

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полярная трансформация гравиметрических данных «Polus2d»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2017610475 / Тарантин М.В., Простолупов Г.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН. – 2016662317; заявл. 14.11.2016; зарегистрировано 11.01.2017; опублик. 11.01.2017. – 1 с.
2. Щербинина Г.П. Изучение изменения плотностного состояния подработанной толщи // Горное эхо. – 2019. – № 4 (77). – С. 50-53. DOI: 10.7242/echo.2019.4.12.
3. Щербинина Г.П., Простолупов Г.В. Влияние техногенных деформаций подработанного массива на трансформанты гравитационного поля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 31-39. – DOI: 10.15372/FTPRPI20220104.
4. Бычков С.Г., Симанов А.А., Хохлова В.В. Контроль динамики разуплотненных зон на основе повторных гравиметрических исследований // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 49-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова / ИГФ УрО РАН. – Екатеринбург, 2023. – С. 74-77.
5. Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Выявление техногенных изменений в подработанном массиве по гравиметрическим данным на Верхнекамском месторождении солей // Геофизика. – 2019. – № 5. – С. 43-49.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2024.1.11

**МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ  
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

А.А. Тайницкий, Л.А. Христенко

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** С целью изучения деформационных процессов земной поверхности был выполнен комплекс геолого-геофизических исследований, включающий электрометрические исследования методами симметричного электропрофилирования и естественного электрического поля. Приведены результаты разложения естественного поля на составляющие с использованием алгоритма адаптивной двумерной энергетической фильтрации программного комплекса «КОСКАД 3D». Полученные локальные поля могут быть использованы при совместной интерпретации результатов других методов для уменьшения неоднозначности толкований.

**Ключевые слова:** электропрофилирование, естественное поле, кажущееся сопротивление, адаптивная фильтрация.

В пределах шахтного поля Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) проектируется трасса газопровода высокого давления. В связи с проявлением деформационных процессов земной поверхности в створе проектируемой трассы для определения их характера и возможной динамики был выполнен комплекс геолого-геофизических исследований. Наряду с наземными сейсморазведочными исследованиями, бурением и специализированными наблюдениями в скважине, комплекс включал электрометрические исследования, которые наиболее чувствительны к влажности пород, избыточностью которой и вызваны зачастую негативные процессы в горных массивах.

Поскольку выраженные деформации и линии трещин были обнаружены в ноябре 2022 г., первоначально электрометрические наблюдения были выполнены на 2 профилях методом симметричного электропрофилирования (СЭП) с тремя разносами питающей линии АВ (100, 200, 400 м) и разносом приемной линии MN равным шагу съемки 20 м.

На пр. № 1 кажущиеся сопротивления (КС), полученные с разносом АВ/2 = 50 м, изменяются от 45 до 110 Ом·м. Среднее КС составляет около 70 Ом·м. Интервалы от-

