

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Л.А. Христенко

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Качественная интерпретация полевых электроразведочных наблюдений методами симметричного электропрофилирования и естественного поля на участке, расположенном в пределах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей, позволила выявить аномальные зоны, связанные с вертикальными перетоками по ослабленным зонам дезинтегрированных пород. Использование метода построения аналитических моделей геопотенциальных полей, базирующегося на выявлении сингулярностей анализируемого поля (в данном случае естественного поля) с использованием быстрого вейвлет-преобразования и последующей истокообразной аппроксимации выделенных компонент подтвердило результаты. А эвристический метод безэталонной классификации (в приведенном примере это метод общего расстояния), кроме того, помог локализовать узкие близповерхностные зоны разгрузки. На примере показано, что комплексное использование различных методов интерпретации существенно повышает информативность и достоверность выделения областей инженерно-геологических осложнений природного или техногенного происхождения.

Ключевые слова: кажущееся сопротивление, потенциал естественного поля, комплексная интерпретация.

Электроразведочные методы исследований, в частности сопротивлений и естественного электрического поля, позволяют выделять зоны различного водонасыщения грунтов, определять направление движения подземных вод, выявлять пути сосредоточенной фильтрации и др. Предпосылки и теоретические основы решения перечисленных задач общеизвестны [4, 8, 12] и положены в основу интерпретации получаемых результатов. При однородности литологического строения участка исследований, например, увеличение обводненности грунтов отражается уменьшением электрического сопротивления. По направлению увеличения определяется направление движения подземных вод в латеральном направлении, а сосредоточенные участки фильтрации локализуются по зонам наибольшего увеличения градиента потенциалов. Локальные аномалии потенциалов положительного знака связаны с зонами разгрузки подземных вод, а аномалии потенциалов отрицательного знака – с зонами поглощения.

Техногенные факторы, также влияющие на изменение электрических свойств породного массива, накладываются на природные явления. Разгруппировать аномалии природного и техногенного происхождения электрического поля очень трудно. Поэтому при интерпретации на изучаемых участках первоначально выделяются все аномалии электрических параметров, а комплексный анализ различных методов исследований позволяет выявить связь выделенных аномальных зон с возможными причинами.

Электроразведочные работы в пределах Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) проводились методами симметричного электропрофилирования (СЭП) и естественного электрического поля (ЕП) с целью изучения гидрогеологической обстановки. Наблюдения выполнялись по 8 профилям с шагом 10 м. Разнос питающей линии АВ при наблюдениях СЭП составлял 110 м, размер приемной линии MN для обоих используемых методов 10 м. Наблюдения естественного поля из-за наличия помех проводились способом градиента.

По результатам качественного анализа на профиле № 1 (рис. 1) наблюдается изменение потенциала ЕП от -30 до -85 мВ. Направление увеличения его соответствует

общему направлению движения грунтовых вод на восток в сторону основной водной артерии (р. Кама). Наиболее пониженные значения потенциала отмечаются между пикетами 280÷320. Между естественным полем и рельефом существует обратная корреляционная связь.

Амплитуда изменения значений кажущегося сопротивления (КС) вдоль профиля от первых десятков до 90 Ом·м. График КС осложнен локальными аномалиями, амплитуда которых изменяется от 50 до 90 Ом·м. Вызваны они, вероятно, границами локальных неоднородностей в верхней части разреза.

На профиле № 2 (рис. 1) между пикетами 0÷65 на графике потенциалов U_{EP} выделяется локальная аномалия интенсивностью до +110 мВ, которая хорошо коррелирует с аномалией на профиле № 7 (ПК 350) и соответствует пониженному участку рельефа. От пикета 70 амплитуда поля ЕП вновь возрастает, достигая на пикете 200 около 55 мВ.

Значения кажущегося сопротивления вдоль профиля изменяются от первых десятков до 80 Ом·м. График КС изрезан. Высоки вызваны близповерхностными неоднородностями в верхней части разреза.

