

Обработка сейсмических данных должна быть произведена таким образом, чтобы в полной мере использовать преимущества метода AVO. В этом случае, любое заметное изменение амплитуды в волновом поле будет являться исключительно результатом отражающих изменений, а не результатом погрешности обработки. Конечная цель обработки для AVO тогда состоит в том, чтобы отобразить сейсмограммы с изменением «истинной амплитуды» со смещением. Основное различие между традиционной обработкой и обработкой AVO заключается в том, что, помимо необходимости получения информации истинной амплитуды, при «обработке AVO» может быть обеспечено значительное повышение отношения сигнал/помеха.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ  
(рег. номер проекта 122012000401-7).*

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Геомеханическое заключение и прогноз состояния водозащитной толщи на основе комплексных геофизических исследований и инструментальных наблюдений на потенциально-опасном участке в районе скважины № 492 БКПРУ-4: Отчет о НИР. – Пермь, 2022. – (Фонды ГИ УрО РАН).
2. SCS-PC / под ред. Голярчук Н.А. Система обработки. – Норильск, 2014-2019.
3. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых: (Петрофизика). Справ. геофизика / под. ред. Н.Б. Дортман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, – 1984. – 455 с.: ил.
4. Фатькин. К.Б. Локализация и идентификация физико-геологических неоднородностей соляной толщи методами сейсмического амплитудного анализа (на примере ВКМКС): автореф. дис. ... канд. техн. наук. 25.00.16: защищена 20.11.08 / Фатькин Константин Борисович. – Пермь, 2008. – 22 с.
5. Chopra S., Marfurt K.J. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. 2007.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2023.2.13

### **МОНИТОРИНГ ПОРОДНОГО МАССИВА В ПРЕДЕЛАХ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ г. БЕРЕЗНИКИ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ**

Л.А. Христенко

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** С целью локализации зон негативной техногенной изменчивости породного массива в пределах г. Березники были выполнены мониторинговые электрометрические исследования, включающие современную технологию изучения электросопротивления геологической среды – электрическую томографию. Полученные разрезы удельного электрического сопротивления позволили обнаружить ослабленные зоны, связанные с фильтрацией воды. Наблюдения в режиме мониторинга и использование относительного параметра  $\Delta\rho$ , отражающего изменения удельного сопротивления геологической среды за определенный период, позволили проследить динамику изменения со временем и выявить наиболее критические участки, требующие дальнейших наблюдений.

**Ключевые слова:** мониторинг, естественное поле, электротомография, удельное электрическое сопротивление, относительный параметр.

В местах усиленной фильтрации грунт имеет повышенную влажность, что отражается на его физических свойствах. В геофизике наиболее чувствительными к влажности пород являются электрометрические методы. Обычно исследования проводят методами электропрофилирования, естественного поля, электрических зондирований на постоянном и переменном токе, в том числе электротомографией (ЭТ).

Метод ЕП чувствителен непосредственно к движению грунтовых вод [2, 3]. Поток грунтовых вод, просачиваясь через пористую среду, создает электрическое поле на земной поверхности. ЕП практически единственный геофизический метод, который фиксирует аномальное поле, являющееся следствием потока или фильтрации грунтовых вод.

На разрезах кажущихся ( $\rho_k$ ) и удельных электрических сопротивлений (УЭС) определяются места пониженных сопротивлений грунта, связанные с обводненностью за счет фильтрации грунтовых вод или инфильтрации атмосферных осадков.

Особенностью электротомографии является многократное использование в качестве питающих и измерительных одних и тех же расстановок электродов, что приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при существенном увеличении плотности измерений, число которых обычно достигает первых тысяч. Методика электрической томографии позволяет в автоматическом режиме проводить разноглубинные измерения электрического сопротивления среды на постоянном токе.

Более достоверные данные о состоянии среды могут быть получены мониторинговыми исследованиями, проводимыми, в отличие от разовых измерений, с заданной частотой опроса (через интервалы времени). Система мониторинга включает в себя сбор с заданной частотой опроса и обработку экспериментальных данных [1, 4, 6].