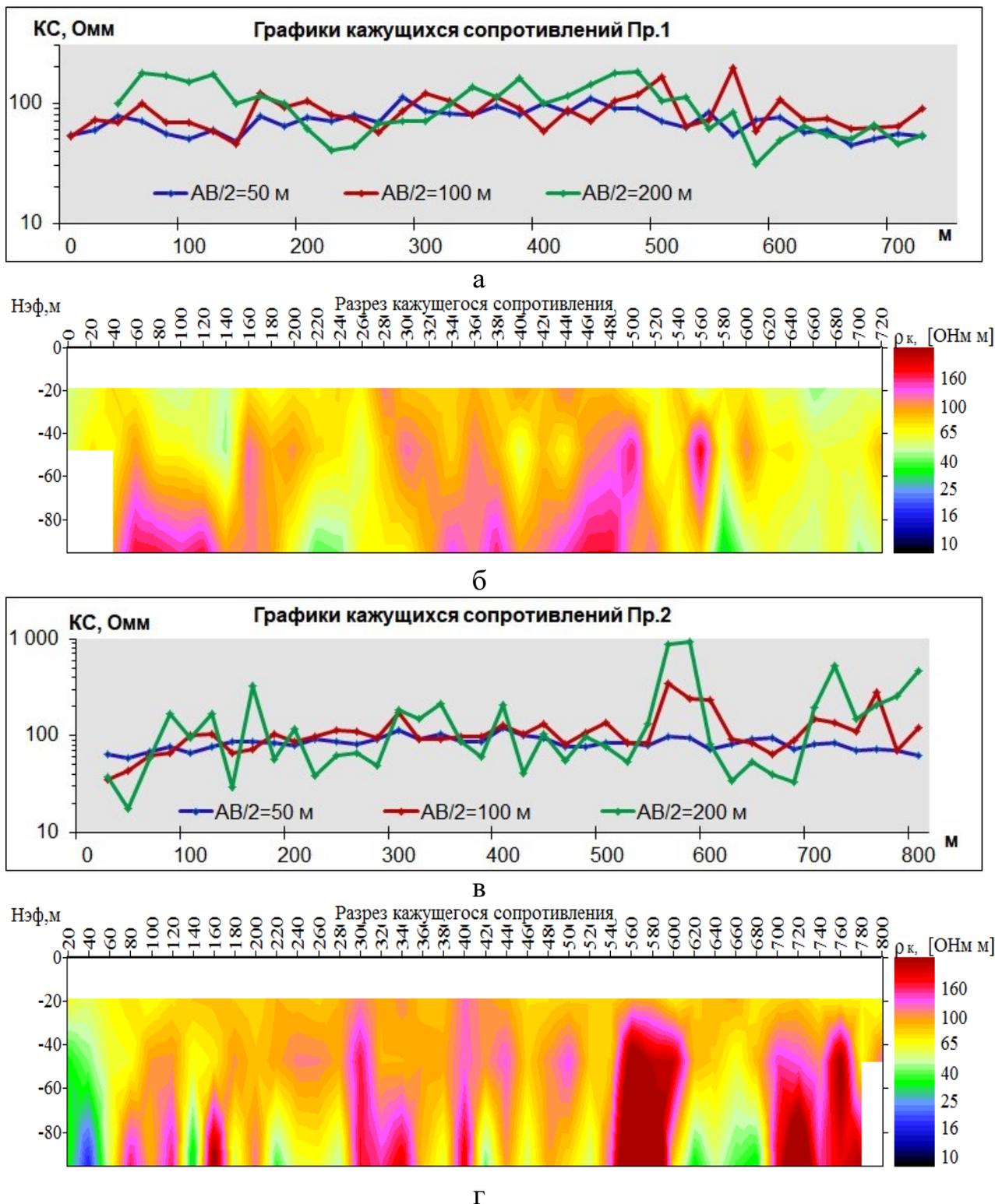
носителем пониженных значений КС отмечаются между пикетами (пк) 20-40, 60-160, 620-720. КС, полученные с разномом  $AB/2 = 100$  м, изменяются от 45 до 190 Ом·м. Среднее КС составляет около 90 Ом·м. Интервалы относительно пониженных значений КС отмечаются между ПК 20-40, 80-160, 220-280, 380-460, 520-560, 620-700. Кажущиеся сопротивления, полученные с разномом  $AB/2 = 200$  м, изменяются от 30 до 180 Ом·м. Среднее КС составляет около 100 Ом·м. Интервалы относительно пониженных значений КС отмечаются между ПК 180-320, 540-720 (рис. 1а).

