GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS
Published by the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

SPECIAL ISSUE

2021 VOLUME 12 ISSUE 3s PAGES 731–747

ISSN 2078-502X

DOI: 10.5800/GT-2021-12-3s-0550

SOME PROBLEMS OF ELECTRICAL GEOPHYSICAL PROSPECTING METHODS USED FOR EXPLORATION OF ORE DEPOSITS

V.A. Kulikov ✉, A.G. Yakovlev, V.A. Polikarpova

Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

ABSTRACT. Electrical geophysical prospecting methods are widely used at different stages of geological exploration. In the last two decades, new computer technologies and satellite navigation systems were successfully introduced in the geophysical industry. As a result, exploration technologies have improved, and new geophysical methods have been developed, such as electrical resistivity tomography (ERT) and spectral induced polarization (SIP) methods. An important role in ore geophysics is played by magnetotelluric (MT) methods. In this article, we focus on the issues of methodology and interpretation of electrical prospecting data for solving ore exploration problems. Special attention is paid to the induced polarization (IP) method that is most widely used in mineral exploration and mining industry as one of the most important and most dynamically developing techniques of ore geophysics. In addition, the issues of correct choices of survey scales and the use of automatic 2D and 3D inversion programs are considered.

KEYWORDS: ore geophysical complex; geological exploration; electrical resistivity tomography (ERT, ET); spectral induced polarization method; magnetotelluric method; 2D and 3D inverse modeling

RESEARCH ARTICLE

Received: February 12, 2021
Revised: April 8, 2021
Accepted: April 12, 2021

Correspondence: Viktor A. Kulikov, vic@nw-geophysics.ru

FOR CITATION: Kulikov V.A., Yakovlev A.G., Polikarpova V.A., 2021. Some problems of electrical geophysical prospecting methods used for exploration of ore deposits. Geodynamics & Tectonophysics 12 (3s), 731–747. doi:10.5800/GT-2021-12-3s-0550

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ РУДНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

В.А. Куликов, А.Г. Яковлев, В.А. Поликарпова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

АННОТАЦИЯ. Электроразведочные методы являются важной составляющей рудного геофизического комплекса и широко применяются на разных этапах геологоразведочных работ. В последние два десятилетия, за счет внедрения в геофизическую отрасль новых компьютерных технологий и систем спутниковой навигации, произошло качественное усовершенствование имеющихся технологий и появились новые геофизические методы, такие как электротомография (ЭТ) или метод спектральной вызванной поляризации (СВП). Важное место в рудной геофизике заняли магнитотеллурические (МТ) методы. Мы сконцентрировали свое внимание на отдельных вопросах методики и интерпретации электроразведочных данных при решении рудных задач. Особое внимание уделено методу вызванной поляризации (ВП), так как он остается важнейшим и наиболее динамично развивающимся направлением рудной геофизики. Мы также коснулись вопросов правильного выбора масштаба съемки, использования программ автоматической 2D- и 3D-инверсии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рудный геофизический комплекс; геологоразведочные работы; электротомография; метод спектральной вызванной поляризации; магнитотеллурические методы; 2D- и 3D-инверсия

1. ВВЕДЕНИЕ

При поисках, разведке и эксплуатации рудных месторождений используется широкий набор электроразведочных технологий, которые имеют разную физическую основу, отличаются условиями проведения измерений (наземные, подземные, водные), глубинности исследований, разрешающей способности и т.д. Часть методов электроразведки за последние десятилетия удалось «поднять в воздух». Аэроэлектроразведка стала незаменимым инструментом при проведении средне- и крупномасштабных площадных съемок на первых этапах поиска новых месторождений. Основными методами воздушных электроразведочных съемок являются индукционные высокочастотные методы, не требующие гальванического контакта с землей. В их основе лежит в первую очередь изучение ранних стадий неустановившихся полей электромагнитной (ЭМ) природы. Появились первые варианты аэромагнитотеллурической съемки.

Однако основной объем геофизических измерений пока остается за наземными и скважинно-наземными технологиями, которые используются для разбраковки и заверки аномалий, выявляемых по итогам аэросъемки.

Все наземные электроразведочные технологии (не только рудные) в первом приближении можно разбить на несколько основных групп.

Традиционно наиболее часто применяются методы постоянного тока, основанные на геометрическом принципе увеличения глубинности. К этой группе относятся варианты электрических зондирований с использованием самых разнообразных типов установок – симметричных четырехэлектродных, трехэлектродных, дипольных и др. Геометрические зондирования с высокой плотностью наблюдений, арифметическим или кусочно-арифметическим шагом по разносу, многократным использованием заземлений то в качестве питающих, то в качестве приемных электродов называют электротомографией (ЭТ).

Жестких критериев, по которым можно отнести ту или иную технологию зондирований к электротомографии, нет. Мы считаем, что здесь надо исходить из возможностей предложенной методики измерений для решения задач в условиях существенно горизонтально-неоднородных сред. Моделирование и инверсия на синтетических данных в общих чертах могут легко показать, решается такая задача с применением предложенной установки или нет, что и должно служить качественным критерием для отнесения ее к электротомографии.

Различные способы профилирования на одном разносе значительно дешевле, чем зондирование, и позволяют с наименьшими трудозатратами покрывать большие участки. Одной из самых распространенных методик профилирования является метод срединного градиента (СГ).

Вторая группа методов – индукционные зондирования с использованием переменных или неустановившихся ЭМ-полей. К этой группе относятся разные модификации магнитотеллурических зондирований (МТЗ, АМТЗ, РМТЗ, МВЗ), зондирования становлением поля (ЗСБ), частотные зондирования (ЧЗ) с искусственными контролируемыми источниками. Индукционные электромагнитные методы всегда применяются в формате зондирований, потому что изменение глубинности, в отличие от методов постоянного тока, здесь не требует больших затрат. Различное профилирование используется в высокочастотных вариантах для изучения небольших глубин – методы ДИП, ДЭМП, БДК, незаземленной петли и др.

Следующая группа методов связана не с принципами зондирования, а с условиями проведения измерений. На этапе разведки и доразведки месторождения широко применяются геофизические методы с

использованием скважин. Это продиктовано необходимостью получения на данных этапах геологоразведочных работ более детальной картины строения месторождения или отдельных рудных тел.

Скважинно-наземная электроразведка представлена как индукционными методами, так и методами постоянного тока. Наиболее технически простым и поэтому наиболее распространенным является метод заряда (МЗ). Существуют многочисленные модификации МЗ, которые используют разные способы возбуждения и регистрации поля [Kormiltsev, Semenov, 1987]. Есть методы, где зарядка рудного объекта осуществляется гальванически, есть варианты индукционной зарядки. Можно проводить измерения как электрических, так и магнитных компонент ЭМ-поля. Использование большого набора измерительных установок поверхность – скважина, скважина – скважина, с высоким пространственным перекрытием, на постоянном токе называется межскважинной электротомографией (МЭТ), а на переменном токе – радиоволновым просвечиванием (РВП) [Bobachev, Kulikov, 2008].

Основным физическим параметром горных пород или руд, который изучается в электроразведке, является удельное электрическое сопротивление (УЭС) или обратная ему величина – удельная электрическая проводимость. При решении рудных задач не менее важным показателем является электрохимическая активность горных пород. Она существенно повышается в присутствии электронных проводников, поэтому является ярким индикатором рудных минералов, может быть естественной или вызванной. Поля естественной электрохимической активности изучаются в методе естественного поля (ЕП). Этот геофизический метод был одним из ведущих в 50–70-е гг. прошлого столетия при поисках месторождений медноколчеданных, полиметаллических, железных руд. Однако он эффективен только в случае открытых месторождений или при незначительной мощности (10–15 м) перекрывающих отложений. Поэтому на сегодняшний день метод ЕП широко применяется только в каротажном варианте – метод собственной поляризации (ПС).

Метод, основанный на изучении полей вызванной электрохимической активности горных пород (путем пропускания постоянного или низкочастотного переменного тока), называется методом вызванной поляризации (ВП). В отличие от ЕП, метод ВП обладает большой глубинностью, использование искусственных источников позволяет повысить отношение сигнал/шум, поэтому он много десятилетий успешно применяется при решении рудных задач.

Изучение полей вызванной поляризации осуществляется, как правило, в комплексе с другими электроразведочными методами, чаще – электрического профилирования (ЭП-ВП, СГ-ВП) или зондирования (ВЭЗ-ВП, ЭТ-ВП). Измерения проводят как во временной, так и в частотной областях. Ниже мы рассмотрим отдельные вопросы методики и интерпретации электроразведочных методов.

2. ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЕ

Методы электрического профилирования, несмотря на видимую простоту технологии работ, тоже имеют свои проблемы. Одна из них – увязка значений, полученных от разных питающих линий при площадных исследованиях. Особенно ярко данная проблема сказывается на результатах работ методом СГ, когда существует значительный градиент электрических или поляризационных свойств в пределах изучаемой площади (рис. 1). Приведение карт кажущегося сопротивления $\rho_к$ и кажущейся поляризуемости $\eta_к$, полученных от разных положений питающих линий, к одному уровню является задачей нетривиальной, единого алгоритма для такой корректировки не существует, и в каждом отдельном случае решение индивидуально.

При проведении площадных работ методом электропрофилирования на кварцево-жильных месторождениях типичной ошибкой является неправильный выбор размеров и ориентации электроразведочной установки. Если расположить установку под острым углом к основному направлению простирания жил, то они могут не проявиться в геофизических полях. Еще одной распространенной ошибкой является использование в методе СГ на объектах кварцево-жильного типа больших питающих линий, в желании покрыть съемкой как можно большую площадь от одной линии

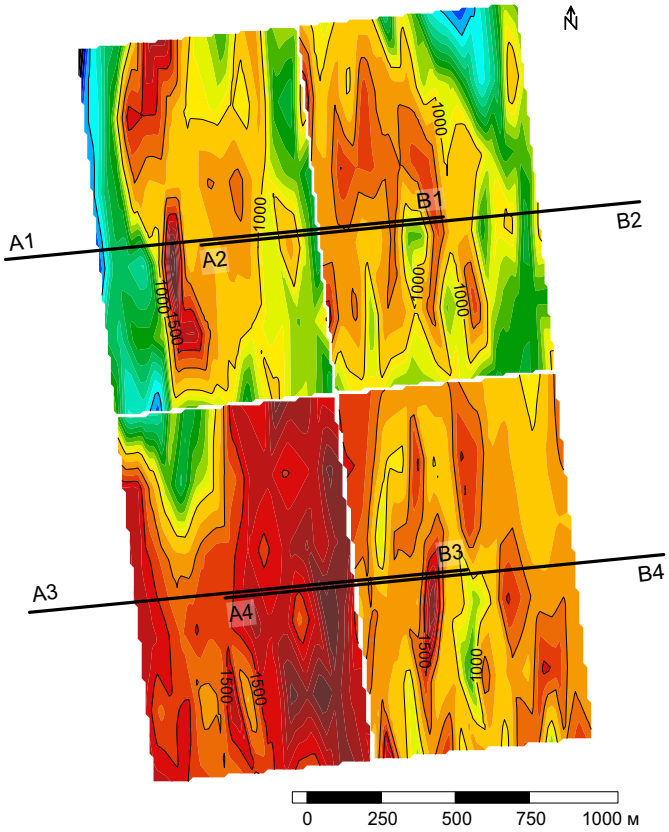

Рис. 1. Четыре планшета площадной съемки методом СГ от разных линий АВ.