На профиле № 4 (рис. 2а) на фоне общего понижения потенциала естественного поля вдоль профиля от -10 до -110 мВ выделяется целый ряд локальных аномалий, осложняющих график. Между пикетами 0÷500 размер локальных аномалий от 20÷40 м до 80÷100 м (ПК 250÷330, 350÷450), амплитуда изменения 25÷45 мВ. Локальные аномалии между пикетами 500÷870 имеют размеры от 40 до 70 м и характеризуются более высокой амплитудой изменения: от 60 мВ (ПК 500÷540) до 160 мВ (ПК 700÷770). Локальные аномалии относительного понижения потенциала могут быть вызваны вертикальными перетоками по ослабленным зонам. Кроме того, локальные аномалии коррелируют с интервалами пониженных значений кажущегося сопротивления между пикетами 550÷600 и 730÷770, отмечаемых на графике КС. Между естественным полем и рельефом существует обратная корреляционная связь (рис. 2б). Совокупность этих факторов подтверждает предположение о наличии ослабленных зон, связанных с дезинтеграцией пород.

Наблюдается незначительный рост амплитуды изменения графика значений КС от первых единиц до 30÷40 Ом·м вдоль профиля. График КС осложнен локальными аномалиями, вызванными литологическими неоднородностями в верхней части разреза.

На профиле № 5 (рис. 1) рост значений потенциала ЕП от +90 до +130 мВ отмечается на север-запад, к основной водной артерии. На графике можно выделить 2 локальные аномалии относительного понижения значений потенциала: между пикетами 10÷70 (до 110 мВ) и 90÷170 (слабоградиентная аномалия интенсивностью около +110 мВ). От пикета 180 до окончания профиля отмечается резкое понижение значений потенциала, коррелирующее с уменьшением сопротивления.

Значения кажущегося сопротивления вдоль профиля изменяются от первых единиц до 45 Ом·м. График КС осложнен локальными аномалиями вызванными, вероятно, границами локальных неоднородностей в верхней части разреза.

На профиле № 6 (рис. 1) наблюдается увеличение интенсивности естественного поля на северо-запад от -40 до +65 мВ, отвечающее общему направлению движения грунтовых вод. На фоне протяженной аномалии положительного знака между пикетами 800÷290 можно выделить 3 локальные аномалии относительного понижения значений потенциала (ПК 800-650; 600÷450 и 440÷330). Между пикетами 190÷0 наблюдаются отрицательные значения потенциала. Между естественным полем и рельефом существует обратная корреляционная связь. Амплитуда графика кажущегося

гося сопротивления в среднем по профилю изменяется в пределах $50 \div 70$ Ом·м. График осложнен резкими скачками амплитуды КС, которые могут быть вызваны границами локальных неоднородностей, зон трещиноватости и другими геологическими факторами.

На профиле № 7 (рис. 2а) протяженная аномалия положительного знака интенсивностью до 190 мВ наблюдается между пикетами $460 \div 20$ (рис. 3). В ее пределах можно выделить две локальные аномалии относительного понижения значений потенциала (ПК $230 \div 170$ и $110 \div 50$). Учитывая северо-восточное простирание профиля, которое перпендикулярно общему направлению движения грунтовых вод в сторону основной водной артерии, осложняющие локальные аномалии могут быть вызваны вертикальными перетоками по ослабленным зонам. Кроме того, локальные аномалии коррелируют с интервалами пониженных значений кажущегося сопротивления, отмечаемых на графике КС. Амплитуда изменения кажущегося сопротивления вдоль профиля составляет $30 \div 70$ Ом·м. График КС осложнен рядом мелких локальных аномалий, вызванных в основном геологическими неоднородностями, характерными для малых глубин. Границы протяженной аномалии естественного поля между пикетами $460 \div 20$ не отражаются на графике изменения КС. Очевидно, что аномалия ЕП связана с более глубокими геологическими факторами.