Рост значений КС с глубиной отвечает составу пород разреза: четвертичные отложения представлены в верхней части песком мелкозернистым, ниже до подошвы слоя глиной комковатой плотной с дресвой и щебнем известняка; терригенно-карбонатные отложения представлены в основном известняком массивным кавернозным, трещиноватым. Трещины субвертикальные и субгоризонтальные, открытые и закрытые выполнены кальцитом. Свойства отложений терригенно-карбонатной толщи (ТКТ) характеризуются измерениями КС с разносами линии  $AB/2 = 100$  и 200 м. На этих же разносах наиболее пониженные (значительно ниже средних) значения КС отмечаются между ПК 200-280 (40-70 Ом·м) и 540-720 (30-60 Ом·м). На разрезах КС (рис. 1б) аномалии наиболее пониженных значений КС отмечаются между ПК 80-140, 200-280, 500-540 и 560-720. Первая отвечает верхней части разреза. Аномалия между ПК 200-280 – уровню ТКТ. На ПК 260 аномалия пониженных КС отмечается с глубины и почти до поверхности наблюдений. Аномалии между ПК 500-540 и 560-720 отмечаются на всю глубину разреза. Зоне оседания (ПК 500-520) на разрезе КС отвечает вертикальная узлолокализованная аномалия пониженных значений с эпицентром на глубине более 80 м.

На графике КС с  $AB/2=50$  м зоне оседания соответствует интервал пониженных (с 90 до 60 Ом·м) значений, на графике КС с  $AB/2=200$  – начало интервала градиентного снижения значений сопротивления. Однако на графике КС с  $AB/2 = 100$  отмечаются пиковые значения, т.е. однозначно утверждать, что такое сочетание значений КС характеризует зону оседания, невозможно.

На профиле № 2 кажущиеся сопротивления, полученные с разномом  $AB/2 = 50$  м, изменяются от 60 до 120 Ом·м. Среднее КС составляет около 80 Ом·м. Интервалы относительно пониженных значений КС отмечаются между ПК 20-140, 740-800. КС, полученные с разномом  $AB/2 = 100$  м, изменяются от 35 до 240 Ом·м. Среднее КС составляет около 100 Ом·м. Интервалы относительно пониженных значений КС отмечаются между ПК 20-100, 140-180, 520-540, 620-680. Кажущиеся сопротивления, полученные с разномом  $AB/2 = 200$  м, изменяются от 30 до 250 Ом·м. Среднее КС составляет около 100 Ом·м. Интервалы относительно пониженных значений КС отмечаются между ПК 20-60, 220-280, 360-380, 420-520, 600-680 (рис. 1в). На разрезах КС (рис. 1г) аномалии наиболее пониженных значений (ПК 20-60, 220-280, 600-680) отмечаются в основном на уровне ТКТ и лишь между ПК 20-60 на всю глубину исследования до поверхности наблюдений. Зона оседания (ПК 240-260) не отражается на малом и среднем разносах СЭП, но хорошо выделяется на большом разноме, что затрудняет однозначную трактовку причин, вызвавших понижение значений КС с  $AB/2 = 200$  именно в интервале наблюдений, соответствующему оседанию.

В мае 2023 г. электрометрические наблюдения были выполнены на 8 профилях методом естественного электрического поля (ЕП) в модификации градиента с шагом, равным длине приемной линии (MN) – 10 м. ЕП практически единственный геофизический метод, который фиксирует аномальное поле, являющееся следствием потока или фильтрации грунтовых вод [1]. Имеется положительный опыт его использования при решении различных задач как в соляных шахтах, так и на поверхности в пределах ВКМКС [2, 3].



**Рис. 1.** Результаты наблюдений СЭП и разрезы кажущегося сопротивления. Профили: а-б – № 1; в-г – № 2

На графиках, построенных по рассчитанным потенциалам  $U_{EP}$  (рис. 2) выделяются протяженные интервалы отрицательных значений (около  $-15 \div -30$  мВ), предположительно отражающие движение грунтовых вод в ТКТ. Локальные понижения  $U_{EP}$  до  $-60$  мВ согласуются с пониженными значениями КС на разных разносах питающей линии АВ, характеризую различную глубину фильтрационных процессов. Остановим-

ся более подробно на профилях 1 и 2, где наблюдения были выполнены методами СЭП и ЕП.