Выщелачивание солей в пределах Верхнекамского месторождения существенно увеличивает скорость и объемы негативных процессов и, как следствие, ведет к образованию катастрофических последствий. С целью локализации и оценки потенциальной опасности зон негативной техногенной изменчивости породного массива, влияющей на устойчивость и состояние городской застройки, в пределах г. Березники, были выполнены комплексные геолого-геофизические мониторинговые исследования, включающие электрометрию. Наблюдения в режиме мониторинга позволяют отслеживать динамику изменения исследуемых параметров со временем, выявлять наиболее критические участки, требующие детальных исследований. Электрометрические наблюдения выполнялись методами естественного электрического поля (ЕП), электропрофилирования (ЭП) в модификации срединного градиента (СГ) и электротомографии. Результаты представлены для профиля, проходящего южнее эпицентра скоростей оседания земной поверхности, выявленного площадным мониторингом в пределах подработанной территории. По результатам опробования верхней части надсолевого разреза (отложения теригенно-карбонатной толщи) исследуемый участок приурочен к аномальной зоне. В скважинах зафиксированы зеркала скольжения, обусловленные субвертикальными разрывными нарушениями. Ослабленные зоны, фиксируемые по керну и кавернометрии, отмечаются в верхней части ТКТ на глубине 10.0-35.0 метров и в ее нижней части в интервале 50.0-70.0 метров. Мощность зоны аэрации составляет от 13 до 27 м.

Наблюдения методом ЕП выполнялись цифровым мультиметром APPA-107N с шагом 10 м способом градиентов потенциала с измерительной линией MN=10 м. По результатам ежемесячных измерений (с мая по октябрь месяц 2022 года) были построены графики изменения потенциала естественного поля  $U_{EP}$  (рис. 1) и выполнен их качественный анализ.

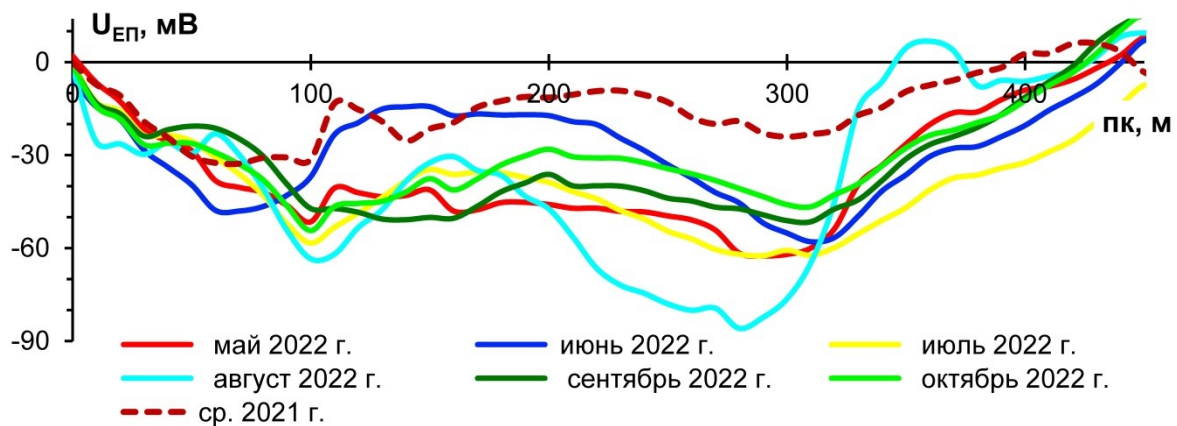


Рис. 1. Графики значений потенциала естественного поля

При выполнении ЭП-СГ использовалась аппаратура АМС-1, разности питающей линии АВ составляли 360 м. Измерения проводились приемной линией MN = 10 м с шагом 10 м в средней трети АВ (140 м) и позволили на качественном уровне получить первое представление об изучаемом объекте для выделения особенностей изменений в геологической среде. Для исключения высокочастотной составляющей, отражающей влияние близповерхностных неоднородностей, графики значений  $\rho_k$ , полученные в разные периоды наблюдений, осреднялись в скользящем окне по 3 точкам. Это позволило более четко выявить характерные особенности изменения кажущегося сопротивления (рис. 2). Интервалы пониженных значений (менее 20 Ом·м) на графике, построенном по осредненным за все периоды 2021 года значениям  $\rho_k$ , выделены между пикетами (ПК) 190-280, 330-430. Графики  $\rho_k$ , полученные по наблюдениям в 2022 году, хорошо согласуются с ним – интервалы пониженных значений  $\rho_k$  сохраняют свое положение.

