находит отражение в локальных аномалиях и градиентных изменениях ПФП в экзоконтактах рудной залежи и рудных зон, что, вероятно, связано пространственно (генетически?) с физико-химическими процессами их формирования. Оба уровня выявленной петрофизической зональности прослежены в пределах рудного поля по простиранию на 4 км и по падению на 1000 м.

Исследования параметров удельного электрического сопротивления (УЭС) и коэффициента анизотропии ($K_{ан}$) показали, что образцы, отобранные за пределами выхода на поверхность субвертикальной зоны проводимости обладают повышенным (1200–3000 Ом·м) сопротивлением и низким $K_{ан}$ (1.1–1.35). Образцы, отобранные в ее пределах, характеризуются дифференцированными, но в целом пониженными значениями удельного сопротивления (20–1000 Ом·м) и повышенными значениями $K_{ан}$ (1.4–2.6).

Обобщенные параметры УЭС и $K_{ан}$ всех исследованных образцов, систематизированных в последовательности: «вмещающие» – «рудный узел» – «рудное поле» – «месторождение», фиксируют зональное распределение электрических параметров.

Первую группу – «вмещающие» – составляют неизменные и слабоизмененные горные породы, развитые за пределами рудного узла (и, соответственно, за пределами субвертикальной проводящей зоны). Им свойственно высокое

сопротивление (свыше 1500 Ом·м) и относительно пониженное значение $K_{ан}$ (1.2). Образцы этой группы (в количестве 25 шт.) представлены преимущественно грубозернистыми породами атканской свиты – песчаниками с туфогенной примесью, песчанистыми алевролитами с гравийной примесью и алевролитистыми глинистыми сланцами с редкой песчанистой и туфогенной примесью.

Вторая группа – «рудный узел» – включает в себя измененные в разной степени горные породы рудного узла в целом с низким УЭС (70 Ом·м) и повышенным $K_{ан}$ (1.4). Образцы (в количестве 18 шт.) главным образом представлены тонкозернистыми разностями горных пород: углисто-глинистыми сланцами и аргиллитами с редкой алевролитистой примесью, алевролитистыми аргиллитами, иногда с тонкой вкрапленностью сульфидов, реже алевролитами с редкой вкрапленностью сульфидов. Углеродистое вещество (УВ) распределено неравномерно, образует линзовидные скопления. Образцы этой группы, отобранные с периферийных частей выхода на поверхность субвертикальной зоны проводимости, очевидно, отображают области распространения углеродистого метасоматоза, характерного для рудного узла в целом.

Третья группа – «рудное поле» – охватывает измененные породы рудного поля с повышенным сопротивлением (1300 Ом·м) и $K_{ан}$ (более 1.4). Образцы этой группы состоят из измененных окварцованных диамиктитов, реже окварцованных песчаников, еще реже из диамиктитов и алевролитов с тонкой сульфидной вкрапленностью. Образцы этой группы, отобранные из центральной части проводящей зоны, характеризуют участки гидротермально-метасоматически измененных пород с повышенной концентрацией кварца и кварц-карбонатного прожилково-жильного материала, типичных для площади рудного поля.

Четвертая группа («месторождение») – это интенсивно измененные породы самого месторождения, которым присуще низкое сопротивление (не более 650 Ом·м) и самые высокие значения $K_{ан}$ (около 1.6). Образцы представлены в основном сульфидизированными и окварцованными диамиктитами, измененными песчанистыми алевролитами с тонкой вкрапленностью сульфидов (иногда с линзочками пирита). УВ распределено крайне неравномерно, заполняет кливажные трещины различной направленности; в процессе смятия, перетирания, катаклаза пород обособляется в разнонаправленные жилки. В среднем количество УВ составляет 5–10% [13]. Образцы данной группы, по-видимому, характеризуют наиболее измененные породы, приуроченные к линейным минерализованным, (сульфидизированным, графитизированным, окварцованным) зонам дробления.

