

## Опыт применения электроразведочных методов для оценки экологической безопасности строительства ветроэнергетических установок в Восточном Донбассе

*Н.Е. Фоменко<sup>1</sup>, А.К. Удовиков<sup>2</sup>, И.Н. Манаенков<sup>2</sup>, Л.Н. Фоменко<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

*<sup>2</sup>ООО «ДонГИС», Ростов-на-Дону*

*<sup>3</sup>Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В статье освещаются результаты комплексных геофизических исследований для оценки экологической безопасности строительства башенных ветроэнергетических установок с целью предотвращения их проектирования и строительства в техногенно - и тектонически нарушенных зонах на территориях горных отводов закрытых шахт в Восточном Донбассе. Показано решение инженерно-геологических задач по выявлению в консолидированных скальных породах угленосных отложений зон развития тектонических разрывных нарушений и участков, подработанных угольными шахтами. Приводится краткая сущность электроразведочных технологий пространственной электрической фильтрации (МПЭФ) и электропотенциального томографического зондирования (ЭПТЗ). Подчеркивается целесообразность применения этих технологий для выявления неблагоприятных для строительства инженерно-геологических условий совместно со стандартными геофизическими методами электроразведки ВЭЗ (вертикальное электрическое зондирование) и сейсморазведки МПВ (метод преломленных волн). Обсуждаются результаты интерпретации полученных в полевых условиях данных.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность строительства, ветроэнергетические установки, угленосная толща, горные выработки, подработанные территории, тектонические разрывные нарушения, комплекс геофизических исследований, электроразведочные и сейсморазведочные методы, интерпретация геофизических материалов.

### Введение

Ветровой и солнечной энергетике придают большое значение в зарубежных странах, в частности, в Норвегии, Китае и др. [1-3]. В России, несмотря на наличие мощных гидро-, атомных и теплоэлектростанций, в регионах благоприятных метеоусловий эта отрасль так же получает развитие [4,5]. В число перспективных территорий включены Ростовская и сопредельные области, поскольку среднегодовая скорость ветра здесь более четырех метров в секунду, а на высоте типовых башенных ветроэнергетических установок (ВЭУ) высотой 90 метров господствующие ветра дуют со скоростью вдвое больше минимально необходимой [6,7]. Для

---

проектирования оснований фундаментов этих массивных технических конструкций в системе инженерно-геологических изысканий предусматривается проведение геофизических исследований. Это в первую очередь методы электро-, сейсмо- и георадарного зондирования [8,9]. Их применение востребовано на территории Восточного Донбасса, где геологический разрез в верхней части представлен коренными (скальными) породами угленосной толщи (степень эпигенетического преобразования соответствует углям марки А4-А5). В то же время, на этих территориях с породами высокой крепости в массивах угленосных пород имеются экологически опасные для строительства участки, где развиты тектонические разрывные нарушения, имеются места просадок над горными выработками шахт, другие неблагоприятные геоэкологические условия для строительства промышленных и гражданских сооружений [10]. Поэтому стоит задача выполнять параллельно с бурением площадные геофизические наблюдения, характеризующиеся объемным характером исследований [11,12].

Цель настоящей работы – показать информативность электроразведочных методов для экологической оценки проектирования и строительства ВЭУ посредством выявления в угленосной толще геологических (тектонические нарушения) и техногенных (горные выработки) неоднородностей..

Основные задачи инженерно-геофизических исследований:

- изучение инженерно-геологического разреза на глубину до 20 м в местах сооружений ВЭУ;
- выявление в угленосных отложениях тектонических разрывных нарушений, а также зон возможных подземных пустот (горные выработки, карсты и т. д.).

Объектом исследований являлась верхняя часть геологического разреза территории проектирования ВЭУ в Гуковском районе Ростовской области. Обзорная карта района инженерных изысканий приведена на рисунке 1.

Геолого-литологический разрез территории до исследованной глубины 20 м с поверхности представлен почвенно-растительным слоем мощностью 0,1-0,6 м, и нижележащей толщей высокопреобразованных угленосных отложений среднего отдела каменноугольной системы (терригенная толща из чередования песчаников, алевролитов и аргиллитов с подчиненным значением пластов углей (антрацитов) и известняков).