На профиле № 8 (рис. 1) на графике $U_{ЕП}$ выделяются: протяженная аномалия отрицательного знака между пикетами $50 \div 230$, амплитуда ее достигает 45 мВ, и две мелкие локальные аномалии между пикетами $20 \div 50$, $230 \div 280$ амплитудой около 30 и 35 мВ, соответственно. Значения кажущегося сопротивления вдоль профиля изменяются от 10 до 50 Ом·м. График КС осложнен рядом мелких локальных аномалий, вызванных геологическими неоднородностями характерными для малых глубин. Амплитуда изменения локальных аномалий составляет около 30 Ом·м. В целом они коррелируют с выделенными на графике $U_{ЕП}$ аномалиями понижений потенциала.

На профиле № 9 (рис. 1) наблюдается изменение потенциала ЕП от -15 до -140 мВ. Направление увеличения соответствует общему направлению движения грунтовых вод. График потенциала осложнен локальными аномалиями, различными по размеру и амплитуде. Между пикетами $90 \div 270$ размер локальных аномалий составляет в среднем около 40 м, максимальная амплитуда достигает 80 мВ. Между пикетами $270 \div 670$ размер локальных аномалий составляет $60 \div 110$ м, максимальная амплитуда около 140 мВ. Отмечается прямая корреляционная связь графика изменения потенциала естественного поля с рельефом.

График изменения значений кажущегося сопротивления имеет изрезанный характер: на фоне $20 \div 30$ Ом·м на 20 метрах скачок амплитуды КС может достигать 120 Ом·м (ПК 380, 450, 520).

Значения потенциалов естественного поля по профилям были обработаны с помощью метода построения аналитических моделей геопотенциальных полей, базирующегося на выявлении сингулярностей анализируемого поля с использованием быстрого вейвлет-преобразования и последующей истокообразной аппроксимации выделенных компонент [1-3].

Взаимосвязь вейвлет-спектра с наблюдаемыми значениями (на основе преобразования с вейвлетом известной формы) позволяет рассматривать спектр вейвлет-коэффициентов, как эквивалентное распределение источников поля ниже поверхности наблюдений. При этом ось масштабов перекодируется в ось эффективных значений глубины $H_{эфф}$, а спектр представляется в виде псевдоразреза с локализацией аномалий по простиранию (вдоль оси абсцисс OX) и по вертикали (вдоль оси

эффективных глубин $OH_{эфф}$). Ни в коем случае не должно возникать заблуждение, что эффективная глубина $H_{эфф}$ полностью соответствуют истинной глубине залегания реальных возмущающих тел $H_{ист}$. Такая форма представления является удобной при интерпретации спектра. Эффективная глубина в данном случае имеет смысл меры, которая позволяет производить ранжирование аномалий вейвлет-спектра и дает возможность сформировать представление об аномалиеобразующих объектах на основе оценки эффективных параметров сингулярных источников. Шкала эффективных глубин построена на основе соотношения между масштабом вейвлета DOG2 (Difference of Gaussians) и глубиной залегания точечной массы. Вейвлет DOG2 представляет собой вторую производную функции плотности распределения Гаусса.

На рис. 2в и 3в в качестве примера приводятся полученные в результате использования метода построения аналитических моделей эквивалентные распределения источников поля (программная реализация А.В. Пугина) вдоль профилей № 4 и № 7.

Эквивалентное распределение источников поля для значений, полученных на профиле № 4 (рис. 2в), не противоречит полученным в результате качественного анализа представлением о разрезе, т.е. естественное поле обусловлено разноглубинными (от близповерхностных до 5÷10 м) источниками, а в интервале между пикетами 500÷870 сказывается повышение рельефа.