Fig. 1. Four plats of area survey using the mean gradient (MG) method from different lines AB.

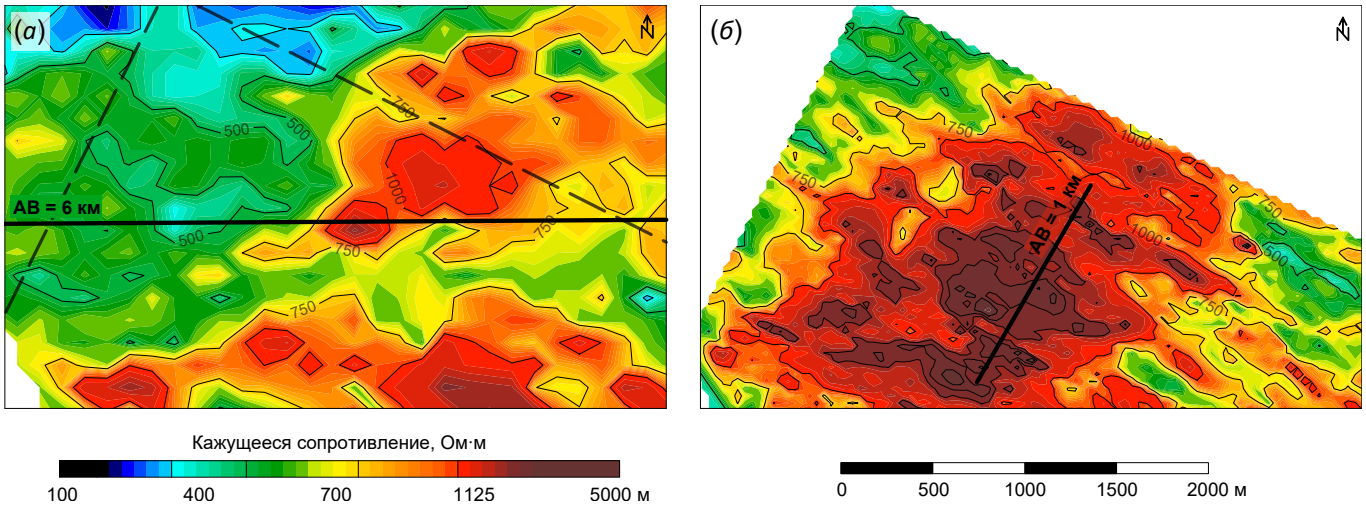

Рис. 2. Сравнение двух карт $\rho_к$, полученных методом СГ от разных линий АВ.
(*а*) – питающая линия длиной 6 км располагалась по широте, положительные аномалии $\rho_к$ связаны с областями распространения вулканических пород: дацитов, андезитов; (*б*) – питающая линия 1 км, азимут в юго-западном – северо-восточном направлении, положительные аномалии $\rho_к$ северо-западного простирания отвечают кварцевым рудоносным жилам.

Fig. 2. Comparison of two $\rho_к$ maps based on the data obtained by the MG method from different lines.
(*а*) – 6-km long current line along the latitude; (*б*) – 1-km long SW-NE-trending current line. Positive anomalies $\rho_к$: (*а*) associated with volcanic rock areas (dacite, andesite); (*б*) NW-striking and corresponding to quartz ore-bearing veins.

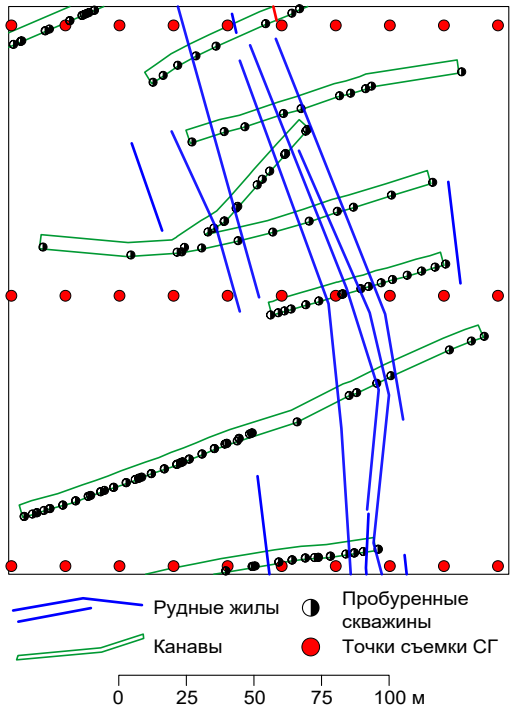

Рис. 3. Фрагмент карты фактического материала работ методом СГ-ВП на фланге золоторудного месторождения. Масштаб съемки 1:10000.

Fig. 3. Fragment of the map showing the flank of a gold-ore deposit. The map is based on field data obtained by the MG-IP method. Survey scale 1:10000.

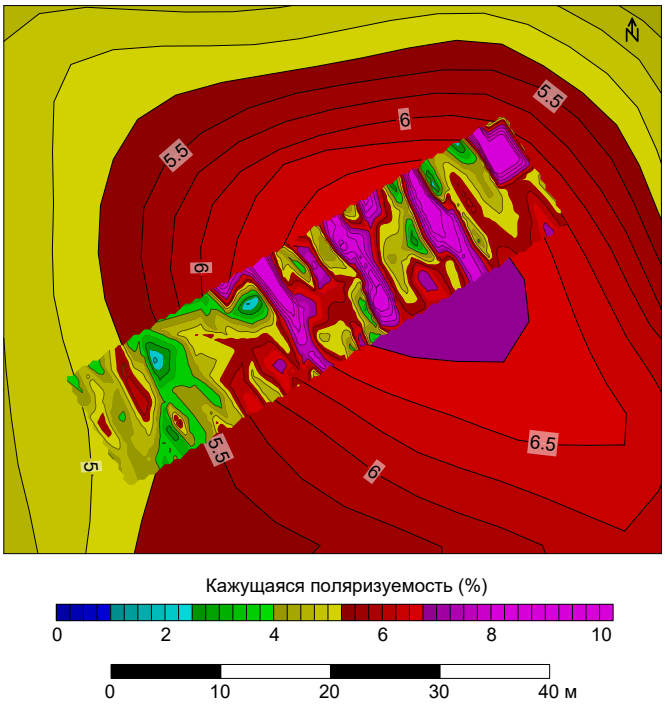

Рис. 4. Кварцево-жильное месторождение Югас. Карты кажущейся поляризуемости, построенные по результатам съемки масштаба 1:1000 (фоном) и 1:250 (фрагмент сверху).

Fig. 4. The Yugas guartz-vein deposit. Apparent polarizability maps are based on the survey data, scales of 1:1000 (background) and 1:250 (fragment above).

AB. Такая установка обладает большой глубинностью, регистрируемый сигнал отражает влияние гигантского объема пород, и рудные жилы, находящиеся около поверхности, могут в нем не проявиться (рис. 2).

Для разных типов рудных месторождений съемка одного и того же масштаба будет соответствовать разным этапам геологоразведочных работ. Например, для кварцево-жильного типа масштаб 1:10000 можно рассматривать как первый этап – работы общегеологического назначения, а для крупных медно-порфировых систем такую съемку можно проводить на поисковой и даже оценочной стадии.

При работах на объектах кварцево-жильного типа важно доносить до заказчика, что результаты геофизической съемки масштаба 1:10000 мы не можем напрямую сопоставлять с результатами горно-буровых работ и искать корреляцию между содержаниями отдельных металлов в пробах и значениями параметров $\rho_к$ или $\eta_к$.

На рис. 3 приведен фрагмент карты фактического материала работ методом СГ-ВП по сети 100×20 м на одном из золоторудных объектов на Чукотке. На фрагменте карты размером 200×200 м мы имеем 24 значения, при этом в границы участка попадет 9 известных жил, около 80 скважин, 7 канав. На отдельных участках между соседними точками измерений находится по 2–3 рудные жилы. Заказчик был недоволен тем, что какой-либо корреляции между кажущимися геофизическими параметрами и положением известных рудных тел (отсутствие поисковых признаков) не было. Но очевидно, что при выбранном масштабе съемки такой корреляции ожидать и не приходится.

На рис. 4 приведены две карты кажущейся поляризуемости, построенные по результатам работ методом СГ-ВП в масштабах 1:1000 и 1:250 на кварцево-жильном месторождении молибденовых руд на Кольском п-ове. Отдельные рудные жилы можно увидеть только при съемке с шагом 1 м и таким же размером приемной линии MN. Даже на результатах съемки масштаба 1:1000 отдельные жилы сливаются, образуя широкие аномалии кажущейся поляризуемости или удельного сопротивления.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ВП ВО ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТЯХ

Вопрос, который часто возникает при обсуждении метода ВП, – сравнение измерений во временной и частотной областях. Ряд специалистов-геофизиков предвзято относится к измерениям ВП в частотной области, в том числе в фазовом варианте, считая, что вызванную поляризацию можно измерить только в отсутствие первичного поля. Действительно, измерения ВП в частотной области имеют ряд проблем, связанных с извлечением полезного сигнала на фоне ЭМ-индукции, высокочастотных поляризационных эффектов, магнитотеллурических помех и др. Но многие из перечисленных проблем остаются и во временной области.

На рис. 5 представлена статистика, отражающая соотношение докладов, посвященных измерению ВП в частотной или во временной области, представленных на Международном семинаре ВП в Ньюарке в 2018 г. Данное мероприятие проводится раз в два года и является наиболее представительным собранием специалистов, занимающихся вызванной поляризацией. По нашим оценкам, измерениям в частотной области было посвящено около половины докладов, примерно в трети работ рассматривались или сравнивались результаты, полученные двумя способами измерений, и только 20 % докладов были посвящены измерениям во временной области (рис. 5).

Отметим также, что большая часть публикаций по исследованиям в частотной области посвящена многочастотным измерениям, так называемому методу спектрального ВП (СВП, SIP). В 2016 г. на Международном семинаре ВП в Дании было представлено 26 докладов по СВП, а в 2018 г. в Ньюарке – 17.

Одинаковая информативность двух вариантов метода ВП неоднократно подтверждалась сравнением лабораторных или полевых измерений на одних и тех же объектах. Например, этому вопросу было уделено внимание в нашей совместной с санкт-петербургскими геофизиками работе [Ermolin et al., 2020].

На рис. 6 приведен один из наших результатов, полученный на учебном полигоне кафедры геофизики геологического факультета МГУ. На двух точках ВЭЗ с установкой Шлюмберже на каждом разносе последовательно регистрировался полный спад поля ВП от 10 мс до 2 с (при зарядке 2 с) и измерялся дифференциальный фазовый параметр (ДФП) [Kulikov, Shemyakin, 1978] в диапазоне частот от 0.15 до 4.88 Гц. Пересчет ДФП в кажущуюся поляризуемость выполнялся по эмпирической формуле $\eta_к$=–2.5×ДФП [Kulikov, Shemyakin, 1978]. Кривые кажущейся поляризуемости,

Рис. 5. Соотношение докладов, посвященных разным способам измерения ВП, представленных на Международном семинаре в Ньюарке, США в 2018 г.