Магнитные параметры (остаточная намагниченность, магнитная восприимчивость) и плотность хорошо коррелируются с выделенной зональностью электрических свойств [14]. Установлено наличие взаимосвязи петрофизических характеристик между собой и их зональное соответствие (генетическая связь) с площадями развития в различной степени измененных пород в пределах Омчакского рудного узла. Так, углефицированные толщи Омчакского рудного узла характеризуются уменьшением магнитных, плотностных и электрических (низкое УЭС и высокий $K_{ан}$) параметров (образцы второй группы). В то время как участки гидротермально-метасоматически измененных пород, несущих преимущественно кварц-сульфидную минерализацию, в пределах «рудного поля» –

«месторождения» идентифицируются в целом повышенными петрофизическими параметрами (образцы третьей и четвертой групп горных пород). При этом повышенное удельное сопротивление и относительно пониженная плотность характеризуют третью группу пород, образцы которой преимущественно окварцованны, а относительно пониженное сопротивление и высокая плотность четвертой группы обеспечиваются относительно повышенной концентрацией сульфидов в образцах этой группы. Таким образом, можно утверждать, что понижение сопротивления среды, совпадающее с понижением магнитных и плотностных параметров, в основном обеспечивается увеличением УВ, являющегося производным от процессов углеродистого метасоматоза, приуроченного к глубинному разлому. А повышение всех трех ПФП: сопротивления, магнитных и плотностных параметров – связано с процессами кварц-сульфидной минерализации. Данные процессы в плане корреляции ПФП между собой являются разнонаправленными.

По результатам приведенных петрофизических и геолого-минералогических исследований можно сделать вывод о том, что высокая проводимость измененных горных пород, расположенных в зоне влияния глубинного разлома (фиксирующегося субвертикальной зоной проводимости), обуславливается наличием (и распределением в электрически связанные полосы или цепочки) УВ и сульфидов. По отношению к природе более глубинной части субвертикальной зоны проводимости известны многочисленные исследования [15–19] с выяснением генезиса проводников. Так, одной из очевидных причин возникновения данного феномена является глубинный температурный фактор. Тектоническая активизация сопровождается повышением температуры на несколько сот градусов (до 600–800 °С). Неизбежным следствием этого является высвобождение (дегидратация) части связанной воды. Растворяя хлориды, вода становится хорошо проводящим электролитом, которого достаточно, чтобы обеспечить наблюдаемую электропроводность. Природа возникновения проводящего слоя объясняется некоторыми исследователями [20] наличием рассолоподобных флюидов, заполняющих поры горных пород, или присутствием высокопроводящих минералов (графит, оксиды Fe/Ni и сульфиды). Вероятнее всего, что отмеченные разнообразные процессы, обуславливающие высокую проводимость, протекают параллельно. Таким образом, сульфидизация и графитизация безусловно объясняют, пониженное сопротивление верхней части субвертикальной проводящей зоны. Нижняя часть субвертикальной проводящей зоны, расположенная ниже 5–10 км, по-видимому, связана с совокупным эффектом наличия электронных (сульфидов и оксидов металлов, графита) и ионных (циркуляцией минерализованных флюидов в субвертикальных трещинах) типов проводников.

Особенности глубинного строения рудных узлов. Совместный анализ геоэлектрических разрезов верхней части земной коры, геологического строения и данных металлогении юго-востока Яно-Колымской складчатой системы позволяет выявить определенные закономерности. В процессе изучения выяснилось, что большинство золоторудных полей, месторождений и рудопроявлений явно тяготеет к субвертикальным линейным зонам с характерной повышенной проводимостью (см. рис. 3). Наряду с этим установлено, что размещение месторождений и рудопроявлений золота в значительной мере контролируется структурами осадочного чехла.

Из представленных результатов глубинных исследований рудных узлов следует вывод, согласно которому рудные узлы, имея различную рудную минерализацию и располагаясь в различных геолого-металлогенических зонах, геолого-структурных позициях и литологических разностях пород, характеризуются несколькими основными общими чертами глубинного строения. По результатам комплексного анализа полученных геоэлектрических разрезов, гравитационного и магнитного полей нами выделены следующие характерные особенности глубинного строения рудных узлов:

- наличие глубинных разломов, фиксирующихся субвертикальной зоной проводимости (с мощностью 5–10 км и сопротивлением до 2 Ом·м);
- существование развитой по латерали туфо-песчанистой толщи, которая характеризуется повышенным удельным сопротивлением (от 5 до 300 Ом·м), является опорным геоэлектрическим горизонтом и рассматривается, как металлотект;
- близость (первые километры) магматического очага – локальные аномалии сопротивления (с площадными параметрами 5×15 км, сопротивлением до 2000 Ом·м);
- приуроченность (в пределах АЮА и БП): выступа кристаллического фундамента – высокоомного (до 3000 Ом·м) основания (до глубины 5 км);
- наличие локальных положительных аномалий гравитационного поля и линейных положительных локальных аномалий магнитного поля.