Полученный вейвлет-спектр эквивалентного распределения источников поля ниже поверхности наблюдений вдоль профиля № 7 (рис. 3в) так же не противоречит полученным в результате качественного анализа представлением о разрезе. Аномалия естественного поля, выявленная между пикетами 460÷100, обусловлена источником, находящимся на глубине около 60 м, что соответствует результату ее количественной оценки. Остальные локальные аномалии, описанные выше, вызваны приповерхностными фильтрационными процессами и процессами на небольших (до 10 м) глубинах.

Использование процедур безэталонных классификаций объединенных признаков пространств, включающих статистические характеристики исследуемых признаков, позволяет разбить анализируемые совокупности на однородные по формальным математическим критериям классы, пространственно отвечающие различным условиям (гидрогеологической обстановки или инженерно-геологических осложнений). Основанием этому служит то, что практически любые данные, получаемые в результате геолого-геофизических исследований, можно считать выборкой одной или нескольких случайных величин, что позволяет с помощью аппарата теории оценок анализировать их статистические характеристики. Такой анализ существенно увеличивает для исследователя объем полезной информации, которая содержится в полученных данных и в конечном итоге позволяет существенно повысить эффективность процесса геологической интерпретации и в целом качество конечных результатов [5, 6].

На исследуемом участке были использованы эвристические методы классификации, реализованные в комплексе спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3D». Методы основаны на разбиении диапазона значений каждого признака на заданное число градаций и в большинстве своем сводятся к расчету комплексного параметра, который является линейной комбинацией соответствующего номера интервала градации по совокупности анализируемых признаков в каждой точке наблюдений [9].

Чтобы выделить зоны возможных инженерно-геологических осложнений по единым критериям, целесообразно было выполнить классификацию общего признако-

вого пространства всех 8 профилей. Для этого значения потенциалов ЕП и кажущихся сопротивлений (КС) интерполировались в узлы регулярной сети. Для полученных интерполированных значений в скользящем «окне» так же программным комплексом «КОСКАД-3D» рассчитывались статистические характеристики (среднее, дисперсия, асимметрия, эксцесс, коэффициент вариации). Рассчитанные характеристики электрических параметров объединялись в многопризнаковое пространство, структура которого анализировалась с помощью методов безэталонной классификации [7].