Fig. 5. Ratios of reports on different IP measurement methods, which were presented at the International Workshop in Newark, USA on October 03–05, 2018.

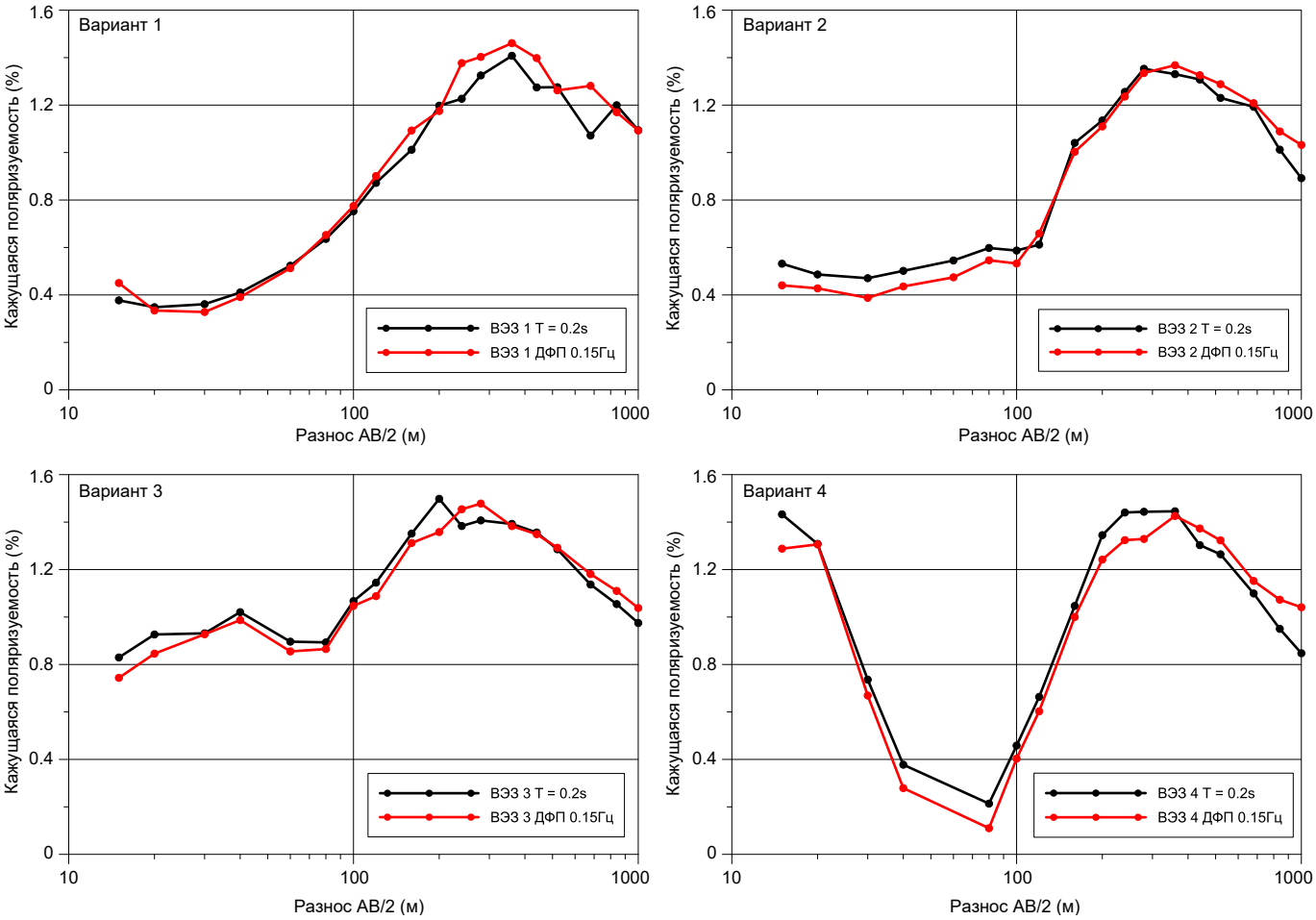

Рис. 6. Сравнение кривых кажущейся поляризуемости по результатам измерений во временной области (задержка 0.2 с) и в частотной области по ДФП (частота 0.15 Гц).

Fig. 6. Comparison of apparent polarizability curves based on measurements in the time domain (delay 0.2 s) and in the frequency domain using the differential phase parameter (DPP) (frequency 0.15 Hz).

построенные по разным вариантам измерений, совпадают с точностью до коэффициента.

4. БЫСТРЫЕ ПРОЦЕССЫ ВП

Метод ВП является одним из наиболее динамично развивающихся методов электроразведки. Внедрение цифровой аппаратуры с быстродействующими аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) существенно повлияло на современный «облик» метода ВП. Вокруг отдельных направлений развития метода в последние годы возникало много дискуссий и споров, на которых бы хотелось остановиться.

В 50–90-е гг. прошлого столетия вызванная поляризация оценивалась по уровню остаточного электрического поля, измеренного через несколько сотен миллисекунд после возбуждения одиночным импульсом или их серией [Komarov, 1980]. Длительные физические процессы, проявляющиеся на больших временах после возбуждения (или на низких частотах), преимущественно связаны с электрохимическими реакциями: окисление – восстановление, деформация двойного электрического слоя, электроосмос и др., интенсивность которых прямо пропорциональна наличию электронопроводящих включений в горных породах. Однако наиболее распространенными электронопроводящими горными породами в земной коре являются углеродистые породы, к которым относятся обширные горизонты черных сланцев, часто металлоносных [Kitaenko, 2016]. Разделение поляризационных эффектов от углистых пород и сульфидных руд является одной из основных задач метода ВП. Для ее решения возникла необходимость расширить диапазон регистрируемых времен или частот.

Пример выделения рудных объектов на фоне черносланцевой толщи с помощью многочастотных измерений ДФП приведен на рис. 7. Площадные работы методом СГ-ВП выполнены на севере Таймыра, по периферии крупного медно-порфирового массива. На удаленных от центра порфировой системы участках выявлены многочисленные пункты минерализации золотокварцевой формации, которые располагаются во флишоидных углеродсодержащих отложениях верхнего протерозоя, метаморфизованных до зеленосланцевой фации.

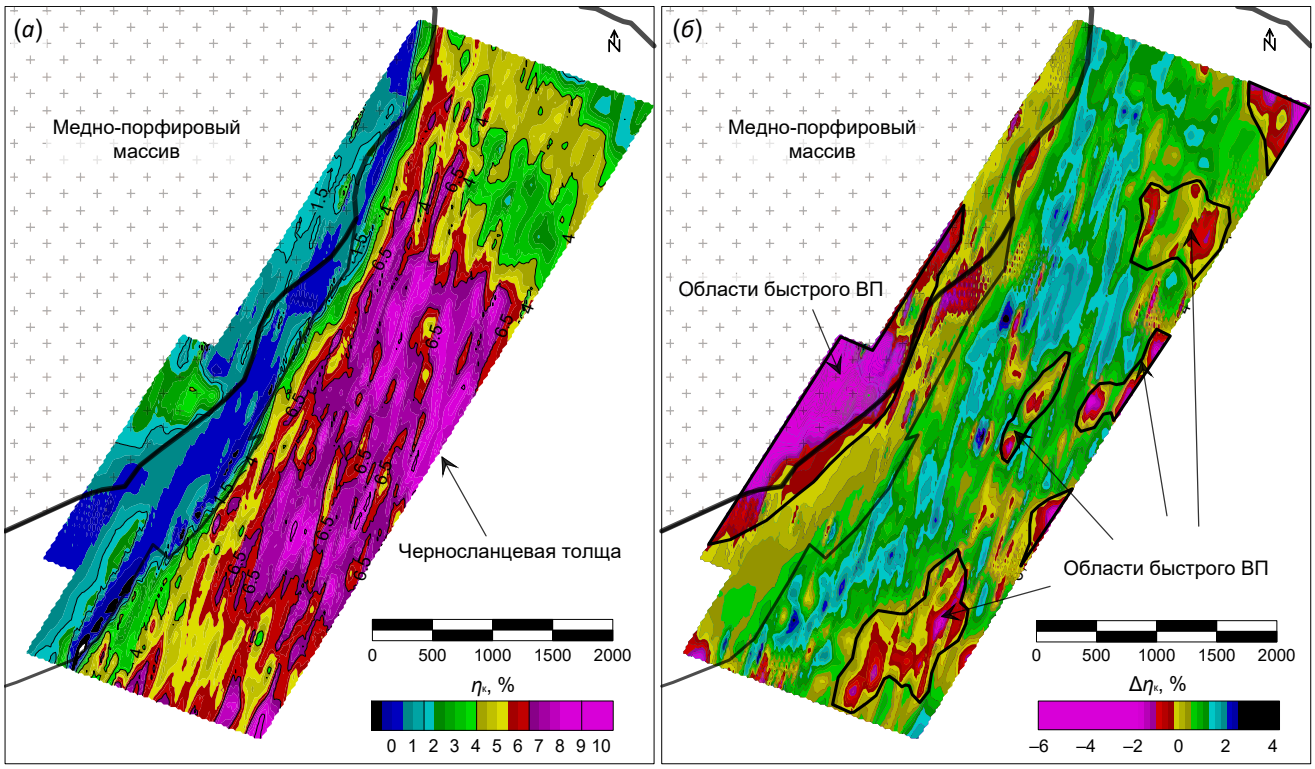

Рис. 7. Результаты работ методом СГ-ВП в поле развития углеродистых сланцев на границе крупного гранитного массива. (*а*) – карта кажущейся поляризуемости; (*б*) – карта разностного параметра кажущейся поляризуемости.

Fig. 7. Maps based on the MG-IP data on the carbon shale field located at the margin of the large granite massif: (*а*) – apparent polarizability; (*б*) – apparent polarizability difference.

Углеродистые сланцы создают высокий фон поля кажущейся поляризуемости (рис. 7, а). Для выделения аномалий сульфидной природы проводились многочастотные фазовые измерения. По частотной характеристике ДФП легко выделить аномалии, характеризующиеся более быстрыми спадами поля ВП, чем вмещающая толща. Эти участки и рассматриваются как возможное проявление эпитермальных золото-сульфидных месторождений (рис. 7, б).

Расширению временного и частотного диапазона измеряемых сигналов в методе ВП способствовали использование высокочастотных АЦП, увеличение памяти измерителей, появление специальных алгоритмов обработки сложных сигналов. В результате возникло новое направление электроразведки – изучение быстрых процессов вызванной поляризации (БВП) [Ageev, Svetov, 1999; Kozhevnikov, 2012; Olenchenko, 2002; Karasev et al., 2005].