Наблюдения ЭТ на исследуемом профиле были выполнены с использованием многоэлектродной 15-ти канальной электроразведочной аппаратуры «Скала 64К15». Измерения проводились комбинацией установок вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и дипольного осевого зондирования (ДОЗ). Минимальное расстояние между электродами составляло 3,5 метра. Обработка данных выполнена в программе «ZONDRES2D» предназначенной для 2.5-мерной интерпретации профильных данных электротомографии. По измеренным значениям были вычислены удельные электрические сопротивления и построены разрезы (рис. 3), которые позволяют проследить области пониженных электрических сопротивлений, отождествляемые с повышенной влажностью грунтов, на глубину.

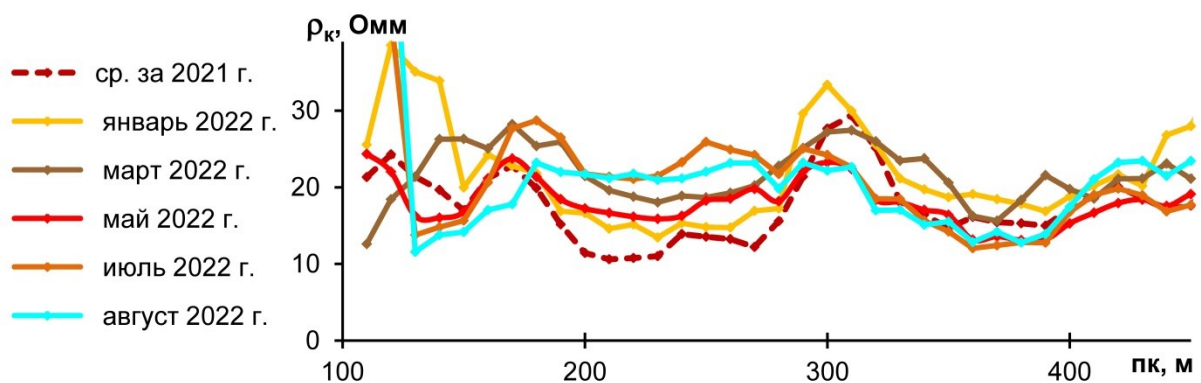


Рис. 2. Графики значений кажущегося сопротивления

Разрезы удельных сопротивлений, полученные по измерениям осенью 2021 года и по 4 этапам наблюдений в 2022 году, хорошо согласуются между собой. На всех разрезах выделяется протяженная область пониженного УЭС (5-15 Ом·м), вероятно, отвечающая водоносному горизонту в нижней части терригенно-карбонатной толщи (ТКТ) на глубине 50.0-70.0 м (рис. 3а). Выше по разрезу (глубина около 20 м) в интервалах между ПК 60-80, 140-160 и 310-330 прослеживаются локальные аномалии УЭС (около 20-40 Ом·м), вероятно, отражающие водонасыщенные субвертикальные трещины и зоны интенсивного дробления глинистых известняков, слагающих ТКТ.

В июне 2022 года (рис. 3б) было отмечено осложнение аномалии между ПК 310-330 с запада до ПК 280 (на 30 м) и смещение ее верхней кромки до поверхности наблюдений. На графике  $U_{\text{ЕП}}$  в интервалах 60-80 и 280-330 м отмечаются локальные понижения значений потенциала почти до -50 мВ, вероятно, отражающие фильтрацию по трещинам (рис. 1). В мае прослеживалось более плавное изменение потенциала, предположительно связанное с субгоризонтальным направлением фильтрации без ярко выраженных неоднородных участков. Поля, обусловленные фильтрационными процессами, обычно обладают амплитудой до 30 мВ. В данном случае, вероятнее всего, кроме фильтрационного потенциала, аномалии обусловлены диффузионно-адсорбционными процессами, проявляющимися в надсолевой и соляной толщах.

В сентябре на разрезе отмечалась лишь аномалия пониженных УЭС (около 20-40 Ом·м) между ПК 310-330 (рис. 3в). На графике  $U_{\text{ЕП}}$ , как в мае, отмечалась протяженная аномалия (ПК 40-400) отрицательного знака интенсивностью до -50 мВ, связанная с фильтрационным потоком (рис. 1).