Заключение

Основные выводы настоящей работы сводятся к следующему. По нашему мнению, в региональном плане выделяются три основных элемента (слоя) глубинной структуры юго-востока Яно-Колымской складчатой системы.

Первым элементом является сложно построенный (горизонтально-неоднородный) преимущественно высоко электропроводный (5–125 Ом·м) слой, который отождествляется с областью развития пород осадочного чехла, частично высокоуглеродистых, подвергнутых умеренным метасоматическим преобразованиям. Он осложнен локализованными проводящими и непроводящими геоэлектрическими неоднородностями – компонентами более высокого порядка.

Со вторым элементом (высокоомным основанием – диапазон глубин в среднем 8–20 км) сопоставляются погруженные на глубину обширные (десятки километров в поперечнике) аномалии повышенных (до тысяч Ом·м) сопротивлений, трактуемые как комплекс метаосадочных пород или кристаллический фундамент (125–2300 Ом·м).

Третьим элементом структуры является наиболее глубоко (более 20–25 км) залегающий, фрагментарно развитый коровый проводящий слой, который характеризуется пониженным сопротивлением (5–15 Ом·м) и совпадает в пределах исследуемой территории с сейсмическим волноводом.

Выявленные субвертикальные проводящие зоны отождествляются с глубинными разломами, которые выступают в качестве флюидоподводящих каналов и инициируют объемные физико-химические процессы, приводящие к резкому изменению физических свойств горных пород, находящихся в зоне их влияния и сопровождающиеся интенсивным смятием, рассланцеванием, кварц-углеродистым метасоматозом. В этих разломах происходит разгрузка рудоносных

растворов. Выход субвертикальных проводящих зон на дневную поверхность в большинстве случаев пространственно совпадают с распределением известных глубинных рудоконтролирующих разломов, к которым приурочена значительная часть золоторудных узлов юго-востока Яно-Колымской складчатой системы. На основе изложенного можно предположить, что существует некая единая система тепломассопереноса, которая представляется в геоэлектрическом разрезе в виде взаимосвязанной структуры: верхнемантийный проводящий слой – коровый проводящий слой – субвертикальные проводящие зоны.

Петрофизический и геолого-минералогический анализ образцов горных пород верхней части (до 1 км) одной из субвертикальных зон электропроводности, к которой приурочен Омчакский рудный узел показал следующее.

1. Существует двухуровневая петрофизическая зональность. Первым уровнем является монотонное площадное изменение физических свойств горных пород в определенном направлении, связанное с насыщением пород углеродистым веществом халькофильными и сидерофильными группами металлов и формированием рудных полей и узлов, и может быть обусловлено влиянием глубинного разлома. Второй уровень находит отражение в локальных аномалиях и градиентных изменениях ПФП в экзоконтактах рудной залежи и рудных зон, что, вероятно, связано пространственно (генетически?) с физико-химическими процессами их формирования.

2. Проводимость субвертикальной зоны обуславливается наличием углеродистого вещества и сульфидов (часто образующих тонкие прожилки и связанные цепочки), сформировавшихся в процессе кварц-сульфидного (гидротермального) и углеродистого метасоматоза.

В результате исследований установлено, что в границах юго-востока Яно-Колымской складчатой системы существуют общие закономерности глубинного строения рудных узлов. Возможно, выявленные пять критериев этого строения могут использоваться в практической деятельности с целью прогноза потенциально рудолокализирующих структур на уровне рудных узлов и для других территорий.

Summary

I.M. Khasanov, V.M. Sharafutdinov. Subsurface Structure of the Southeast Yano-Kolyma Folded System According to Geophysical Data and the Structural Features of the Gold Ore Nodes.

Complex geological and geophysical research was conducted to study subsurface structure of the southeast Yano-Kolyma folded system area. Based on a large amount of factual material (6 profiles and 167 magnetotelluric sounding sites), resistivity sections were obtained for depths up to 20–25 km; three basic elements of the region's subsurface structure were allocated; subvertical zones of high electrical conductivity which are identified with the subsurface ore-controlling faults and whose projections onto a daylight surface coincide with the locations of the main gold ore nodes were revealed. According to the results of the complex analysis of the resistivity sections, gravitational and magnetic fields, five criteria of the subsurface structure of the gold ore nodes were established. A geological interpretation of the revealed local geoelectric heterogeneities concentrated in the upper part of the section of the area under investigation was proposed.