Внешнее электрическое поле может вызвать в ионно-проводящих и электронопроводящих горных породах различного вида электрофизические и электрохимические поляризационные процессы. К ним относятся релаксационная, миграционная поляризация, поляризация концентрационно-диффузного перераспределения, электролитическая и другие. Большая часть перечисленных выше процессов имеет длительность, измеряемую нано- и микросекундами, поэтому они не оказывают существенного влияния на измеряемые в ВП параметры. Однако некоторые процессы могут проявляться и на более поздних временах (10^{-5}–10^{-2} с), измеряемых в методе ВП.

Например, поляризация Максвелла – Вагнера, или «межповерхностная поляризация» [Kozhevnikov, 2012], возникает в гетерогенных средах на границах между фазами, когда они существенно отличаются по значениям диэлектрической проницаемости или проводимости, или одновременно по тому и другому параметрам. Эти эффекты впервые были обнаружены и описаны при проведении работ методом становления поля в условиях развития многолетнемерзлых пород [Kozhevnikov et al., 1995] и потому получили название индукционно-вызванной поляризации (ИВП). Однако в последние годы были получены многочисленные доказательства проявления данного эффекта на более низких частотах и не обязательно в условиях криолитозоны. Эффект Максвелла – Вагнера часто проявляется при проведении работ на скальных породах, обладающих высоким удельным сопротивлением в зоне аэрации. Поэтому, на наш взгляд, более корректно будет использовать при обозначении данного эффекта не способ возбуждения, а физический смысл явления или его временной диапазон – ранняя стадия ВП, быстрые процессы ВП.

Важно отметить, что большие значения вызванной поляризации, фиксируемые на ранних временах становления, в большинстве случаев никак не связаны

с присутствием в породе электронных проводников, а значит, не могут быть использованы как поисковый признак металлических руд.

На территориях Зыряновского и Лениногорского районов на Рудном Алтае компания ООО «Северо-Запад» за последние годы выполнила несколько сотен зондирований становлением поля с различными петлевыми установками. Для установки петля в петле эффекты вызванной поляризации проявились на 80 % кривых становления. На отдельных участках измерения методом ЗСБ проводились параллельно с электротомографией, что дало возможность сопоставить аномалии кажущейся поляризуемости и участки максимальных проявлений БВП.

На рис. 8 показаны разные варианты соотношения аномалий ВП, полученных по результатам электротомографии (электропрофилирования) фазовым методом на низких частотах, и быстропротекающих процессов ВП на соосных установках кривых становления поля. Последние представлены в виде графиков ЭДС по профилю.

Первый пример получен на Игнашихинском рудопроявлении в Зыряновском районе (правый берег р. Бухтарма). Аномалия ВП над залежью колчеданных руд была выявлена еще в начале 70-х гг. прошлого столетия. Профиль буровых скважин вскрыл на данном участке кварц-серицитовые сланцы с прожилково-вкрапленным колчеданным оруденением (рис. 8, г).

Наличие рудной залежи полностью подтверждается работами методами ЭП-ВП (рис. 8, а) и ЭТ-ВП (рис. 8, в). Уровень аномалии кажущейся поляризуемости (по ДФП) по результатам ЭП-ВП составляет около 5 %, по электротомографии здесь выявлены два глубинных объекта с уровнем η=7–8 %. Кривые ЗСБ, измеренные над рудной залежью, имеют зону перехода через ноль, отражая наличие быстрых процессов ВП (рис. 8, б).

Второй пример получен над рудопроявлением Звездное, расположенным на юго-восточном фланге группы месторождений Чекмарь-Гусляковское (Лениногорский район). Группа колчеданно-полиметаллических месторождений была открыта в 70–80-х гг. прошлого столетия и изучена большим объемом буровых работ до глубин 400–800 м.

Рудовмещающими являются гидротермально-измененные вулканогенно-осадочные отложения среднего – верхнего девона. Рудные зоны занимают устойчивое вертикальное положение, располагаясь в крыльях и замковых частях сильно сжатых антиклинальных и синклинальных складок.

По результатам электротомографии рудная зона Звездное проявилась в виде узкой субвертикальной области низких УЭС=100 Ом·м (рис. 8, е) и высокой поляризуемости (η>10 %). На кривых становления ни для соосных, ни для разнесенных установок никаких эффектов БВП над контрастным поляризующимся объектом не зафиксировано (рис. 8, д). Различие в итоговых моделях УЭС для разных методов можно объяснить разными подходами к интерпретации данных. Кривые, полученные методом переходных процессов (МПП), интерпретировались в режиме одномерного подбора, который априори предполагает горизонтально-слоистую модель среды, а данные ЭТ – в режиме 2D с большим вертикальным радиусом сглаживания.

Третий пример получен на восточном продолжении того же рудопроявления Звездное. Профиль был заложен через геохимическую аномалию. Уровень поляризуемости по результатам электротомографии на участке профиля невысокий, значения η не превышают 1.5 % (рис. 8, з). Тем не менее в центре профиля несколько кривых становления, даже на выносных установках, искажены сильными эффектами БВП (рис. 8, ж).

Из приведенных примеров мы видим, что эффекты БВП, наблюдаемые на кривых становления поля, далеко не всегда совпадают с низкочастотными аномалиями поляризуемости электрохимической природы. В первом варианте совпадение результатов ЭТ и МПП, на наш взгляд, обусловлено выходом рудной зоны непосредственно на поверхность. Появление искажений кривых становления в третьем примере точно отвечает выходу на поверхность зоны гидротермально-метасоматических изменений.

Следующий интересный пример проявления быстрых процессов ВП получен при проведении работ методом СГ-ВП на флангах золоторудного месторождения Дражное Тарынского рудного поля, одной из наиболее изученных и экономически освоенных площадей Верхне-Индигирского горнопромышленного района Республики Саха (Якутия).

Месторождение относится к золото-кварцевой малосульфидной формации, оруденение представлено золотоносными карбонат-кварцевыми прожилками в терригенных толщах. Для объектов характерны золото-арсенопиритовая и золото-полиметаллическая продуктивные минеральные ассоциации. Золотое оруденение приурочено к крутопадающим продольным зонам смятия северо-западного простирания и сдвиговым зонам.

На рис. 9, а, представлена карта кажущейся поляризуемости для частоты 0.15 Гц, полученная по результатам СГ-ВП фазовым методом ВП. В юго-западной части площади мы видим типичную рудную аномалию $\eta_к$, протягивающуюся вдоль долины р. Большой Тарын. Уровень значений кажущейся поляризуемости над зонами прожилково-вкрапленной кварцево-сульфидной минерализации составляет около 7 %, что вполне отвечает типичным для участка содержаниям сульфидов в 5–10 %, представленных железосодержащими разностями – пиритом и, в меньшей степени, арсенопиритом.

По мере увеличения частоты измерений (4.88 Гц), уровень кажущейся поляризуемости в целом вырастает до 40–50 %, а максимальные значения фиксируются уже на дальнем от долины реки участке (рис. 9, б).

Для того чтобы понять, с чем связаны высокие значения $\eta_к$, через участок СГ были проведены измерения методом ЭТ также с многочастотной регистрацией

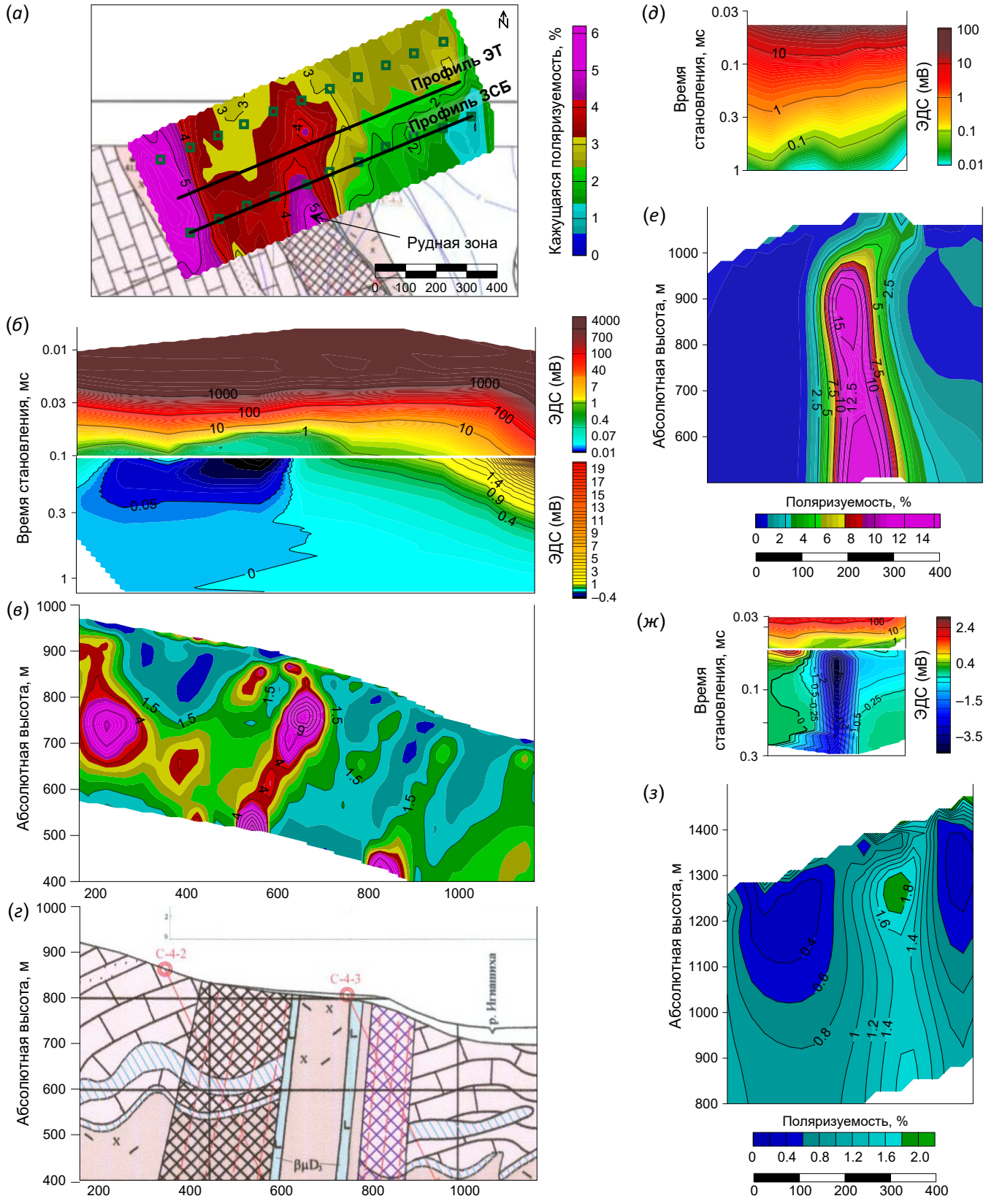

Рис. 8. Сравнение ЭТ и ЗСБ по трем разным профилям.
(*а*) – результаты работ методом ЭП-ВП представлены в виде карты кажущейся поляризуемости; (*б, д, ж*) – результаты ЗСБ представлены в виде псевдоразрезов ЭДС; (*в, е, з*) – результаты ЭТ в виде поляризационных моделей; (*г*) – геологический разрез на Игнашихинском рудопроявлении в Зыряновском районе (правый берег р. Бухтарма).