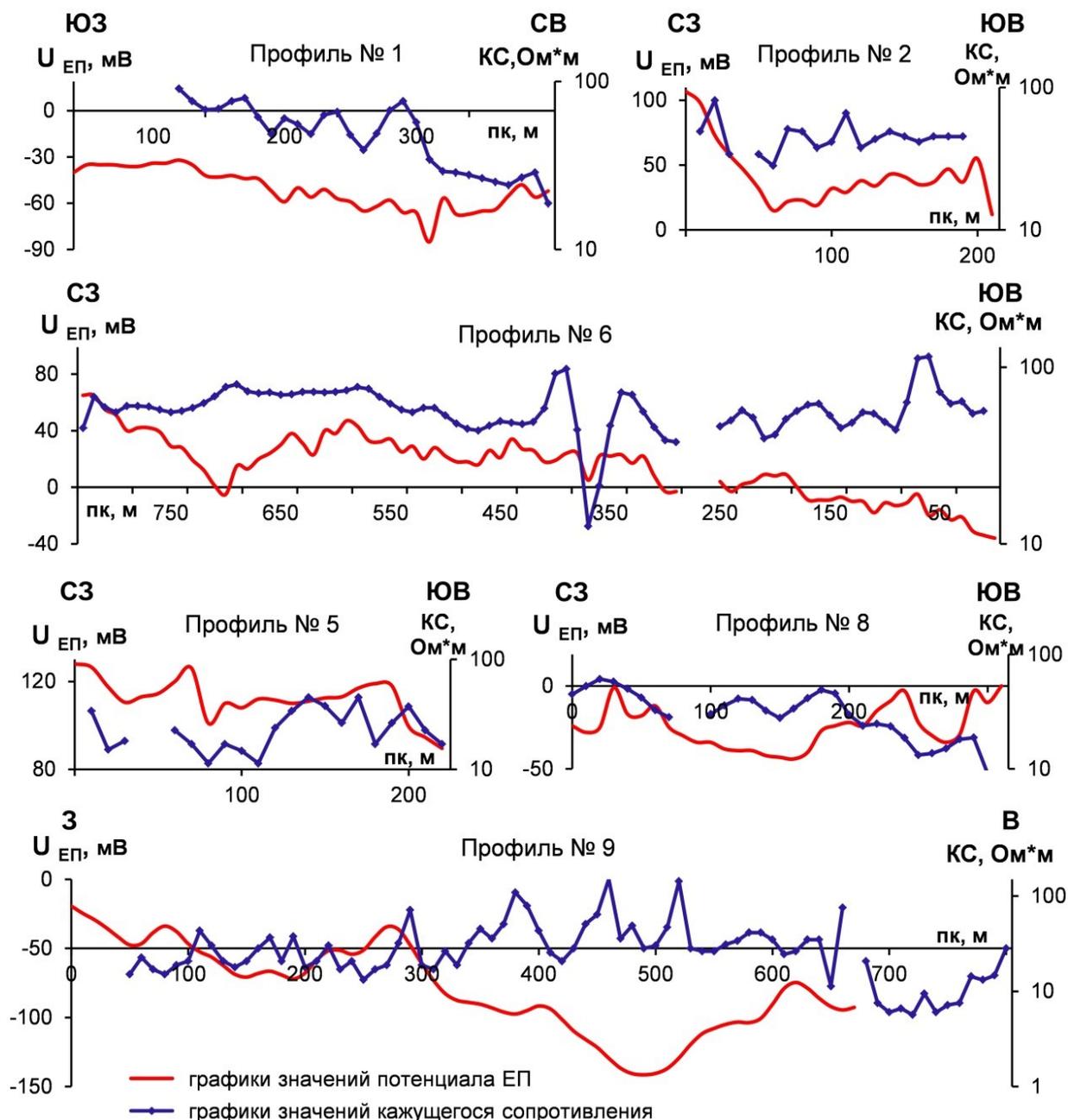


Рис. 1. Графики значений потенциала естественного поля и кажущегося сопротивления

Процедуры таких расчетов неоднократно выполнялись автором на различных участках ВКМКС, а полученные результаты приводились в публикациях [10, 11,13].

Результаты, полученные с помощью классификации методом общего расстояния на участке исследований, позволили локализовать ряд участков, пространственно попадающих в однородные по комплексу признаков области, предположительно связанные с инженерно-геологическими осложнениями (рис. 4).

Содержательные контуры классов на профиле № 4 получены между пикетами 130-250 и 730-870. При качественном анализе графика КС и результатам эквивалентного распределения источников поля основное внимание сосредоточилось на интервале между ПК 500÷870 (рис. 2). Детальный анализ графиков после использования классификационных процедур показал, что между ПК 130-250 контуры классов пространственно совпадают с узколокализованными интервалами пониженных значений потенциалов естественного поля и кажущихся сопротивлений, вероятно, отвечающими вертикальным перетокам грунтовых вод по ослабленным зонам дезинтегрированных пород.