На профиле № 1 интервал пониженных значений потенциалов (-35 ÷ -20 мВ) между пк 40-100 на графике U ЕП отвечает интервалу пониженных значений КС с АВ/2 = 50 и 100 м, вероятно, отражая инфильтрацию с поверхности. Интервал наиболее низких значений (до -65 мВ) между пк 420-460 соответствует интервалу пониженных значений КС с АВ/2=100 и 200 м, характеризую фильтрацию в нижней части ТКТ. Интервал между пк 600-640 интенсивностью около -50 мВ согласуется с пониженными КС на всех трех разносах питающей линии АВ и характеризует, вероятно, фильтрацию по субвертикальным трещинам. Зона оседания (пк 500-520) совпадает с протяженным интервалом отрицательных значений потенциалов и отвечает их относительному повышению.

На профиле № 2 интервалы пониженных значений потенциалов (-20 ÷ -30 мВ) между пк 200-300 и 380-520 на графике U ЕП отвечают интервалам пониженных значений КС с АВ/2=200 м, характеризую, вероятно, водонасыщение кавернозных и трещиноватых пород. Зона оседания (пк 240-260), как на профиле № 2, отвечает относительному повышению значений U ЕП на протяженном интервале отрицательных значений потенциалов.

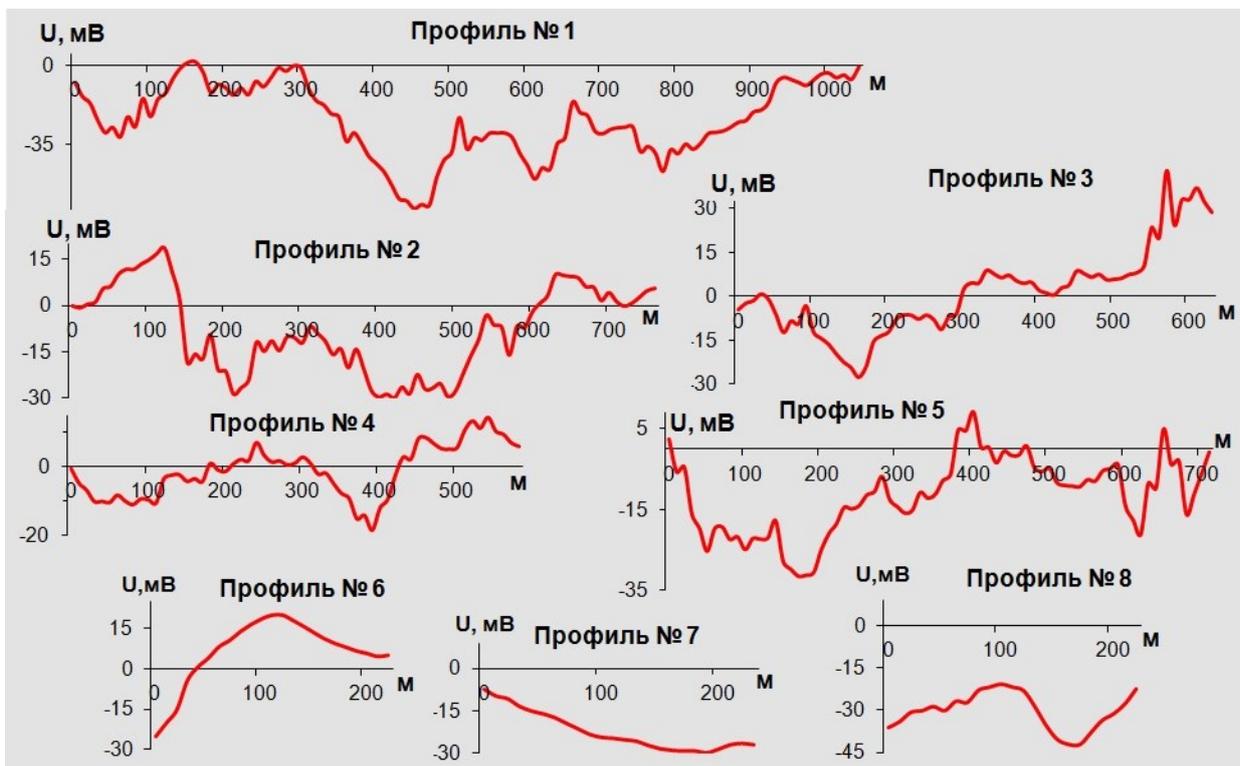


Рис. 2. Графики значений потенциала естественного поля

По интерполированным значениям потенциалов ЕП была построена карта изолиний, позволяющая качественно оценить характер пространственного распределения потенциала. На карте выделяется обширная область отрицательного потенциала, охватывающая практически весь участок за исключением его северо-восточной четверти. Эпицентры наиболее интенсивных (-40 ÷ -60 мВ) локальных аномалий этой области располагаются на профиле № 1, подробно описанном выше. Границы локальных аномалий охватывают профили № 2, 3 и 5.

Поскольку обе зоны оседания пространственно не связаны с экстремумами, а попадают на границы локальной аномалии, была предпринята попытка выделения компоненты, приближенно отвечающей этим зонам. Для этого в программном комплексе «КОСКАД 3D» [4] выполнено разложение естественного поля на составляющие и их анализ. Ранее авторами уже использовались различные преобразования ПК «КОСКАД 3D» для решения задач выявления, оценки динамики и влияния выработанного пространства недр на различные объекты инфраструктуры [5-7]. Реализованный в комплексе алгоритм адаптивной двумерной энергетической фильтрации позволяет оптимальным образом оценить параметры полезных сигналов с различными спектрально-корреляционными характеристиками непосредственно в процессе фильтрации. Разделение естественного поля с ее помощью позволило получить 3 составляющие (рис. 3) с характеристиками, приведенными в таблице.