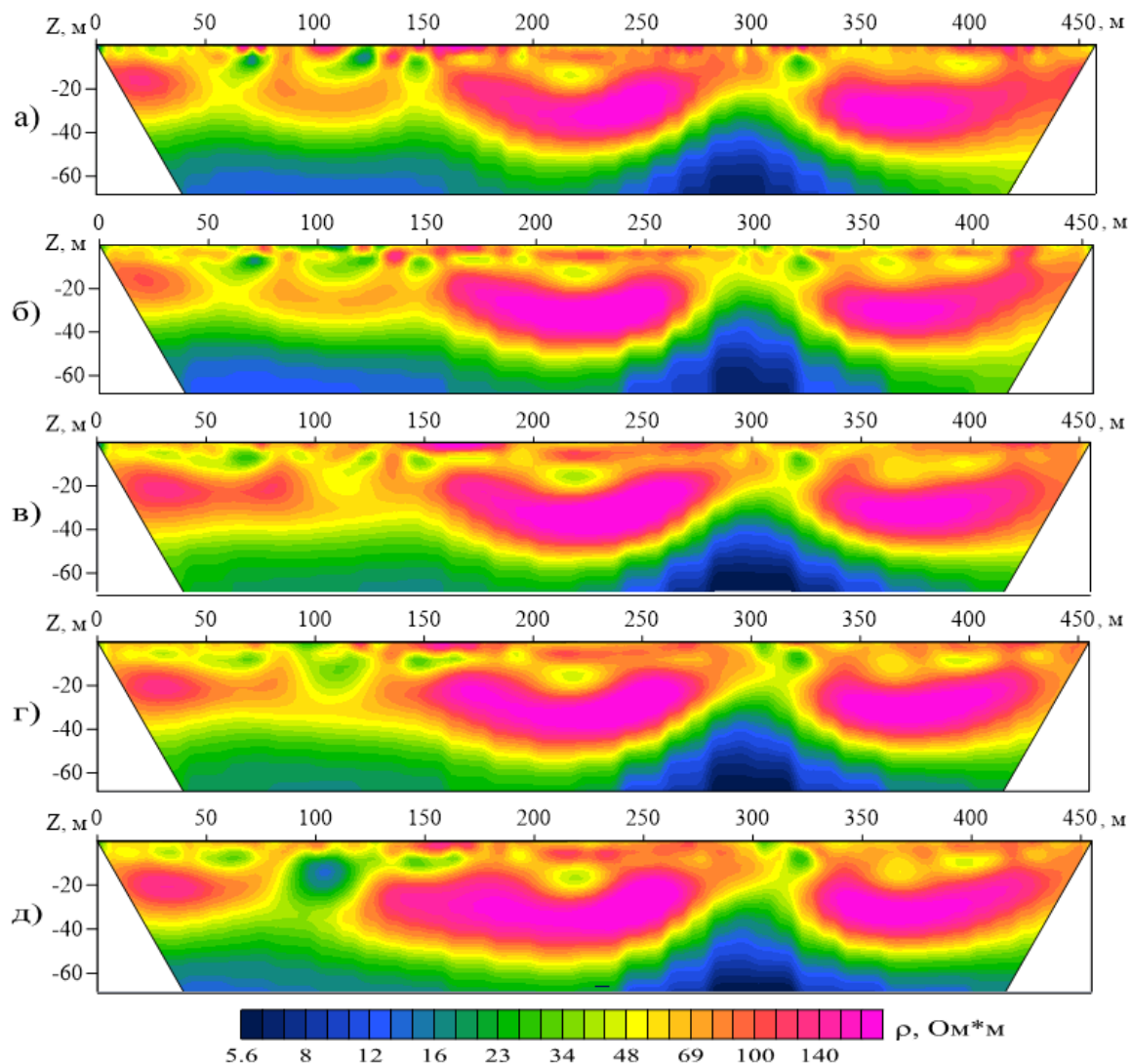
В октябре (рис. 3г) отмечалась близповерхностная локальная аномалия пониженного удельного сопротивления (около 20-40 Ом·м) между ПК 90-130. Аномалия между ПК 310-330 прослеживалась до поверхности наблюдений. На графике  $U_{\text{ЕП}}$  протяженная аномалия (ПК 40-400) отрицательного знака амплитудой около 30 мВ осложнена локальными понижениями до -50 мВ, пространственно отвечающими аномалиям пониженного УЭС между ПК 90-130 и 310-330. Такое сочетание признаков может быть вызвано вертикальными перетоками по ослабленным трещиноватым зонам.