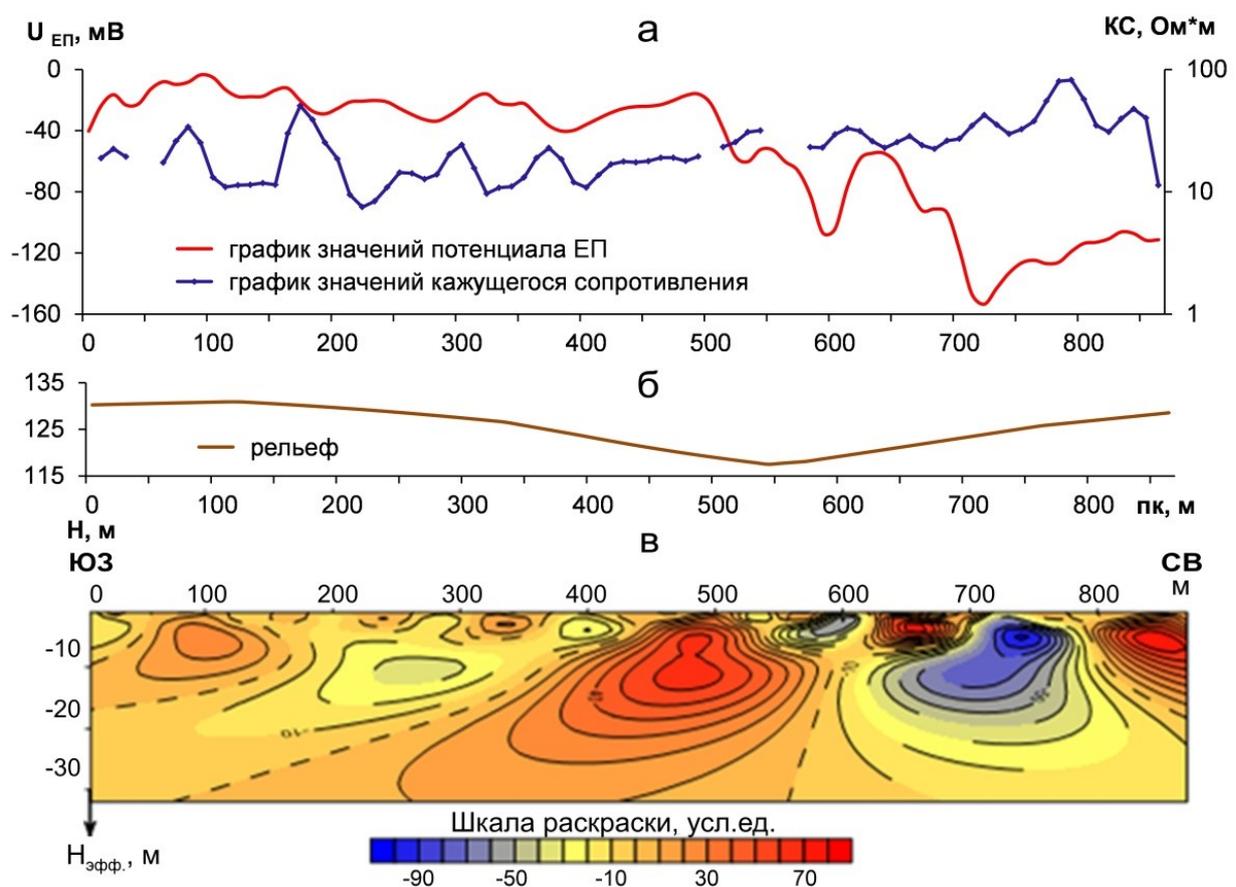


Рис. 2. Графики значений потенциала естественного поля и кажущегося сопротивления (а), рельеф (б) и эквивалентное распределение источников поля (в). Профиль № 4

На профиле № 7 контуры классов между пикетами 150-350 пространственно совпадают с интервалами пониженных значений КС и повышенных значений потенциалов ЕП, которые вероятнее всего характеризуют близповерхностные зоны разгрузки.

Полученное в результате использования метода построения аналитических моделей эквивалентное распределение источников поля вдоль профиля указало лишь на источник поля, глубина которого составляет около 60 м. Мелкие локальные аномалии от источников, группирующихся в верхней части разреза, в том числе и между пикетами 150-350, не нашли подтверждения в эквивалентном распределении.