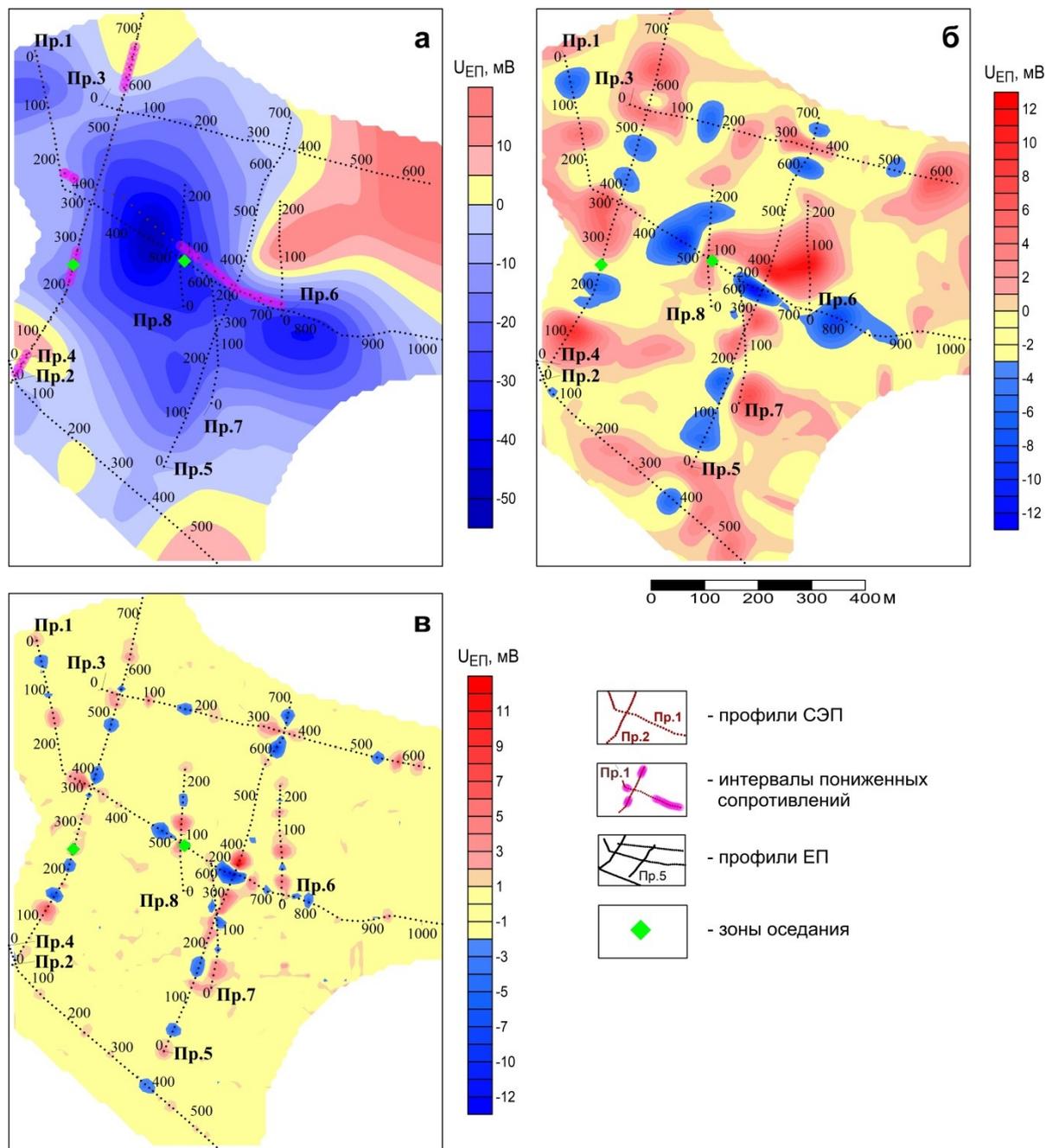
Таблица

Статистические характеристики составляющих естественного поля

N	Мин. значение	Макс. значение	Размах	Медиана	Среднее	Ср.кв. отклонен.	Коефф. вариации	Коефф. асимм.	Коефф. эксцесса
8692	-50.518	27.28868	77.80664	-4.59488	-5.99379	13.54292	-30.6001	-0.21474	-0.27975
8692	-12.3989	11.76195	24.16088	-0.01311	-0.02539	2.108783	-175.117	-0.24404	4.637045
8692	-12.6364	15.48515	28.12153	0.002831	0.00193	0.979788	497.3131	0.132896	25.37567

На рисунке 3а приведен результат первой фильтрации исходного поля энергетическим фильтром, на рисунках 3б и 3в – соответственно, результат фильтрации остаточного поля, полученного после первой фильтрации и остаточное поле после второй фильтрации.

На рисунке 3а видно, что после первой фильтрации четко выделяются более энергоемкие аномалии в центре участка. Параметры менее энергоемких аномалий стало возможным оценить лишь после повторной фильтрации остаточного поля – рисунок 3б. Остаточное поле после повторной фильтрации содержит большое количество аномалий, расположенных практически равномерно на участке исследований. Сложно придать этому содержательный смысл, поэтому была выполнена еще одна фильтрация, которая позволила к тому же избавиться от аномалий, связанных с интерполяционными построениями, и выделить профильные аномалии, подтвержденные измерениями (рис. 3в). Обе зоны оседания пространственно совпали с остаточными аномалиями, обладающими определенными характеристиками. Подобные аномалии отмечаются на других интервалах профилей № 1 и 2, а так же на профилях № 5-8. Можно воспользоваться адаптивной одномерной энергетической фильтрацией профильных наблюдений для каждого профиля в отдельности [6], реализованной в ПК «КОСКАД», но для качественного анализа и с учетом комплексности исследований результат получен менее трудоемким способом и обладает необходимой достоверностью. Кроме того, двумерное отображение удобно использовать при интерпретации результатов других методов для уменьшения неоднозначности толкований и корректировки трассы газопровода.