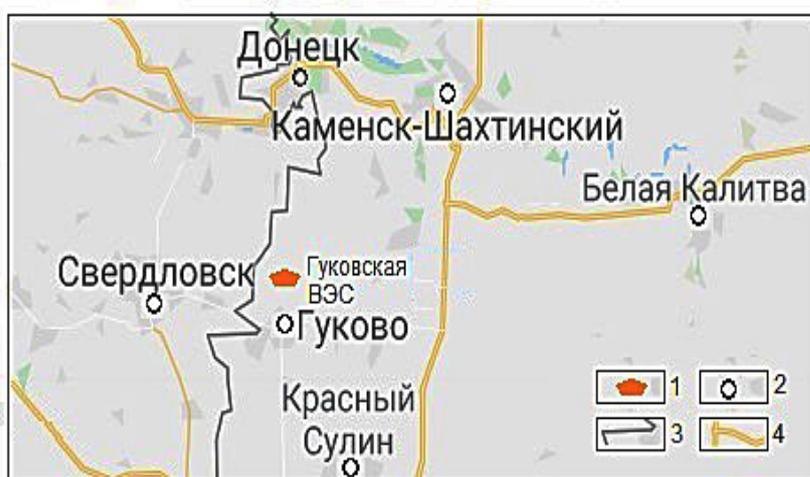


Рис. 1. - Обзорная карта места расположения ветроэнергетической станции в Гуковском районе Ростовской области  
1 – участок ВЭС,  
2 – муниципальные города,  
3 – граница РФ,  
4 – автотрассы

Основным тектоническим нарушением вблизи (на расстоянии первых километров) участка проектирования ВЭУ находится косо секущий угленосную толщу «Главный Гуковский надвиг», сопровождаемый серией ортогональных к простираению малоамплитудных сбросов. Разрывные тектонические нарушения в постинверсионный этап развития бассейна консолидировались и не относятся к активным разломам [13].

По гидрогеологическим условиям площадь инженерных изысканий находится на территории водоносных комплексов каменноугольных отложений с сульфато-хлоридным составом воды в водопунктах. Район не относится к водообильным.

## Методика работ

Комплекс геофизических методов изучения верхней части геологического разреза на участке проектирования установок ВЭУ включал технологии пространственной электрической фильтрации (МПЭФ) и электропотенциального томографического зондирования (ЭПТЗ). Другими методами являлись вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ).

Технология МПЭФ основана на согласовании первичного электрического поля с геологической средой таким образом, чтобы аномалии от одних объектов усиливались, а от других ослаблялись [12]. Электропрофилирование производилось в варианте фильтра направленного возбуждения (ФНВ) (рис. 2). Длина питающих линий  $AB$  равнялась 300 м с их расстановкой по азимутам  $0^\circ$  и  $40^\circ$ . Размер измерительной линии  $MN$  составлял 8 м. Шаг перемещения был равен 4 м. Запись регистрируемых сигналов осуществлялась в режиме реального времени в переносной персональный компьютер ноутбук, в котором с помощью программы «Excel» автоматически строились кривые электропрофилирования. Это позволяло осуществлять оперативный контроль и качество результатов наблюдений.

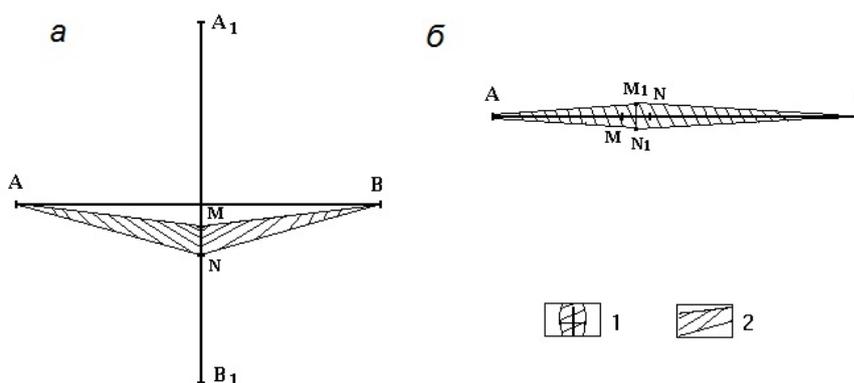


Рис. 2. - Схемы объемных электроразведочных фильтров направленного возбуждения (а) и направленного приема (б)  
 $AB$ ,  $MN$  - питающие и измерительные линии, 1,2 - секторы сканирования при направленном приеме и возбуждении электрического поля

Сущность ЭПТЗ в вариативности питающих и измерительных электроразведочных установок при работе на пересечённой местности и на ограниченных по площади объектах, что предопределяет экспрессное получение сведений не только об изменении исследуемого разреза на глубину, но и о наличии локальных неоднородностей вдоль заданных профилей [14]. Наблюдения производились 4-х электродными дипольными установками в ортогональном варианте. (рис. 3).

Длина питающей линии  $AB$  в установках ЭПТЗ, примененных на участке инженерных изысканий, составляла 40 м, а размер измерительной линии  $MN$  – 4 м. Линия  $MN$  перемещалась ортогонально питающей линии  $AB$  как от электрода  $A$ , так и от электрода  $B$ . Точки установки питающего электрода принимались за точку зондирования. Разносы между питающим электродом и центром измерительной линии производились с арифметическим шагом от 4-х до 80 м, что обеспечивало глубинность зондирования не мене 30-45 м. Осуществлялось 3-х кратное поинтервальное перекрытие по линии профиля посредством последовательной перестановки питающей линии на 20 м (первая точка  $AB$ , вторая  $A_1B_1$  и т.д., см. рис. 3).