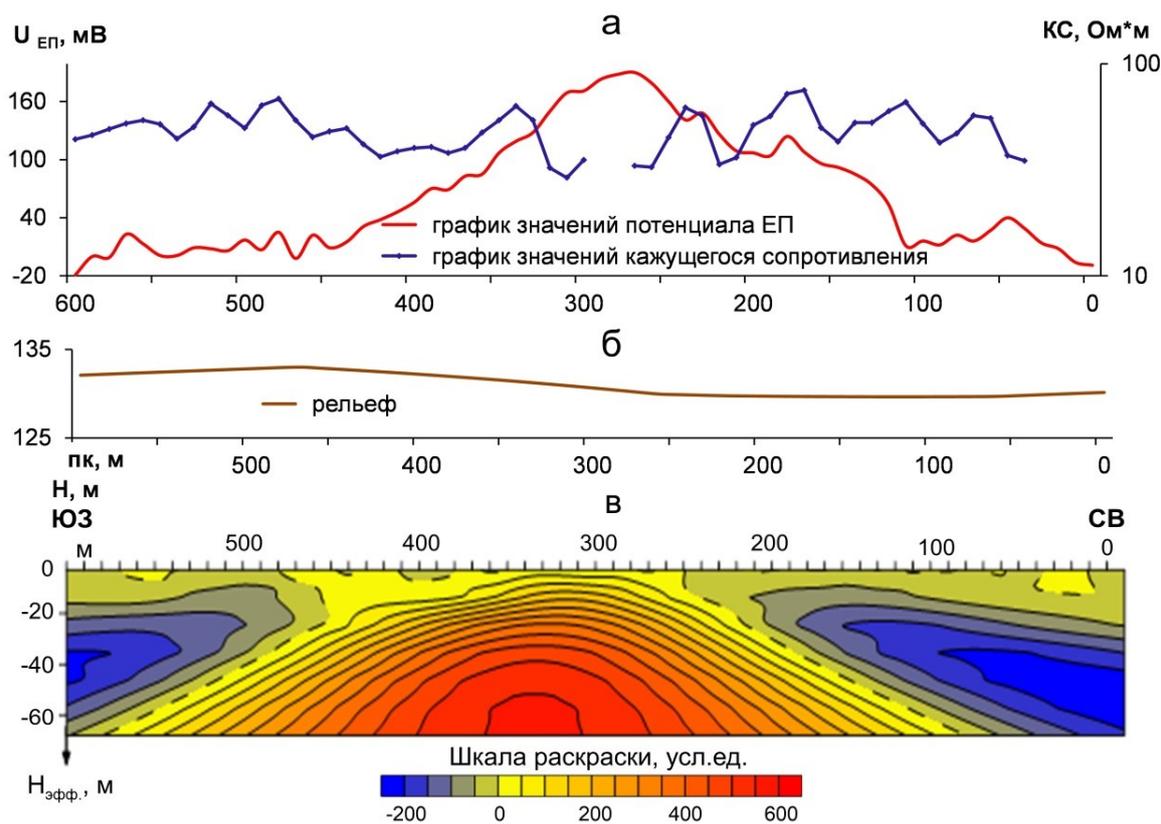


Рис. 3. Графики значений потенциала естественного поля и кажущегося сопротивления (а), рельеф (б) и эквивалентное распределение источников поля (в). Профиль № 7