Fig. 8. Comparison of ET and TDEM data for three different profiles.
(*а*) – apparent polarizability map (EP-VP); (*б, д, ж*) – EMF pseudo-sections (TDEM); (*в, е, з*) – polarization models (ET); (*г*) – geological section of the Ignashikha ore occurrence (right bank of the Bukhtarma river).

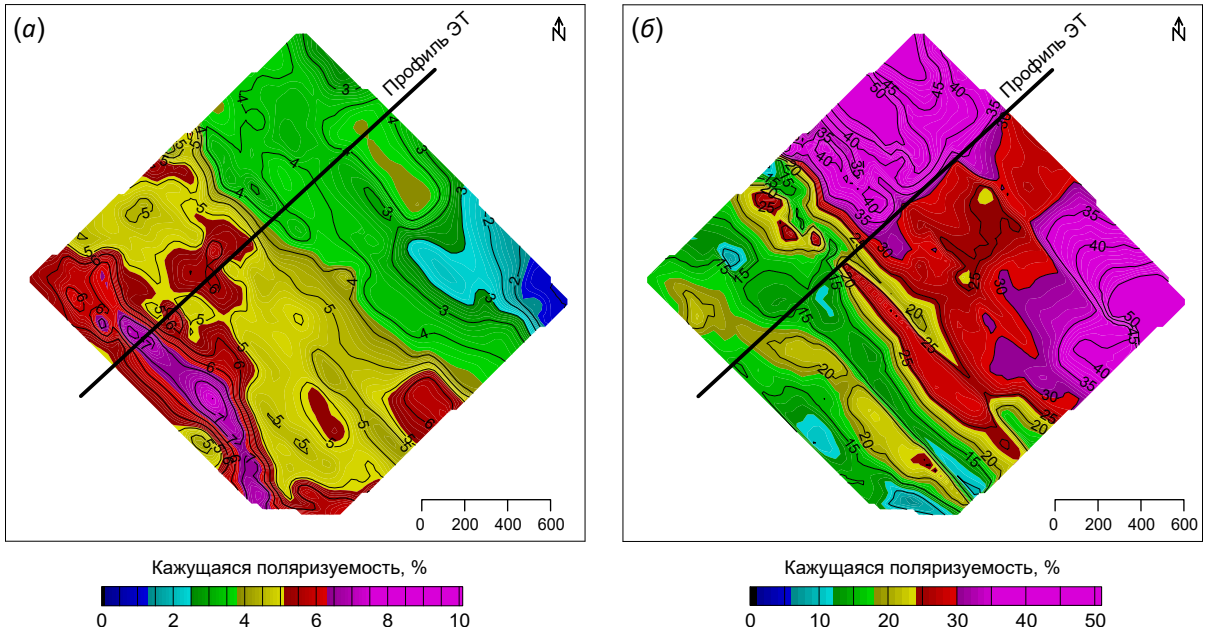

Рис. 9. Фланги месторождения Дражное. Карты кажущейся поляризуемости по ДФП: (*а*) – частота 0.15 Гц; (*б*) – частота 4.88 Гц.
Fig. 9. Flanks of the Drazhnoe deposit. Apparent polarizability maps by DPP: (*а*) – frequency 0.15 Hz; (*б*) – frequency 4.88 Hz.

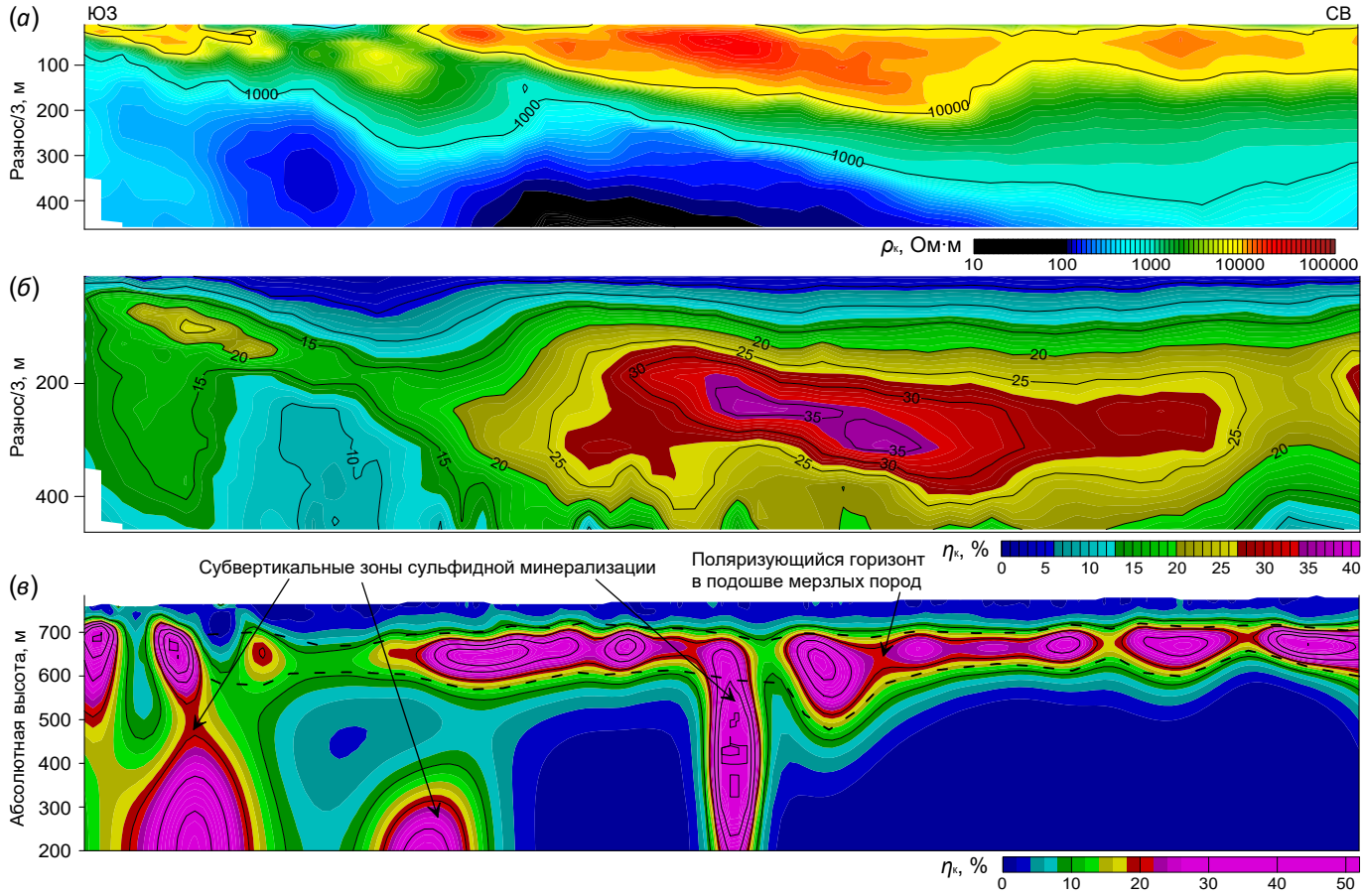

Рис. 10. Результаты работ методом ЭТ на флангах месторождения Дражное.
Псевдоразрезы: (*а*) – кажущегося сопротивления, (*б*) – кажущейся поляризуемости на частоте 4.88 Гц; (*в*) – глубинный разрез поляризуемости по результатам 2D-инверсии на частоте 4.88 Гц. Положение профиля показано на рис. 9.

Fig. 10. Results of the ET surveys of the flanks of the Drazhnoe deposit (Yakutia).
Pseudo-sections: (a) – apparent resistivity, (*б*) – apparent polarizability (frequency 4.88 Hz); (*в*) – depth section of polarizability based on the 2D inversion data (frequency 4.88 Hz). The profile position is shown in Fig. 9.

фазового параметра. Уже на первичных данных (псевдоразрез $\eta_к$) на разносах 500–600 м выделяется горизонт больших значений $\eta_к$>30 %. По результатам инверсии данных ЭТ для частоты 4.88 Гц в разрезе η, практически на всем профиле присутствует маломощный поляризующийся горизонт (рис. 10), который по глубине совпадает с подошвой верхнего высокоомного слоя мерзлых пород. Здесь, вероятно, начинают появляться фрагменты талых пород, что и приводит к яркому проявлению эффекта Максвелла – Вагнера.

В последние годы появилось несколько публикаций, посвященных изучению диэлектрической проницаемости мерзлых дисперсных сред, где показана возможность появления гигантских значений диэлектрической проницаемости (ε') льда на низких частотах [Bordonskii et al., 2009]. Значения ε' могут достигать в районе нулевых температур нескольких тысяч. Учитывая, что временной параметр ВП гетерогенных сред, состоящих из относительно проводящих пород с тонкими прослоями сильных изоляторов (шлиры льда, кварцевые жилы), зависит от произведения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости включений [Zorin, Ageev, 2017], можно ожидать появление токов смещения на достаточно низких частотах.

5. АВТОМАТИЧЕСКАЯ МНОГОМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ ДАННЫХ

Современным инструментом интерпретации электроразведочных данных являются программы автоматической инверсии. Если еще 20–30 лет назад интерпретация начиналась с детального качественного анализа первичных данных и интерпретатор «знал в лицо» особенности каждой измеренной кривой, то сегодня зачастую рассматриваются только результаты инверсии в виде трехмерных или двумерных моделей УЭС. Но автоматический подбор без анализа первичных данных и учета априорной информации может приводить к ошибочным решениям. Чем выше размерность инверсии, тем выше требования к объему данных. Для проведения 3D-инверсии необходима площадная съемка.

5.1. 3D-инверсия данных ЭТ

Если объект поиска имеет изометричные размеры, то преимущества трехмерной инверсии перед 2D очевидны. Но в определенных случаях и при изучении линейных объектов, где, казалось бы, оправдано применение двумерного подхода, с помощью 3D-инверсии можно получить более корректную модель УЭС.

В качестве примера мы приведем результаты интерпретации данных ЭТ на одном из поисковых участков Лениногорского района Рудного Алтая. Несколько параллельных профилей длиной 3 км были расположены на расстоянии 500 м и ориентированы в юго-западном – северо-восточном направлении вкрест основным тектоническим структурам региона.

В геолого-структурном плане участок приурочен к северо-западной зоне Лениногорского рудного района, в строении которой принимают участие вулканогенно-осадочные отложения нижнего и среднего девона, дислоцированные в складки, осложненные разрывными нарушениями и прорванные субвулканическими интрузиями различного состава.

Повышенную поляризуемость и пониженное сопротивление имеют сульфидизированные гидротермально-измененные породы в узких зонах дробления и рассланцевания, которые протягиваются на несколько сот метров в направлении северо-запад – юго-восток. По результатам 2D-инверсии возникают отдельные ошибки в определении параметров аномалиеобразующих объектов.

При очень большой протяженности проводника по результатам 2D-инверсии не определяется глубина положения его нижней кромки, проводящая зона прослеживается до максимальных глубин инверсии. Реальную глубину проводника удается уточнить с помощью 3D-инверсии (рис. 11).