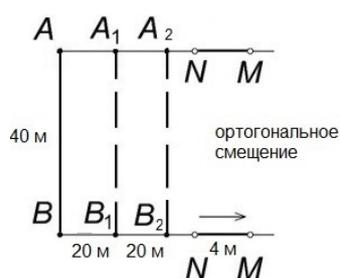


Рис. 3. - Схема наблюдений технологией ЭПТЗ

Для производства ВЭЗ использовалась четырех электродная симметричная установка Шлюмберже. Максимальный полуразнос питающей линии ( $AB/2$ ) равнялся 110 м. Длина приемной линии  $MN$  составляла 0,25 м. Точки наблюдения и направление разноса питающей линии выбирались на наиболее удобных участках местности в непосредственной близости к проектным точкам. Глубина исследования оценивалась в 30-35 м.

При полевых работах ЭПТЗ и ВЭЗ запись регистрируемых сигналов, как и при исследованиях методом МПЭФ, осуществлялась в режиме реального времени в ноутбук, в котором с помощью программы Excel автоматически строились графики электропрофилирования и электротондирования. Это позволяло осуществлять оперативный контроль и оценивать качество получаемой информации.

Интерпретация полевых материалов электротондирования включала: определение типа кривых, построение вертикальных разрезов и графиков кажущегося удельного сопротивления  $\rho_k$ . Использовалась программа IPI-2Win с привлечением данных горнопроходческих работ. Производство всех электротондировочных исследований и их обработка выполнялись в соответствии с техническими требованиями РСН 64-87.

Сейсмоторазведочные работы проводились для оценки прочностных характеристик разреза, определения границы уровня грунтовых вол и с целью сейсмического микрорайонирования территории. При производстве полевых исследований выполнялись технические требования, изложенные в нормативном документе РСН 66-87. Обработка и последующая интерпретация сейсмоторазведочных материалов выполнялась в программах «Лакколит», «RadExPro», «ZONDST2D» и «AutoCAD».

### **Результаты работ и их обсуждение**

Результаты инженерно-геофизических работ в каждой точке проектной ВЭУ представлялись в форме картограмм. Картограммы включают: 1) результаты ВЭЗ с данными количественной интерпретации в программе IPI-2Win; 2) таблицы удельного электрического сопротивления (УЭС) грунтов, полученные установкой Веннера; 3) измеренные значения блуждающих токов (БТ); 3) сейсмогеологический разрез, построенный в программе ZondST2D. Картограммы являлись первоначальным фактическим материалом, анализ которого совместно с априорными данными бурения и

---

горных работ позволял делать заключение об однородности и выдержанности геологического разреза в точках размещения ВЭУ. Участки, на которых предполагалось наличие в угленосном массиве тектонических и техногенных нарушений, подвергались дополнительным электроразведочным исследованиям ЭПТЗ и МПЭФ.

Картограмма для точки СЦ показана на рисунке 4.