Key words: magnetotelluric sounding, subvertical zones of high electrical conductivity.

Литература

1. Кузнецов В.М. Тектоническое районирование, основные структуры территории Охотско-Колымского водораздела // Наука Северо-Востока – начало века: Материалы Всерос. конф. – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2005. – С. 100–105.
2. Абрамович И.И., Вознесенский С.Д., Маннафов Н.Г. Геодинамическая история Охотско-Колымского региона // Геотектоника. – 1999. – № 5. – С. 67–76.
3. Кузнецов В.М. Создание комплекта государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000 листа Р-56 (Сеймчан). – Магадан, 2007. – 98 с.
4. Измайлов Л.И. Пирротиновая минерализация металлоносных зон бассейна р. Колымы. – Новосибирск: Наука, 1976. – 118 с.
5. Горячев Н.А., Бялобжеский С.Г., Кузнецов В.М., Палымский Б.Ф., Фельдман Л.Л. Особенности глубинного строения окраинно-континентальных магматических дуг на примере северного Приохотья // Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным. – Новосибирск: Наука, 2007. – С. 118–133.
6. Фельдман И.С., Сальников А.С., Кузнецов В.Л., Чернов А.А. Комплексная сейсмо-геоэлектрическая и плотностная модель земной коры по геотраверсу 2-ДВ // Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным. – Новосибирск: Наука, 2007. – С. 105–111.
7. Максимов А.Е., Нагаев А.П. Результаты МТЗ в зоне затопления Колымской ГЭС // Объемные модели структуры земной коры и верхней мантии. – Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1988. – С. 149–163.
8. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. – М.: Науч. мир, 2009. – 679 с.
9. Rodi W., Mackie R.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // Geophysics. – 2001. – No 66. – P. 174–187.
10. Хасанов И.М., Седов Б.М., Касьянова В.Н. Литосферный слой высокой электропроводности, его природа и распространение в Центрально-Колымском районе // Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий. – Магадан, 2001. – С. 290–293.
11. Ваццлов Ю.Я. Глубинная структура, геодинамика и геокинематика Северо-Востока России // Структура и геокинематика литосферы Востока России. – Магадан, 1993. – С. 19–43.
12. Шарафутдинов В.М. Отражение палеотемпературных полей интрузивного массива в петромагнитных параметрах экзоконтактовой зоны // Сейсмологические и петрофизические исследования на Северо-Востоке России. – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 1992. – С. 177–207.
13. Шарафутдинов В.М., Хасанов И.М., Михалицына Т.И. Петрофизическая зональность Наталкинского рудного поля // Тихоокеанская геология. – 2008. – Т. 27, № 5. – С. 89–103.
14. Шарафутдинов В.М., Хасанов И.М. Изучение электрических характеристик ряда золоторудных месторождений Северо-Востока России // Соврем. проблемы науки и образования. – 2010. – № 2. – С. 28–35.
15. Иванов С.Н. Роль флюидов в реологической стратификации земной коры с учетом данных сверхглубокого бурения. Кольская скважина СГ-3. – Екатеринбург, 2002. – 154 с.
16. Ковтун А.А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы по данным магнитотеллурических зондирований. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989. – 284 с.

17. *Летников Ф.А.* Флюидный режим формирования мантийных пород. – Новосибирск: Наука, 1980. – 193 с.
18. *Логачев Н.А., Хромовских В.С., Поспеев А.В.* Современная динамика литосферы континентов: методы изучения. – М.: Недра, 1989. – 278 с.
19. *Поспеев А.В., Мендельбаум М.М., Писменный Б.М., Алакиин А.М.* Строение литосферы южного горного обрамления Сибирской платформы // Внутриконтинентальные горные области: геологические и геофизические аспекты: Тез. докл. Междунар. симпозиума. – Иркутск, 1987. – С. 225–228.
20. *Шиловский А.П.* Глубинная электропроводность Сибирской платформы // Физика Земли. – 1994. – № 6. – С. 45–53.

Поступила в редакцию
22.04.10

Хасанов Ибрагим Мубаракovich – научный сотрудник лаборатории геофизики Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН.

E-mail: hasanov@neisri.ru, au@maglan.ru

Шарафутдинов Владимир Михайлович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геофизики Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН.

E-mail: seismolog@neisri.ru