Кроме того, в результатах 2D-инверсии не учитывается боковое влияние соседних структур. В случае если проводящая зона располагается на некотором расстоянии параллельно профилю ЭТ (рис. 12), по результатам 2D-инверсии (рис. 12, а), в отличие от 3D (рис. 12, б), мы получаем ложный проводящий слой на глубинах, отвечающих примерно расстоянию до проводника.

3D-инверсия становится сегодня рабочим инструментом и часто обязательным требованием для интерпретации электроразведочных данных. Учет трехмерности геоэлектрической модели, безусловно, несет в себе много положительных моментов. Но важно помнить и о проблемах, которые при этом могут возникнуть.

Во-первых, для реализации 3D-инверсии значительно повышаются требования к средствам вычислений. Чтобы обеспечить разумное время вычислений, приходится, по сравнению с 2D, загрублять сетку моделирования и прореживать входные данные. В итоге получаем менее детальную картину распределения УЭС по сравнению с 1D или 2D. Кроме того, с увеличением размерности модели повышается и неоднозначность решения обратной задачи. Важно отметить, что преимущества трехмерной инверсии будут проявляться при использовании определенной методики измерений с применением систем взаимно ортогональных профилей. Так как данная методика требует технических усложнений, то далеко не все ее используют.

Попытка увязать между собой результаты, полученные по сети ортогональных профилей на уровне геоэлектрической модели, далеко не всегда имеет смысл. Если в методе МТЗ, за счет измерения четырех компонент поля, мы оперируем полным тензором импеданса, то в геометрических зондированиях мы имеем одну поляризацию электрического поля и одну измеряемую компоненту. Для микроанизотропных сред, например, при ярко выраженной трещиноватости в одном направлении, величина УЭС пород в разных направлениях будет естественным образом отличаться, и попытка

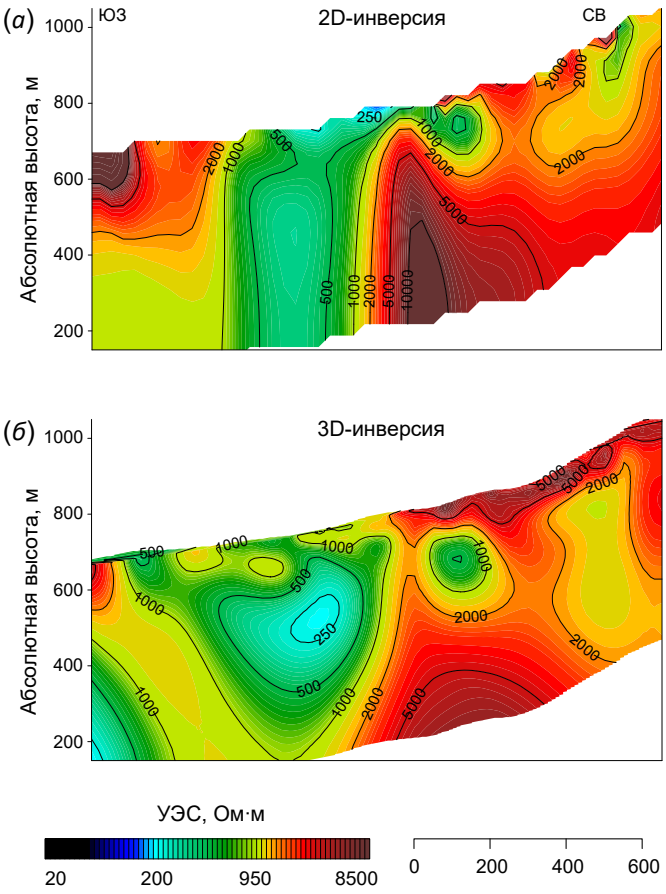

Рис. 11. Рудный Алтай. Фланги месторождения Чекмарь. Сравнение 2D- (*а*) и 3D-инверсий (*б*) по одному из профилей ЭТ.

Fig. 11. Flanks of the Chekmar deposit (Rudny Altai). Comparison of 2D (*а*) and 3D (*б*) inversions for one of the ET profiles.

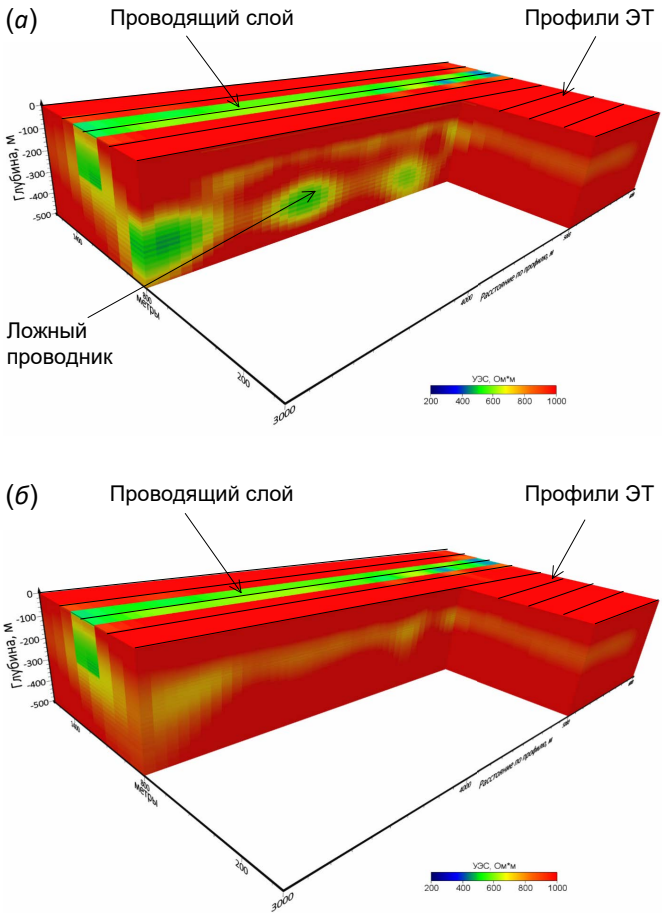

Рис. 12. Результаты 2D-инверсии (*а*) и 3D-инверсии (*б*) по профилю.

Fig. 12. 2D (*а*) and 3D (*б*) profile inversion results.

подобрать данные по измерениям, полученным от разноориентированных установок одной моделью, приведет только к осреднению результата.

5.2. 3D-инверсия МТ-данных

На сегодняшний день имеется широкий ассортимент программ для 3D-инверсии магнитотеллурических данных: WSInv3DMT (Siripunvaraporn W, Таиланд), MT3DFwd (Mackie R.L, США), программа Варенцова (ЦГЭМИ ИФЗ, г. Москва), программа Жданова (Университет Юты, г. Солт-Лейк-Сити, США), ModEM (Университет штата Орегон, США [Kelbert et al., 2014]).

Большинство алгоритмов для 3D-инверсии МТ-данных основаны на конечно-разностном методе прямого моделирования, который обладает рядом очевидных преимуществ, таких как: простота решаемых систем линейных уравнений и возможность использования детальной сетки, что позволяет описывать сложные геологические модели. В методе интегральных уравнений нет необходимости дискредитировать большую область моделирования, достаточно детализировать аномальную область.

Как было сказано выше, преимущество 3D-инверсии проявляется в первую очередь при изучении изометричных объектов, к которым можно отнести большинство рудных месторождений. На рис. 13 приведено сравнение результатов 2D-инверсии, выполненной в программе MT2DTools (ООО «Северо-Запад», г. Москва), и 3D-инверсии в программе ModEM при определении границ рудных скарновых тел на Быстринском месторождении в Забайкальском крае.

Большие мощности скарновых тел (>500 м) и высокие сопротивления разреза ограничивают применение геометрических зондирований, поэтому в северо-восточной части месторождения на рудопроявлении Быстринское-2 в 2005 г. была проведена детальная площадная АМТ-съемка в объеме 550 физических точек (ф.т.). В 2005 г. интерпретация осуществлялась в рамках 2D-моделей по отдельным профилям, а в 2017 г. была проведена 3D-инверсия по горизонтальной сетке 50×50 м. Сейчас на бывшем участке работ ведется добыча медной и магнетитовой руды открытым способом и работает горно-обогатительный комбинат.

Для 3D-инверсии использовались основные компоненты тензора импеданса на 14 периодах в диапазоне от 10^{-4} до 1 с.

На карте-срезе УЭС трехмерной модели для глубины 200 м скарновые тела рудопроявления Быстринское-2

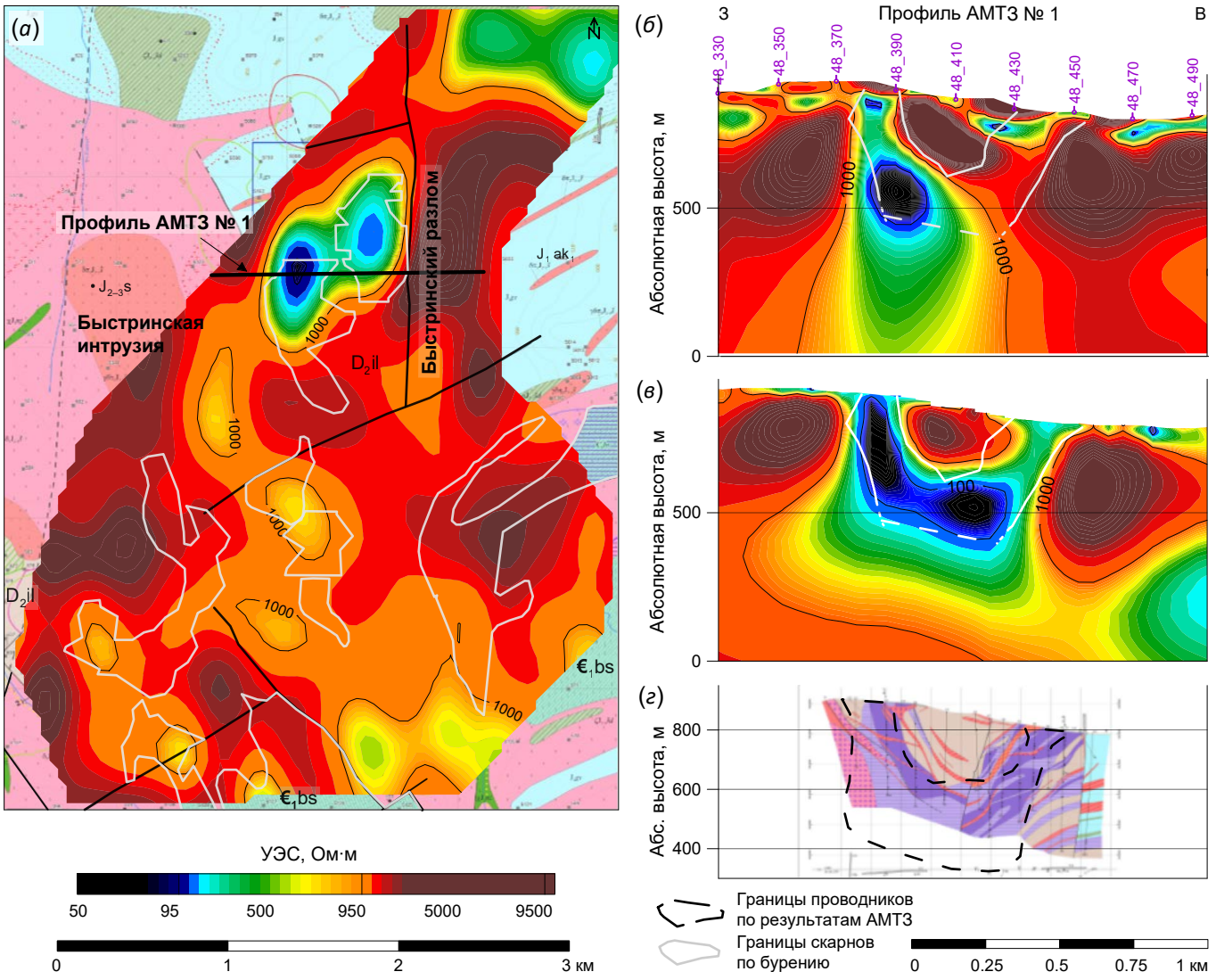

Рис. 13. Быстринское месторождение.
(*а*) – карта-срез УЭС на глубине 200 м по результатам 3D-инверсии; разрез УЭС по профилю № 1: по результатам 2D- (*б*) и 3D-инверсии (*в*); (*г*) – геологический разрез по профилю № 1 по скважинам.