В ноябре аномалия между ПК 310-330 сохраняла свое положение. Отмечалось увеличение аномалии между ПК 90-130 до области пониженных УЭС, отвечающей водоносному горизонту в нижней части ТКТ (рис. 3д).

Для более четкого выделения скрытых закономерностей изменения УЭС был использован относительным параметром  $\Delta\rho$ , который отражает изменения удельного сопротивления геологической среды за определенный период:  $\Delta\rho = ((\rho_2 - \rho_1) / \rho_2) \cdot 100\%$  [6].

На разрезе  $\Delta\rho$  за период с сентября 2021 г. по июнь 2022 г. (рис. 4а) отрицательные значения отмечаются ближе к поверхности (1-3 м) и указывают на проницаемые участки грунта. Это четвертичные отложения, представленные в основном насыпным грунтом до глубины 1.4 м, ниже – песком и суглинком. В интервалах 260-300 и 350-370 м до глубины 15-20 м локальные отрицательные аномалии указывают на усиление фильтрации воды и повышение степени увлажнения выветрелого, сильно трещиноватого глинистого известняка, слагающего верхнюю часть ТКТ. Усиление фильтрации в июне подтверждается наблюдениями естественного поля (рис. 1).

На разрезе  $\Delta\rho$  за период с июня 2022 г. по сентябрь 2022 г. (рис. 4б) локальные отрицательные аномалии отмечаются в интервале 200-230 м на глубине около 20 м.



**Рис. 3.** Разрезы удельного электрического сопротивления по данным электротомографии: сентябрь 2021 г (а); июнь 2022 г (б); сентябрь 2022 г (в); октябрь 2022 г (г); ноябрь 2022 г (д)

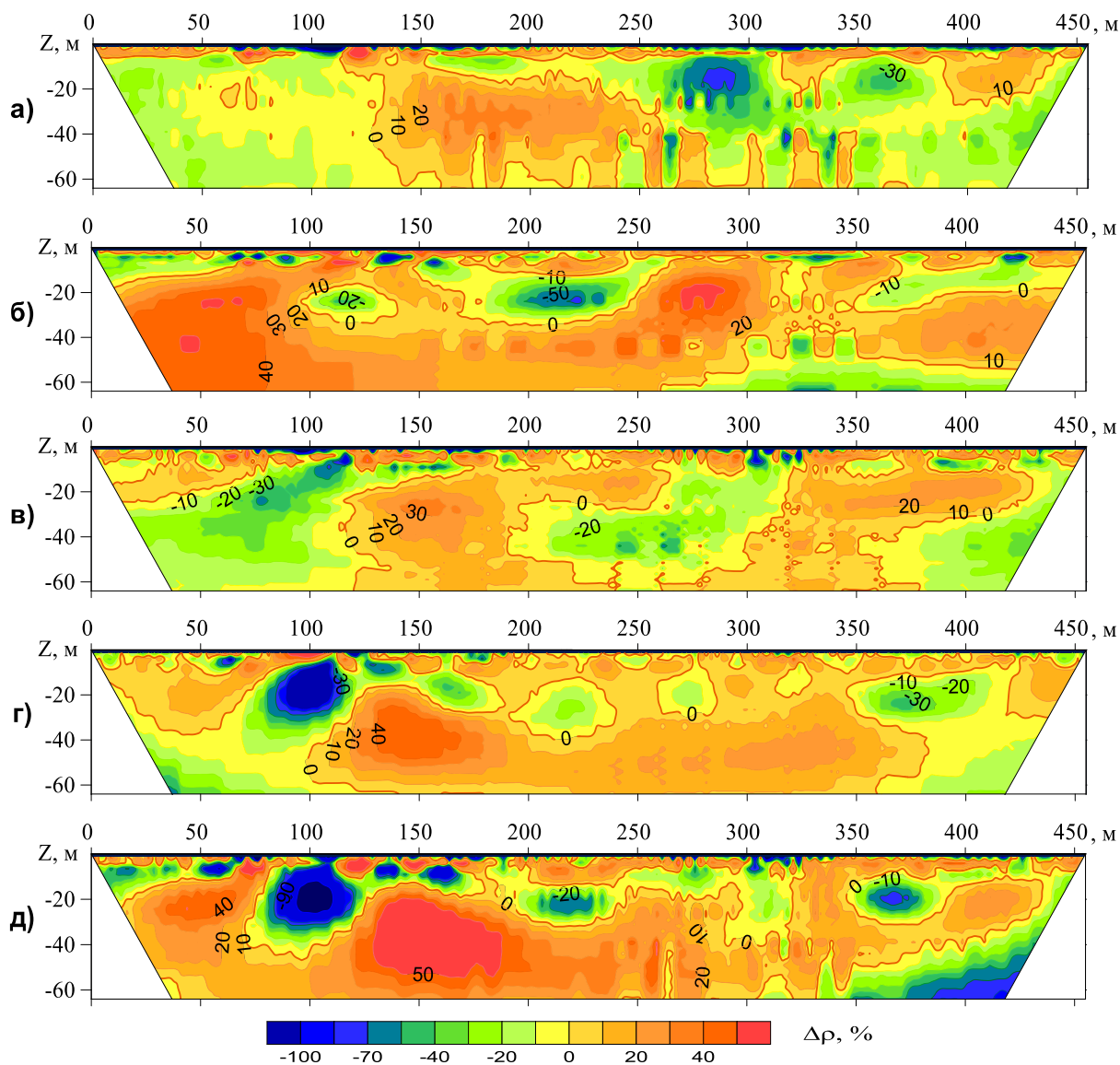
На разрезе  $\Delta\rho$  (рис. 4в) за период с сентября 2022 г. по октябрь 2022 г. локальные отрицательные аномалии отмечаются: ближе к поверхности, в интервалах 80-180 и 200-350 м; от поверхности до глубины 20 м в интервале 80-120 м; на глубине около 40 м в интервалах 230-270 и 370-440 м.