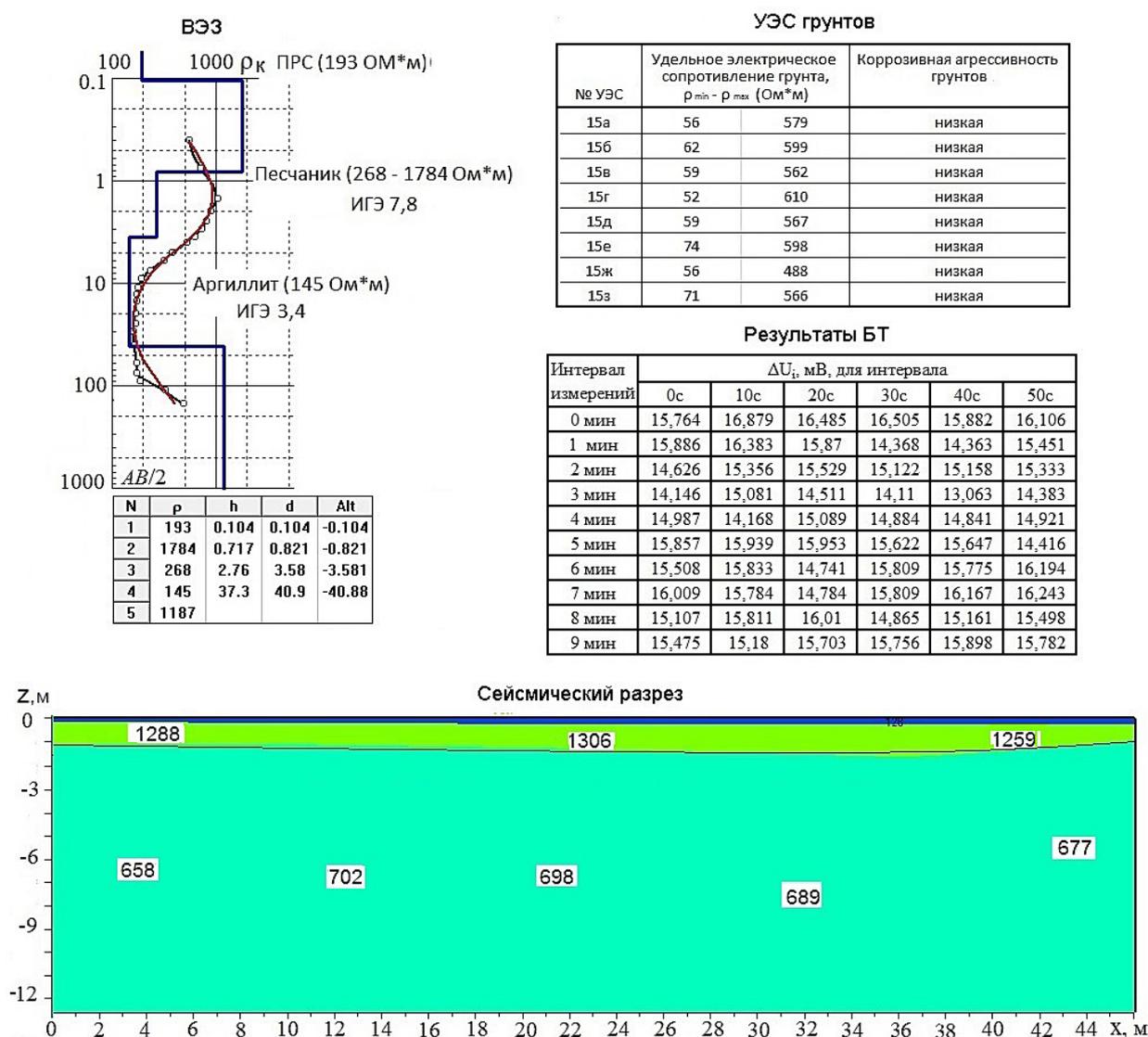


Рис. 4. Пример построения картограммы результатов геофизических работ на площадке проектирования ВЭУ в точке СЦ

В геологическом разрезе в самой верхней его части до глубины около 1 м залегает высокоомный пласт известняка (возможно песчаника), сменяемый

вниз по разрезу сорокаметровой алевролитово-аргиллитовой толщей. Сейсмический разрез построен с учетом данных ВЭЗ и бурения и является инверсным. Скорости поперечных волн нижнего горизонта получены расчетным путем по показателю  $E_{\text{деф}}$  (модуль деформации). Первичная оценка данных ВЭЗ и сейсморазведки свидетельствуют о не характерном строении разреза по сравнению с соседними площадками ВЭУ. Это послужило основой проведения дополнительных исследований.

Схема проведенных дополнительных исследований на площадке СЦ приведена на рисунке 5.

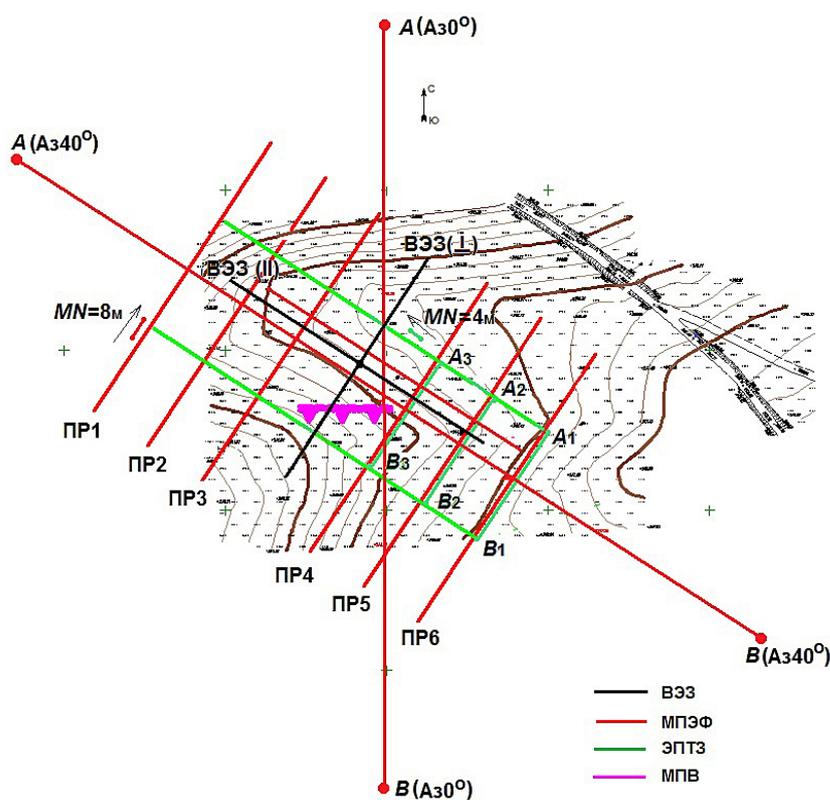


Рис. 5. Схема электроразведочных работ методами ВЭЗ, МПЭФ и ЭПТЗ на площадке проектирования ВЭУ в точке СЦ