Fig. 13. Bystrinskoe deposit.
(*а*) – map of resistivity at a depth of 200m based on 3D inversion results; resistivity section along profile No. 1: 2D (*б*) and 3D (*в*) inversion results; (*г*) – geological section along profile No. 1 for wells.

выделяются аномально низкими для изучаемой площади удельными сопротивлениями <100 Ом·м.

Очевидно, что эти скарны характеризуются высоким содержанием сульфидов (рис. 13, а). Скарны имеют изометричную форму и размеры примерно 300×300 м.

Сравнивая глубинные модели УЭС, полученные по результатам разных инверсий, с геологическим разрезом, построенным по результатам бурения, мы видим, что 3D-инверсия правильно восстановила границы восточного скарна и подошву скарновых тел, размер которой составил 500 м (рис. 13, в).

5.3. Особенности инверсии кривых кажущейся поляризуемости

Во многих случаях аномалии проводимости и поляризуемости совпадают. Такое соотношение характерно для углистых пород, графита, богатых жильных или сплошных сульфидных руд. Но иногда нам приходится сталкиваться с ситуацией, когда поляризующиеся объекты характеризуются относительно высоким удельным сопротивлением. Например, бедная сульфидная вкрапленность в изверженных породах не приводит к заметному уменьшению УЭС, а поляризуемость таких объектов, даже при низких содержаниях электронопроводящих включений, может быть достаточно высокой. С другой стороны, часто природа аномалий повышенной проводимости практически не отражается на поляризационных свойствах (например, аномалии, связанные с грунтовыми водами).

В соответствии с известной формулой Сигела [Seigel, 1959], для произвольного тела с параметрами ρ и η, помещенного в неполяризуемую среду, справедливо

следующее выражение: $\eta_к \approx \eta \cdot (\partial \ln \rho_к / \partial \ln \rho)$, т. е. параметр $\eta_к$ зависит как от поляризационных параметров разреза, так и от удельного сопротивления.

При интерпретации данных ЭТ, как правило, на первом этапе проводится инверсия кривых кажущегося сопротивления с получением глубинной модели УЭС, а на втором этапе выполняется инверсия кривых $\eta_к$.

Однако наш опыт интерпретации показывает, что в некоторых ситуациях инверсия кажущейся поляризуемости без строгого учета модели УЭС дает более согласованную с геологией и сбалансированную поляризационную модель.

В качестве первого примера приведем результаты интерпретации данных глубинной электротомографии на крупном медно-порфировом месторождении Южного Урала.

Уже на уровне качественного анализа первичных данных нами была отмечена ярко выраженная горизонтальная слоистость на разрезах кажущегося сопротивления. В результате инверсии была получена модель УЭС, близкая к горизонтально-слоистому разрезу, на котором медно-порфировая система практически не проявилась (рис. 14, а).

Анализ априорной гидрогеологической информации показал, что в районе месторождения выделяются три водоносных горизонта: четвертичный, олигоценовый и трещинные воды пород складчатого фундамента, которые и определяют структуру модели УЭС. Наиболее ярко, на глубине (100–300 м), проявился нижний горизонт высокоминерализованных (7–10 г/л) трещинных вод.

При совместной инверсии кривых $\eta_к$ и $\rho_к$, в поляризационном разрезе наследуется субгоризонтальная структура границ модели УЭС (рис. 14, б). Особенно ярко проявляется тонкий поляризующийся слой, совпадающий с высокоомным горизонтом над кровлей проводника, присутствие которого в разрезе не имеет геологического истолкования.

При втором варианте инверсии кривых $\eta_к$ использовалась модель УЭС однородного полупространства (ОПП), и на поляризационной модели мы получили типичную для медно-порфировой системы подковообразную область повышенных значений поляризуемости, отвечающую зонам пиритизации по флангам и богатым рудам в апикальной части интрузии (рис. 14, в). В приведенном примере поле кажущейся поляризуемости

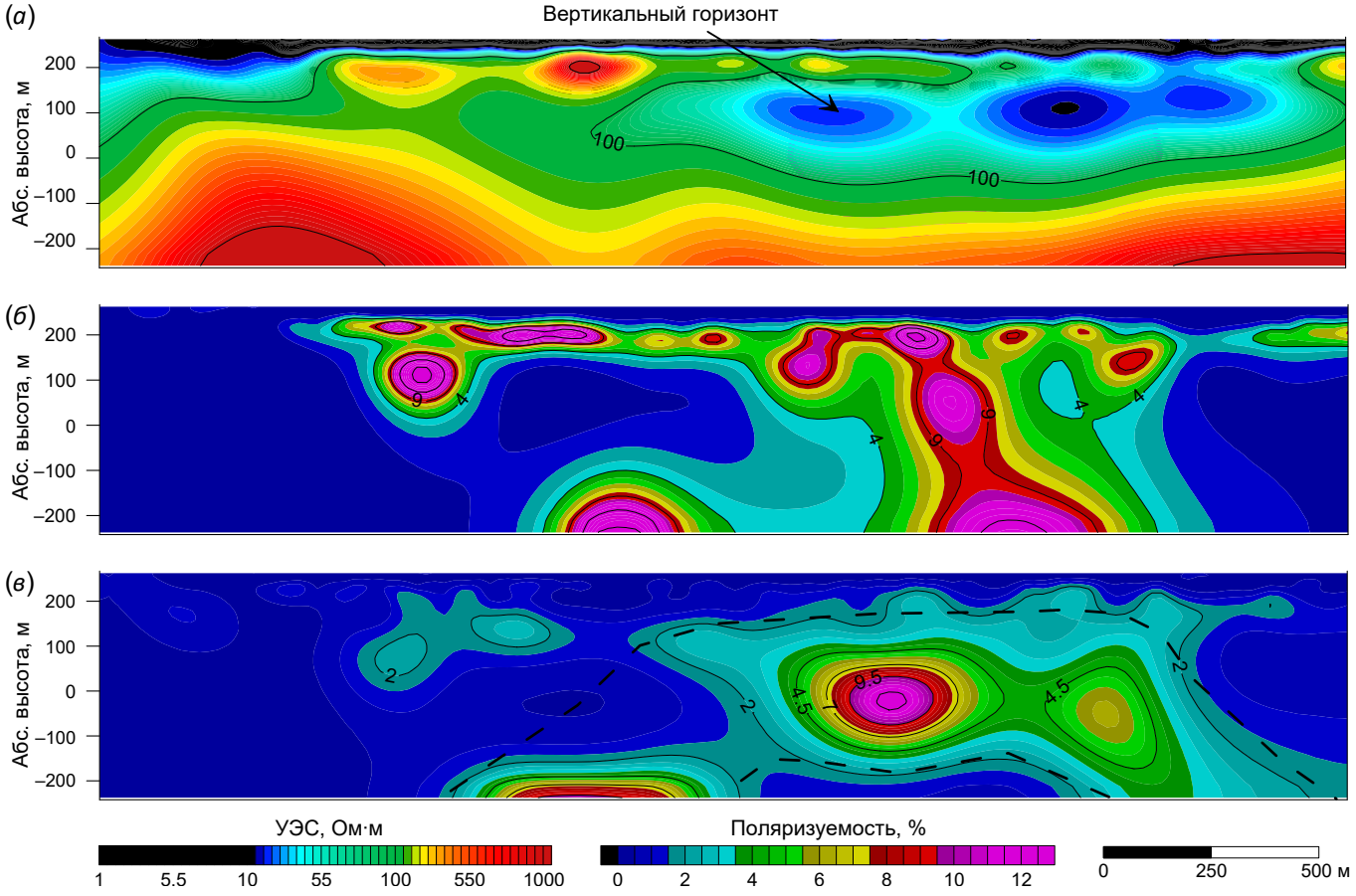

Рис. 14. Электротомография. Разные варианты инверсии кривых кажущейся поляризуемости на реальных полевых данных через медно-порфировое месторождение. (*а*) – модель УЭС; (*б*) – модель поляризуемости, вариант 1; (*в*) – модель поляризуемости, вариант 2.

Fig. 14. Electrical resistivity tomography. Different variants of inversion of apparent polarizability curves based on the field data across the porphyry copper deposit. (*а*) – resistivity model; (*б*) – polarizability model, version 1; (*в*) – polarizability model, version 2.

в меньшей степени связано с гидрогеологическим фактором, чем кажущееся сопротивление, и лучше отражает литологию, метасоматические изменения пород и зоны оруденения.