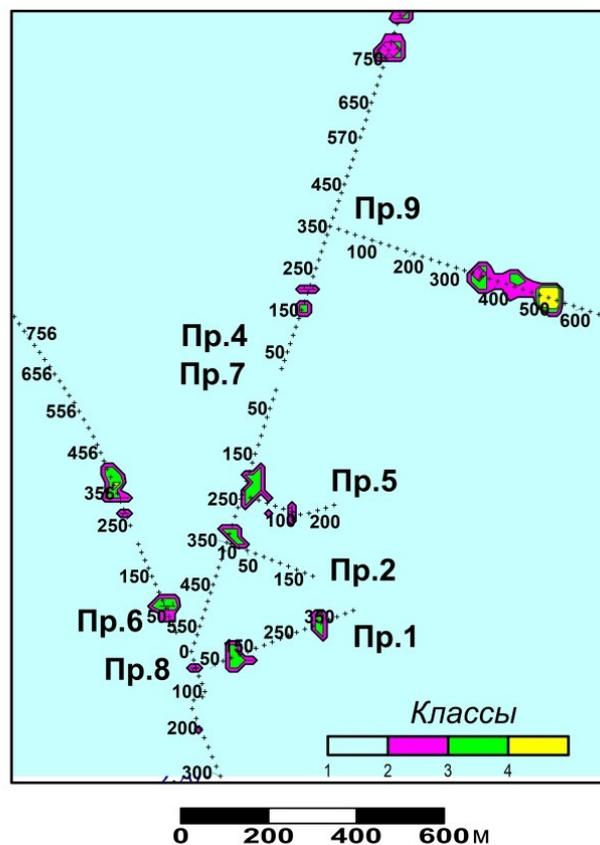


Рис. 4. Результаты классификации методом общего расстояния

При визуальном качественном анализе результатов наблюдений методами СЭП и ЕП трудно избежать субъективности в интерпретации. Использование комплекса различных методов интерпретации существенно повышает достоверность и информативность геологической интерпретации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000398-0).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балк П.И., Долгаль А.С., Пугин А.В., Мичурин А.В., Симанов А.А., Шархимуллин А.Ф. Эффективные алгоритмы истокообразной аппроксимации геопотенциальных полей // Физика Земли. – 2016. – № 6. – С. 112-128.
2. Долгаль А.С., Пугин А.В. Построение аналитических аппроксимаций геопотенциальных полей с учетом их фрактальной структуры // Доклады РАН. – 2006. – Т. 410, № 7. – С. 1152-1155.
3. Долгаль А.С., Симанов А.А. Применение кратномасштабного вейвлет-анализа при аналитических аппроксимациях геопотенциальных полей // Докл. Акад. наук. – 2008. – Т. 418, № 2. – С. 256-261.
4. Матвеев Б.К. Электроразведка. – М.: Недра, 1990. – 368 с.: ил.
5. Никитин А.А. Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М.: ФГУП ГНЦ РФ «ВНИИГЕОСИСТЕМ», 2017. –
6. Петров А.В. Адаптивные процедуры интерпретационной обработки нестационарных геополей в компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ): материалы Междунар. науч.-практ. конф. в 7 т. – М., 2018. – С. 25-27.
7. Петров А.В., Юдин Д.Б., Хоу Сюели. Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2010. – № 2, Вып.16. – С. 126-132.
8. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – Л. Недра, 1980. – 446 с.: ил.
9. Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации – КОСКАД 3D // Геофизика. – 2000. – № 4. – С. 29-33.
10. Христенко Л.А. Метод редких сочетаний при выделении зон инженерно-геологических осложнений по электроразведочным данным // Горное эхо. – 2021. – № 2 (83). – С. 64-69. – DOI: 10.7242/echo.2021.2.13.
11. Христенко Л.А., Степанов Ю.И. Электрометрические наблюдения при оценке влияния выработанного пространства недр на основание железнодорожной насыпи // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7. – С. 58-62.
12. Электроразведка: Справ. Геофизика. в 2 кн. / под ред. В.К. Хмелевского, В.М. Бондаренко. – М.: Недра, 1989.
13. Hristenko L., Stepanov Yu., Kichigin A., Parshakov E., Tainitsky A. Interpretation of electroprospecting monitoring observations with use of probabilistic-statistical characteristics // Engineering and mining Geophysics 2018: 14th Conference & Exhibition, 23-27 april 2018. – Almaty, 2018. – code 137600. DOI: 10.3997/2214-4609.201800511.