В методе ЭПТЗ профили перемещения измерительных линий  $MN$  от питающих электродов  $A$  и  $B$  ориентировались по простиранию пород, а профили МПЭФ размечались вкрест простирания пород. В проектной точке ВЭУ выполнено крестовое ВЭЗ. Результаты ВЭЗ и ЭПТЗ приведены на рисунке 6.

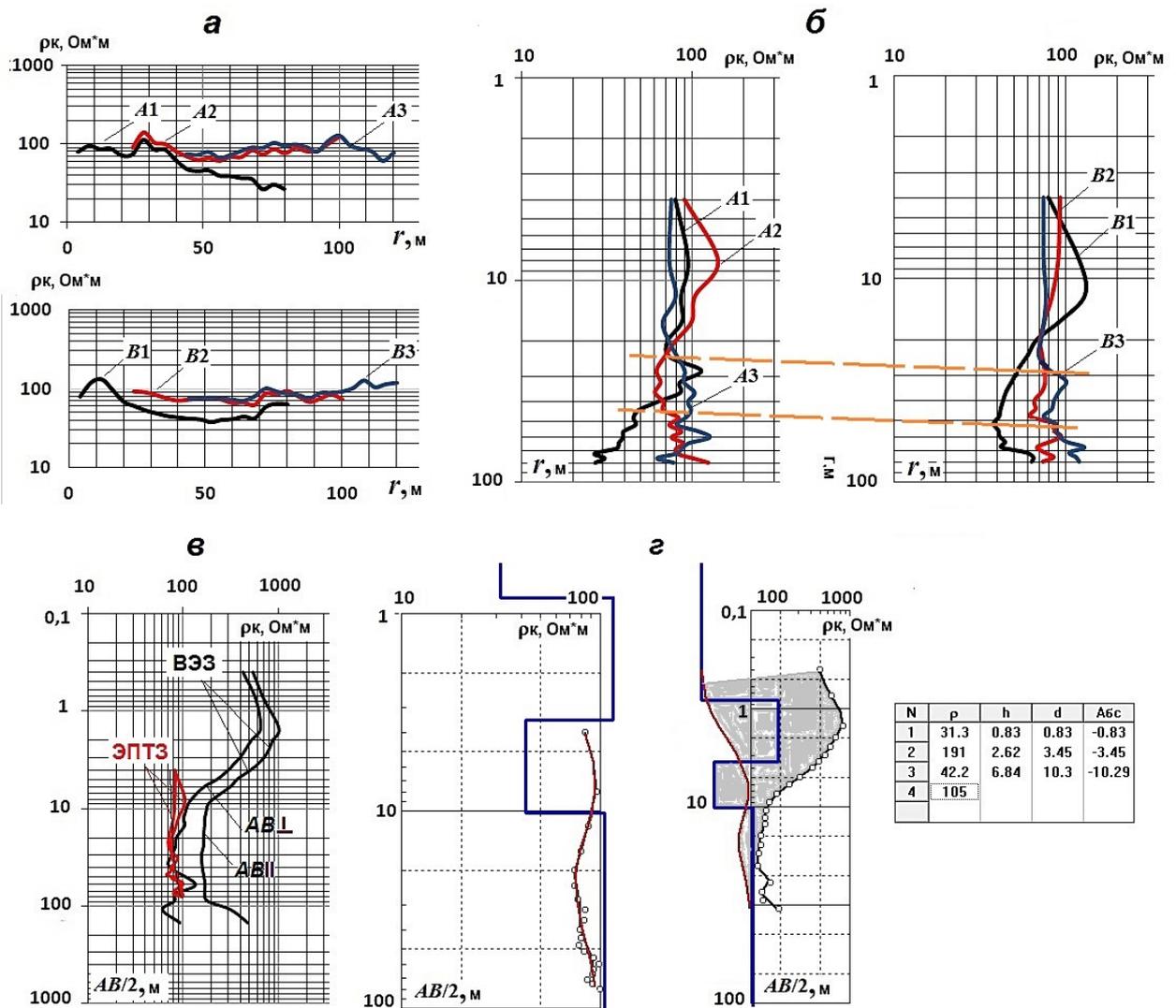


Рис. 6. Результаты электроразведочных работ ВЭЗ и ЭПТЗ на площадке проектирования ВЭУ в точке СЦ:

*a, б* – сопоставление кривых ЭПТЗ в форме электропрофилирования и электроразведочного; *в* – кривые крестового ВЭЗ и электроразведочного ЭПТЗ для питающих установок  $A_1B_1$  и  $A_2B_2$ ; *г* – количественная интерпретация стартовой кривой ЭПТЗ в ненарушенной угленосной толще и кривой ВЭЗ в тектонически нарушенной среде

Сопоставление кривых ЭПТЗ (кривых кажущегося сопротивления  $\rho_k$ ) в режимах электропрофилирования (арифметический масштаб разносов на рис. *ба*) и электроразведочного (логарифмический масштаб разносов на рис. *бб*) показывает, что форма кривых  $\rho_k$  от точек питающей линии  $A_1B_1$  отличается по форме и амплитуде от кривых  $\rho_k$  в точках линий  $A_2B_2$  и  $A_3B_3$ . Это является

диагностическим признаком нарушения флишевых отложений угленосной толщи. При этом следует отметить, что кривые  $\rho_k$ , совмещенные в соответствии с шагом перестановки питающих линий  $A_2B_2$  и  $A_3B_3$ , повторяют друг друга по форме и это свидетельствует об имеющей место литологической неоднородности угленосной толщи вдоль простирания пластов.

При сопоставлении кривых  $\rho_k$  в точках  $A_2, A_3$  и  $B_2, B_3$ , построенных в варианте электрозондирования, совпадения кривых  $\rho_k$  не происходит, что обусловлено отличием в строении геологических разрезов по линии вкрест падения пластов. В то же время, при сопоставлении кривых  $\rho_k$  от точек, расположенных по отношению друг к другу по линии простирания (между точками  $A_2-B_2$  и  $A_3-B_3$ ) корреляция прослеживается (см. рис. 6б).

На рисунке 6в сопоставлены кривые крестового ВЭЗ и осредненные кривые ЭПТЗ для точек  $A_2, A_3$  и  $B_2, B_3$ . Сопоставление показывает, что с глубины около 1 м (полуразносы  $AB/2 = 8 \div 10$  м в методе ВЭЗ и  $r = 4 \div 5$  м в методе ЭПТЗ) геоэлектрический разрез на охваченной электроразведочными исследованиями территории является квазиоднородным по удельному электрическому сопротивлению и, в соответствии с данными бурения, представлен толщей алевролита-аргиллитовых пластов. Самая верхняя часть разреза в точке ВЭЗ представлена маломощным (порядка 1 м) пластом с высоким ( $\rho \sim 1000$  Ом\*м) удельным сопротивлением. С большой степенью вероятности этот пласт является известняком, поскольку высокоомные пласты песчаников, как правило, имеют мощность более  $5 \div 10$  м. На рисунке 6в приведены результаты количественной интерпретации осредненной по точкам зондирования  $A_2, A_3$  и  $B_2, B_3$  кривой ЭПТЗ и сопоставление с ней осредненной кривой ВЭЗ. Нетрудно видеть, что в верхней части разрезы существенно различаются по выше указанной причине, а именно разным строением геологических разрезов по линии вкрест простирания пластов.

---

На основании вышеизложенного следует, что на участке размещения точек ЭПТЗ  $A_2, A_3, B_2, B_3$  и точки ВЭЗ существенных тектонических и техногенных нарушений в угленосном массиве не обнаруживается. Однако, этот вывод не относится к участку расположения точек  $A_1$  и  $B_1$ , т.е. к месту размещения питающей линии ЭПТЗ  $A_1B_1$ , где, как отмечалось выше, кривые ЭПТЗ отличаются по форме от кривых, полученных в точках  $A_2, A_3, B_2, B_3$ . Причину особенностей поведения кривых  $\rho_k$  в точках  $A_1, B_1$  находим путем анализа результатов МПЭФ.

План-графиков МПЭФ приведен на рисунке 7. На каждом графике сопоставлены кривые электропрофилирования, полученные по методу срединного градиента (СГ) при размещении питающей линии  $AB$  по азимутам  $0^\circ$  и  $40^\circ$ .