Вторая распространенная ошибка при инверсии кривых $\eta_к$ типична для высокоомных разрезов, перекрытых контрастными приповерхностными проводниками. В этом случае изменения УЭС высокоомного блока слабо отражаются на уровне $\rho_к$ и, чтобы скомпенсировать бесконечно малые значения параметра $\partial\ln\rho_k/\partial\ln\rho$, программа автоматической инверсии будет увеличивать поляризуемость (η) высокоомного

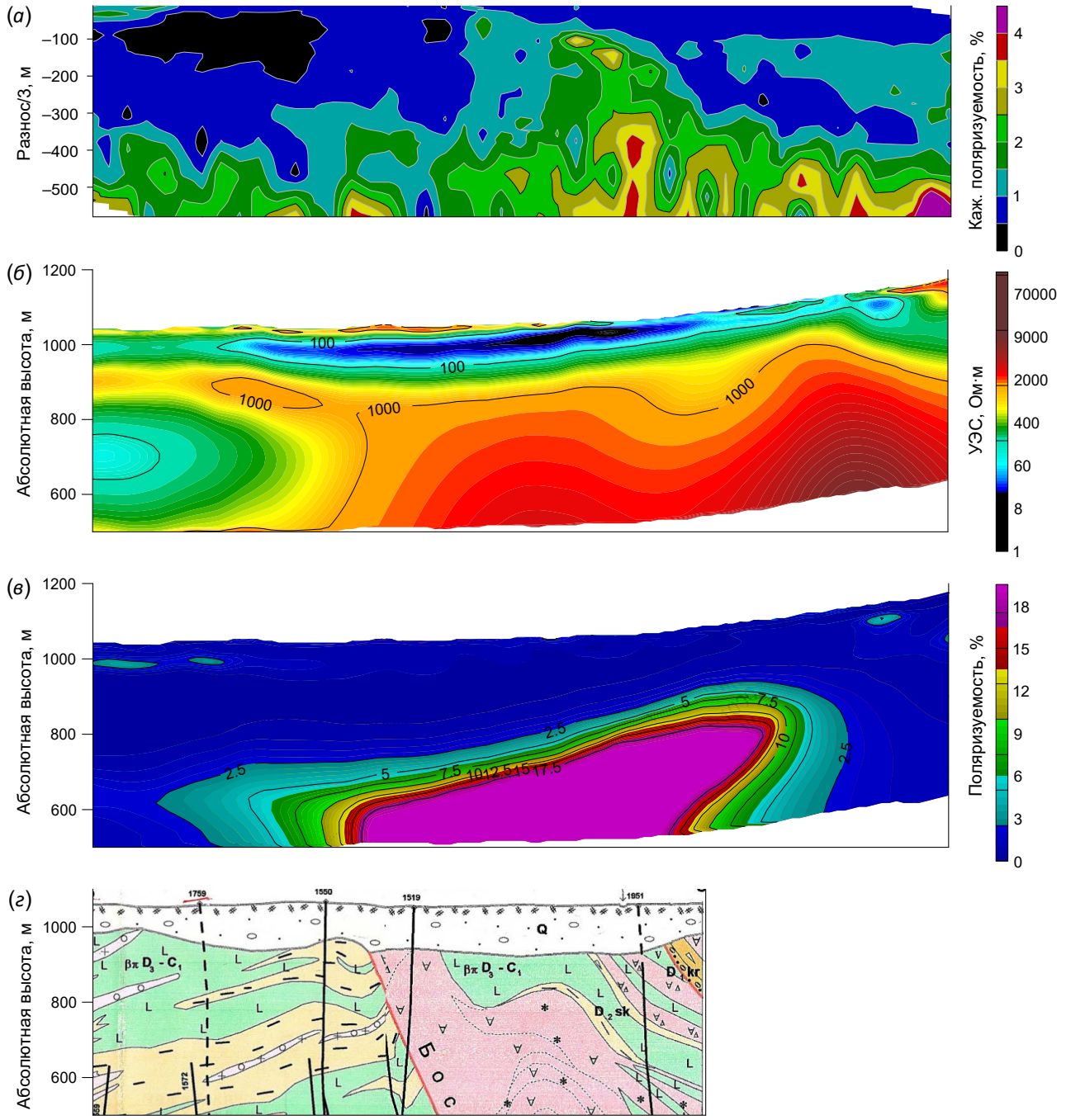

Рис. 15. Результаты 2D-инверсии по одному из профилей ЭТ на флангах Лениногорского месторождения.
(*а*) – псевдоразрез кажущейся поляризуемости; (*б*) – модель УЭС (2D-инверсия); (*в*) – поляризационная модель (2D-инверсия) на основе модели УЭС; (*г*) – геологический разрез. На модели поляризуемости (*в*) возникает область гигантских значений, отвечающая высокоомному блоку, перекрытому с поверхности контрастным проводником (*б*).

Fig. 15. Results of 2D inversion for one of the ET profiles of the flanks of the Leninogorsk deposit.
(*а*) – pseudo-section of apparent polarizability; (*б*) – resistivity model (2D inversion); (*в*) – polarization model (2D inversion) based on the resistivity model; (*г*) – geological section. The area with high polarizability values (*в*) corresponds to the high-resistance block, which surface is covered by a high-contrast conductor (*б*).

блока согласно формуле Сигела. В определенных случаях это приводит к необоснованному появлению на поляризационных моделях областей, характеризующихся огромными значениями η при незначительных аномалиях $\eta_к$ (рис. 15).

Во избежание появления ложных аномалий поляризуемости, в качестве стартовой модели при инверсии $\eta_к$ можно использовать низкоконтрастную, сглаженную модель УЭС, полученную после 1–2 итераций инверсии.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В одной, ограниченной по объемам публикации невозможно охватить весь спектр вопросов, связанных с рудной электроразведкой. Поэтому мы постарались сконцентрировать свое внимание на отдельных проблемах, с которыми нам приходится сталкиваться ежедневно при проведении полевых работ, обработке и интерпретации электроразведочных данных.

Много внимания в статье уделено методу вызванной поляризации, так как он остается важнейшим и наиболее динамично развивающимся направлением рудной геофизики.

Технологии измерения ВП во временной и частотной областях параллельно существуют и развиваются несколько десятилетий. Два разных подхода дают практически идентичные результаты при прочих равных условиях, что неоднократно было показано и доказано в процессе полевых и лабораторных экспериментов.

Приведенные в статье примеры получены преимущественно по технологии фазовых измерений в частотной области на основе ДФП. Применение данного параметра основано на том, что в области малых параметров поля фаза индукции прямо пропорциональна частоте. ДФП построен таким образом, что он полностью подавляет линейную компоненту фазы, не меняя постоянной составляющей. Это помогает бороться не только с индукционными явлениями, но и со многими другими помехами, пропорциональными частоте: емкостными утечками с питающей линии, наводками с питающей линии на приемную и т.д.

Высокие значения поляризуемости на ранних временах или высоких частотах (БВП), которые часто регистрируются на кривых становления поля в методе ЗСБ, в общем случае не связаны с электронными проводниками и не могут использоваться как поисковый рудный признак.

При автоматической инверсии кривых кажущейся поляризуемости на высокоомных разрезах, перекрытых контрастным приповерхностным проводником, могут возникать ложные поляризующиеся объекты.

Мы также коснулись вопросов правильного выбора масштабов съемки, использования программ автоматической 2D- и 3D-инверсии. Надеемся, что затронутые нами темы близки многим коллегам и будут полезны для дальнейшего развития такого важного направления геофизики, как рудная электроразведка.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Ageev V.V., Svetov B.S., 1999. Influence of the Polarizability of Rocks on the Results of Electromagnetic Sounding. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 1, 19–27 (in Russian) [Агеев В.В., Светов Б.С. Влияние поляризуемости горных пород на результаты электромагнитных зондирований // Физика Земли. 1999. №1. С.19–27].

Bobachev A.A., Kulikov V.A., 2008. Modern Modifications of Borehole-Surface and Cross-Borehole Measurements of IP in Solving Ore Problems. Exploration and Protection of Mineral Resources 12, 6–12 (in Russian) [Бобачев А.А., Куликов В.А. Современные модификации скважинно-наземных и межскважинных измерений ВП при решении рудных задач // Разведка и охрана недр. 2008. № 12. С. 6–12].

Bordonskii G.S., Istomin A.S., Krylov S.D., 2009. Dielectric Constant and Electric Potentials of Ice with Inclusions. Condensed Medium and Interphase Boundaries 11 (3), 198–202 (in Russian) [Бордонский Г.С., Истомин А.С., Крылов С.Д. Диэлектрическая проницаемость и электрические потенциалы льда с включениями // Конденсированные среды и межфазные границы. 2009. Т. 11. № 3. С. 198–202].

Ermolin E.Yu., Kulikov V.A., Melnikov A.V., Asoskov A.E., Polikarpova V.A., 2020. Results of Experimental and Methodological Work Using Electrical Prospecting Methods at the MSU Test Site in the Village of Aleksandrovka (Kaluga Region). Geophysics 4, 34–42 (in Russian) [Ермолин Е.Ю., Куликов В.А., Мельников А.В., Асосков А.Е., Поликарпова В.А. Результаты опытно-методических работ методами электроразведки на полигоне МГУ в д. Александровка (Калужская область) // Геофизика. 2020. № 4. С. 34–42].

Karasev A.P., Ptitsyn A.B., Yuditskikh E.Yu., 2005. Fast Transient Processes IP. Nauka, Novosibirsk, 291 p. (in Russian) [Карасев А.П., Птицын А.Б., Юдицких Е.Ю. Быстрые переходные процессы вызванной поляризации. Новосибирск: Наука, 2005. 291 с.].

Kelbert A., Meqbel N.M., Egbert G.D., Tandon K., 2014. ModEM: A Modular System for Inversion of Electromagnetic Geophysical Data. Computers & Geosciences. 66, 40–53. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.010.

Kitaenko A.E., 2016. Black Shales: Ore Genesis, Genesis, Geodynamic Settings of Formation. Akademkniga, Moscow, 148 p. (in Russian) [Китаенко А.Э. Черные сланцы: рудогенез, генезис, геодинамические обстановки формирования. Москва: Академкнига, 2016. 148. с.].

Komarov V.A., 1980. Geoelectric Prospecting by the Method of Induced Polarization. Nedra, Leningrad, 391 p. (in Russian) [Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980. 391 с.].

Kormiltsev V.V., Semenov V.D., 1987. Geoelectric Prospecting by the Excitation-at-the-Mass Method. Nedra, Moscow, 218 p. (in Russian) [Кормильцев В.В., Семенов В.Д. Электроразведка методом заряда. М.: Недра, 1987. 218 с.].

Kozhevnikov N.O., 2012. Fast-Decaying Inductive IP in Frozen Ground. Russan Geology and Geophysics 53 (4), 406–415. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.02.013.

Kozhevnikov N.O., Nikiforov S.P., Snopkov S.V., 1995. Investigation of Fast Processes of Induced Polarization in

Frozen Rocks. Geoecology 2, 118–126 (in Russian) [Кожевников Н.О., Никифоров С.П., Снопков С.В. Исследование быстропротекающих процессов вызванной поляризации в мерзлых породах // Геоэкология. 1995. № 2. С. 118–126].

Kulikov A.V., Shemyakin E.A., 1978. Geoelectric Prospecting by the Induced Polarization Phase Method. Nedra, Moscow, 175 p. (in Russian) [Куликов А.В., Шемякин Е.А. Электроразведка фазовым методом вызванной поляризации. М.: Недра, 1978. 175 с.].

Olenchenko V.V., 2002. Investigation of the Information Content of the Method of the Early Stage of Induced Polarization in Solving Problems of Geocryology: PhD Thesis (Candidate of Geological and Mineralogical Sciences). Tomsk, 211 p. (in Russian) [Оленченко В.В. Изучение информативности метода ранней стадии вызванной поляризации (РСВП) при решении задач геокриологии: Дис. … канд. геол.-мин. наук. Томск, 2002. 211 с.].

Seigel H.O., 1959. Mathematical Formulation and Type Curves for Induced Polarization. Geophysics 24 (3), 547–565. https://doi.org/10.1190/1.1438625.

Zorin N., Ageev D., 2017. Electrical Properties of Two-Component Mixtures and Their Application to High-Frequency IP Exploration of Permafrost. Near Surface Geophysics 15 (6), 603–613. https://doi.org/10.3997/1873-0604.2017043.