**Рис. 3.** Результаты адаптивной двумерной энергетической фильтрации:  
 а – исходного поля; б – остаточного поля, полученного после первой фильтрации;  
 в – остаточного поля после второй фильтрации

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР № 124020500054-3).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – Л. Недра, 1980. – 446 с.: ил.
2. Степанов Ю.И., Бушуева Е.С. Опыт применения метода естественного поля в соляных шахтах // Инженерная и рудная геофизика – 2020: 16-я науч.-практ. конф. и выставка, 14-18 сент. 2020. – Пермь, 2020. – С. 47. – DOI: 10.3997/2214-4609.202051063.

3. Степанов Ю.И., Кузнецов И.Л., Зубрикова Е.С., Тайницкий А.А. Теоретические и практические вопросы применения метода естественного поля на калийно-магниевого рудниках // Горное эхо. – 2023. – № 4 (93). – С. 72-79. – DOI: 10.7242/echo.2023.4.11.
4. Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации – КОСКАД 3D // Геофизика. – 2000. – № 4. – С. 29-33.
5. Христенко Л.А. Результаты комплексной интерпретации данных электрометрических наблюдений // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 90-97. – DOI: 10.7242/echo.2022.2.15.
6. Христенко Л.А., Степанов Ю.И. Интерпретация профильных электрометрических наблюдений, выполненных в пределах Верхнекамского месторождения солей / Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей: материалы конф. / Ин-т геофизики УрО РАН [и др.]. – Екатеринбург, 2013. – С. 327-328. – (Седьмые науч. чтения памяти Ю.П. Булашевича).
7. 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.

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2024.1.12

## СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ВПЕРЕДИ ЗАБОЯ

А.Г. Ярославцев<sup>1</sup>, И.Л. Кузнецов<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Горный институт УрО РАН, г. Пермь  
<sup>2</sup> ПАО «Уралкалий», г. Березники

**Аннотация:** На специальном полигоне в пределах соляного рудника проведены работы по исследованию околозабойной зоны сейсмическими методами на предмет обнаружения в ней контрастных протяженных границ. По результатам полноволнового моделирования выбраны параметры возбуждения и обработки полученных сигналов. Результаты обработки волновых полей удовлетворительно соотносятся с существующей геометрией шахтного поля. Выделенные волновые формы соответствуют известным границам выработок впереди забоя и в стороне от его направления. Показано применение процедуры поворота оси просвечивания на заданный угол и выделения отражений от центральной зоны конуса просвечивания.

**Ключевые слова:** шахтная сейсморазведка, сейсмическая локация, прогноз, забой, сейсмомоделирование, поперечные волны, горные выработки.

Основной объем шахтных сейсморазведочных исследований в калийных рудниках Верхнекамского месторождения солей проводится с целью прогноза состояния водо-защитной толщи [1, 2]. При этом разрабатываемые пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений и интерпретационные заключения в основном базируются на регистрации и анализе разнотипных отраженных волн, прошедших из целевого верхнего полупространства [3]. Идеи картирования массива впереди забоя до настоящего времени активного развития не получали, тогда как задачи опережающего прогноза потенциально-опасных элементов строения разрабатываемого пласта достаточно актуальны.

Технологии сейсмической локации для обзора массива горных пород в горизонтальной плоскости из забоя выработок давно и успешно развиваются на угольных месторождениях. При этом в качестве носителей информации предлагается использовать разные классы волн: каналовые, отраженные, дифрагированные [4-8].

Известны также зарубежные промышленные технологии, ориентированные на обнаружении субвертикальных сейсмических отражающих объектов различной природы впереди забоя при строительстве тоннелей. Все они основаны на идеях метода отражен-