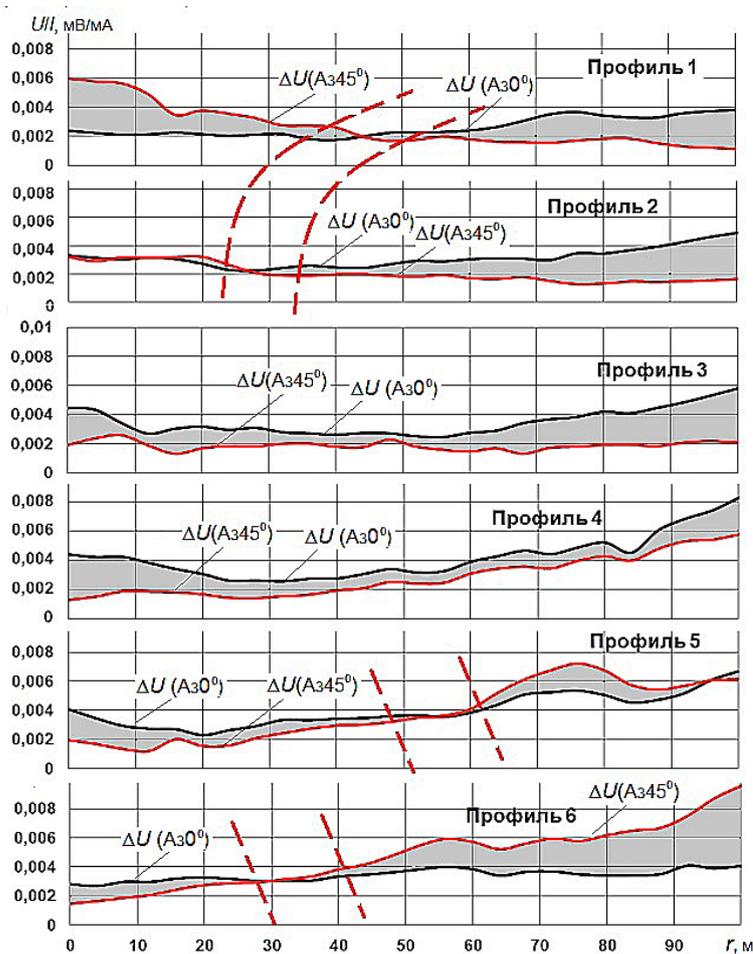


Рис. 7. План-графиков МПЭФ на площадке проектирования ВЭУ в точке СЦ

Результаты сопоставления показывают, что на профилях №3 и №4, между которыми размещена точка ВЭЗ, амплитудные значения напряженности электрического поля ( $\Delta U$ ) при фильтре возбуждения по простиранию пород ( $Az40^\circ$ ) более чем на два порядка ниже амплитудных значений при возбуждающем фильтре с азимутом  $0^\circ$ . При этом, эти кривые практически подобны по форме. Это соответствует физическим основам метода: силовые линии электрического поля направлены вдоль пластов и вклад от их кромок минимален по сравнению с интенсивностью поля при его направлении вкост этих пластов. На других профилях с номерами 1,2, 5 и 6 происходит инверсия кривых  $\Delta U(Az40^\circ)$  и  $\Delta U(Az0^\circ)$ , что является диагностическим признаком нарушения моноклиналильного строения угленосной толщи. Инверсию кривых  $\Delta U(Az40^\circ)$  и  $\Delta U(Az0^\circ)$  на профилях №1 и №2 можно объяснить наличием в месте расположения профилей пликативной структуры, которая вызывает перераспределение силовых линий электрического поля при его разнонаправленном возбуждении (см. рис. 5). Такое же перераспределение свойственно и областям тектонически нарушенных зон, в которых наблюдается смещение корреляционных реперов. В данном случае таковыми являются области инверсии между пикетами 48-61 м на профиле №5 и пикетами 27-41 на профиле № 6.

### Заключение

Основная идея настоящей статьи заключается в обосновании применения дополнительных геофизических исследований для экологической оценки инженерно-геологических условий, когда по результатам интерпретации результатов стандартных методов возникают неопределенности в истолковании геологического строения объектов изысканий. В этом ключе рассмотрен пример изучения грунтовых условий высоко преобразованных угленосных отложений, осложненных тектонической и техногенной нарушенностью на площадке проектирования

---

ветроэнергетических установок башенного типа на территории техногенно и тектонически нарушенных угленосных отложений в Восточном Донбассе.

Результатом выполненных исследований явилось:

- обоснование возможностей выявления технологией ЭПТЗ структурных неоднородностей геологического разреза угленосных отложений с разделением их на: 1) литологические (повторение формы на смещенных на шаг переноса питающей линии графиках электропрофилеирования), 2) тектонические и техногенные (различие кривых электрозондирования в смежных точках);

- детализация деструктивных зон посредством технологии МПЭФ по признакам: 1) инверсии графиков электропрофилеирования, зарегистрированных при разнонаправленном возбуждении электрического поля; 2) смещения точек инверсии в местах наличия в угленосной толще тектонических разрывных нарушений.