На разрезе  $\Delta\rho$  (рис. 4г) за период с октября 2022 г. по ноябрь 2022 г. локальные отрицательные аномалии отмечаются: от поверхности до глубины 40 м в интервале 80-120; на глубине от 10 до 30 м прерывистой цепочкой в интервалах 120-190, 200-240, 260-280 и 350-390 м.

На разрезе (рис. 4д)  $\Delta\rho$  за период с сентября 2021 г. по ноябрь 2022 года цепочкой контрастных локальных отрицательных аномалий прорисовалась динамика снижения сопротивления среды на уровне верхней-средней части ТКТ<sub>в+с.ч.</sub>, к которой приурочен водоносный горизонт (10-30 м). На разрезах относительного параметра  $\Delta\rho$  (рис. 4а, в, г) отражается динамика снижения сопротивления по вертикали в интервалах 70-120, 270-320 и 400-450.

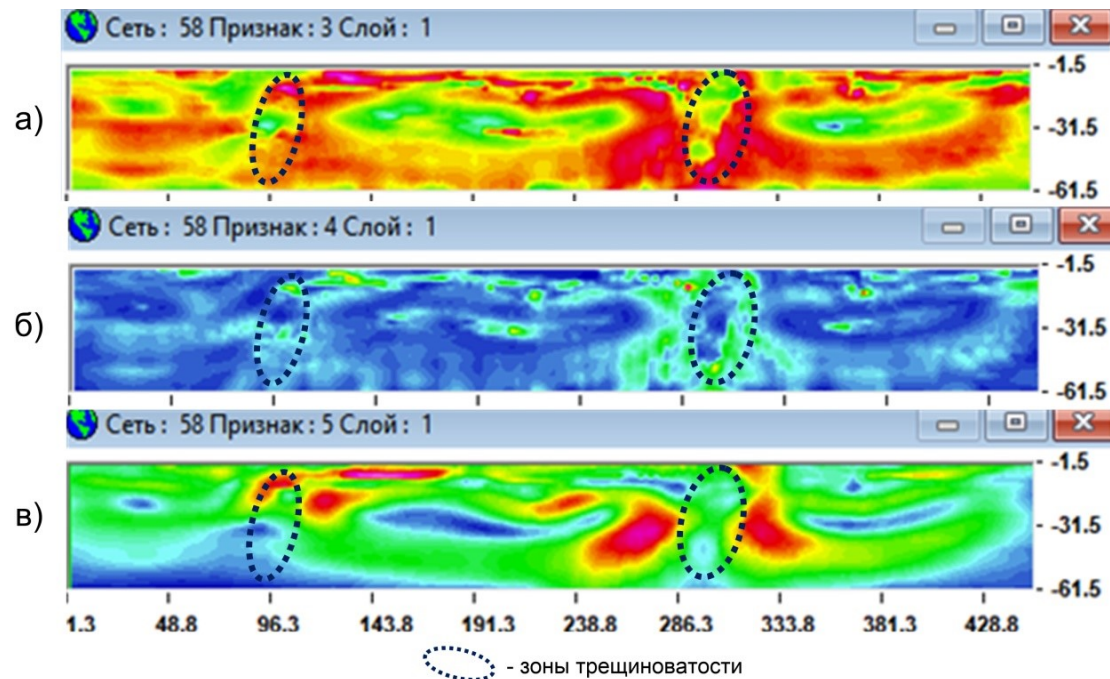
Достоверность интерпретации можно повысить расширением анализируемого признакового пространства за счет формальных признаков, например, статистических характеристик самих наблюдаемых параметров. Имеется опыт их использования при ин-