### **Литература**

1. MacKinnon D., Dawley S., Steen M., Menzel M., Normann Endresen H. Path creation, global production networks and regional development: A comparative international analysis of the offshore wind sector. // *Progress in Planning*. 2019. Vol. 130. pp. 1-32.
2. Bhutto A., Bazmi A., Zahedi G. Greener energy: Issues and challenges for Pakistan - wind power prospective // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 20. pp. 519-538.
3. Hong L., Möller B. Offshore wind energy potential in China: Under technical, spatial and economic constraints // *Energy*. 2011. Vol. 36. pp. 4482-4491.
4. Дорошенко А.В. Тенденции развития ветроэнергетики в мире и России // *Естественные и технические науки*, 2015. №3 (81). С. 197-199.



5. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Мировая ветроэнергетика мегаваттного диапазона мощностей // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2019. №2(27). С. 94-105.
  6. Ермоленко Г., Гордеев И., Рыженков М., Никомарова А., Богородицкая Н. Развитие сетевых ветряных электростанций в России на примере пилотного проекта сетевой ветроэлектростанции "ВЭС Мирный" в Ейском районе Краснодарского Края // Энергетический вестник. 2014. №17. С. 20-30.
  7. Ермоленко Г.В., Гордеев И.Г., Никомарова А.В., Рыженков М.А. Проекты российской ветроэнергетики вчера и сегодня // Энергия: экономика, техника, экология. 2012. №10. С. 15-25.
  8. Присс О.Г., Кузнецов Р.С. Определение геосейсмических параметров грунтовой толщи, дающих сейсмическую характеристику грунтов // Инженерный вестник Дона. 2019, №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5524/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5524/)
  9. Гапонов Д.А., Фоменко Л.Н., Шерemet Р.Д. Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов // Инженерный вестник Дона. 2016, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2016/3724/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2016/3724/).
  10. Косов О.И., Соколова В. Проблемы экологической безопасности территорий горных отводов ликвидируемых шахт Восточного Донбасса. Уголь. 2007. № 6. С. 56-59.
  11. Легостаев С.О. Разработка комплекса природоохранных мероприятий в зоне ликвидированных шахт Восточного Донбасса. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 1. С. 276-281.
  12. СП 11-105-97. Свод правил «Инженерные изыскания для строительства». Часть IV. Правила производства геофизических исследований. Дата введения 2004-07-01. М.: ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России, 2004. - 52 с.
-

13. Угольная база России. Том 1. Угольные бассейны и месторождения Европейской части России (Северный Кавказ, Восточный Донбасс, Подмосковский, Камский и Печорский бассейны. Урал). Москва ООО Геоинформмарк, 2000. 483 с.
14. Фоменко Н.Е. Области применения электроразведочных технологий на угольных месторождениях // Разведка и охрана недр, 2010. №12. С. 72-77.

### References

1. MacKinnon D., Dawley S., Steen M., Menzel M., Normann Endresen H. Progress in Planning, 2019. Vol. 130, pp. 1-32.
2. Bhutto A., Bazmi A., Zahedi G. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. Vol. 20, pp. 519-538.
3. Hong L., Möller B. Energy, 2011. Vol. 36, pp. 4482-4491.
4. Doroshenko A.V. Estestvennye i tehicheskie nauki, 2015. №3 (81). pp. 197-199.
5. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Innovatika i jekspertiza: nauchnye trudy, 2019. №2(27). pp. 94-105.
6. Ermolenko G., Gordeev I., Ryzhenkov M., Nikomarova A., Bogorodickaja N. Jenergeticheskij vestnik. 2014. №17. pp. 20-30.
7. Ermolenko G.V., Gordeev I.G., Nikomarova A.V., Ryzhenkov M.A. Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija. 2012. № 10. pp. 15-25.
8. Priss O.G., Kuznecov R.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019, №1. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5524/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2019/5524/).
9. Gaponov D.A., Fomenko L.N., Sheremet R.D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2016/3724/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2016/3724/).
10. Kosov O.I., Sokolova V. Ugol'. 2007. №6. pp. 56-59.
11. Legostaev S.O.. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2011. №1. pp. 276-281.



12. SP 11-105-97. Svod pravil «Inzhenernye izyskaniya dlja stroitel'stva». Chast' IV. Pravila proizvodstva geofizicheskikh issledovaniy. [Code of practice “Engineering surveys for construction”. Part IV Rules for the production of geophysical surveys]. Data vvedeniya 2004-07-01. M.: FGUP «PNIIS» Gosstroja Rossii, 2004. 52 p.
13. Ugol'naja baza Rossii. Tom 1. Ugol'nye bassejny i mestorozhdenija Evropejskoj chasti Rossii (Severnyj Kavkaz, Vostochnyj Donbass, Podmoskovnyj, Kamskij i Pechorskij bassejny. Ural). [Coal base of Russia. Volume 1. Coal basins and deposits in the European part of Russia (North Caucasus, Eastern Donbass, Moscow Region, Kama and Pechora basins. Ural)] Moskva OOO Geoinformmark, 2000. 483 p.
14. Fomenko N.E. Razvedka i ohrana neдр. 2010. №12. pp. 72-77.