терпретации данных метода естественного поля и симметричного электропрофилирования, полученных в пределах исследуемой территории [8, 9]. В программном комплексе «КОСКАД 3D» [5] в скользящем окне рассчитывались статистические характеристики для разрезов УЭС. На рисунке 5 приведены асимметрия, эксцесс, коэффициент вариации для УЭС, полученных по наблюдениям ЭТ в ноябре 2022 г. Видно, что минимальные и максимальные значения статистик приурочены к границам аномалий и так же позволяют проследить выделенные на разрезах УЭС и относительного параметра  $\Delta\rho$  ослабленные зоны трещиноватого глинистого известняка слагающего терригенно-карбонатную толщу.



**Рис. 4.** Относительный параметр  $\Delta\rho$  изменений УЭС за периоды: сентябрь 2021 г. – июнь 2022 г. (а); июнь 2022 г. – сентябрь 2022 г. (б); сентябрь 2022 г. – октябрь 2022 г. (в); октябрь 2022 г. – ноябрь 2022 г. (г); сентябрь 2021 г. – сентябрь 2022 г. (д)

Таким образом, использование математических преобразований параметров, получаемых в результате измерений, помогает повысить достоверность локализации зон негативной техногенной изменчивости породного массива. А многократные измерения, выполненные к тому же в разные сезоны, позволяют выявить нестабильные участки и проследить динамику изменения их состояния.



**Рис. 5.** Статистические характеристики: асимметрия (а); эксцесс (б); коэффициент вариации (в) УЭС, полученных по результатам электротомографии в ноябре 2022 г.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ  
(рег. номер 122012000398-0).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубрикова Е.С., Тайницкий А.А. Оценка результатов электроразведочных мониторинговых наблюдений // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 56-60. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.12.
2. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики: учебник для вузов / под ред. В.А. Богословского. – М.: Недра, 1990. – 501 с.: ил.
3. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – Л. Недра, 1980. – 446 с.: ил.
4. Тайницкий А.А., Степанов Ю.И., Зубрикова Е.С., Лучников М.С. Оценка результатов мониторинговых электроразведочных наблюдений надсолевых отложений Верхнекамского месторождения на участке техногенной нарушенности породного массива // Геофизика. – 2022. – № 5. – С. 27-33. – DOI 10.34926/geo.2022.68.30.001.
5. Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации – КОСКАД 3D // Геофизика. – 2000. – № 4. – С. 29-33.
6. Федорова О.И., Горшков В.Ю. Геоэлектрический мониторинг при диагностике насыпных гидротехнических сооружений на примере изучения грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. – 2022. – № 11. – С. 45-51. – DOI: 10.34831/EP.2022.82.30.006.
7. Хмелевской В.К. Основной курс электроразведки. Ч. III. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. – 208 с.
8. Христенко Л.А. Результаты комплексной интерпретации данных электрометрических наблюдений // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 90-97. – DOI: 10.7242/echo.2022.2.15.
9. Христенко Л.А., Степанов Ю.И. Электрометрические наблюдения при оценке влияния выработанного пространства недр на основании железнодорожной насыпи // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7. – С. 58-62.