

УДК 550.837

# Интерпретация данных электрометрии при исследовании деформационных процессов земной поверхности

**А.А. Тайницкий, Л.А. Христенко**

Горный институт УрО РАН

614007, Пермь, ул. Сибирская, 78а. E-mail: liudmila.hristenko@yandex.ru

(Статья поступила в редакцию 03 мая 2024 г.)

Представлены результаты интерпретации данных электрометрии при исследовании деформационных процессов земной поверхности в пределах Верхнекамского месторождения соли. Выполнен анализ распределения электрического сопротивления. Для выделения компонент естественного поля, приблизительно отвечающих зонам оседания, в программном комплексе «КОСКАД 3D» был выполнен ряд преобразований: разделение поля с помощью алгоритма адаптивной двумерной энергетической фильтрации, оценка дисперсии, классификация и оценка распределения потенциала на глубину. Полученные результаты можно использовать в качестве дополнительной информации для определения потенциально возможных зон оседания.

Ключевые слова: *естественное электрическое поле, электротомография, преобразования.*

DOI: 10.17072/psu.geol.23.3.260

## Введение

Оседания грунта, вызванные горными работами, в районе г. Березники происходили многие годы, но их скорость долгое время оставалась небольшой. Ситуация резко изменилась в 2006 г., когда случилась крупнейшая в мировой практике разработки водорастворимых руд авария – был затоплен рудник Первого Березниковского калийного рудоуправления, расположенный непосредственно под г. Березники, вторым по величине городом Пермского края с населением около 150 тыс. человек (Барях и др., 2009). После аварии был существенно расширен комплекс мер по обеспечению сохранности водозащитной толщи и контролю эффективности проводимых в связи с этим работ. Регулярно выполняются повторные геодезические и гравиметрические измерения, регистрируется техногенная сейсмичность. Проводится численное геомеханическое моделирование, разработана и реализована система комплексного мониторинга, позволяющая принимать превентивные решения по защите рудников и расположенных в зоне их влияния селитебных территорий (Барях и др., 2013).

В связи с проявлением деформационных процессов земной поверхности в пределах

Верхнекамского месторождения солей (ВКМКС) в декабре 2022 г. был выполнен комплекс геолого-геофизических исследований, включающий электрометрию. Методы электрометрии, наряду с другими методами неразрушающего контроля, играют немаловажную роль при локализации потенциально опасных областей с нарушенными физико-механическими свойствами природно-технических систем (Димухаметов и др., 2022).

Первоначально наблюдения были выполнены на 2 профилях методом симметричного электропрофилеирования (СЭП) с тремя разносами питающей линии АВ (100, 200, 400 м) и разносом приемной линии MN, равным шагу съемки в 20 м. По результатам СЭП были построены графики и разрезы кажущихся сопротивлений (КС). На графиках КС зонам оседания не соответствуют четко выраженные понижения (рис. 1). На разрезе КС вдоль профиля 1 зоне оседания отвечает вертикальная узлокалоказованная аномалия пониженных значений, отмечающаяся на всю глубину исследований. На разрезе вдоль профиля 2 зоне оседания отвечает аномалия пониженных значений КС на уровне терригенно-карбонатной толщи (ТКТ).

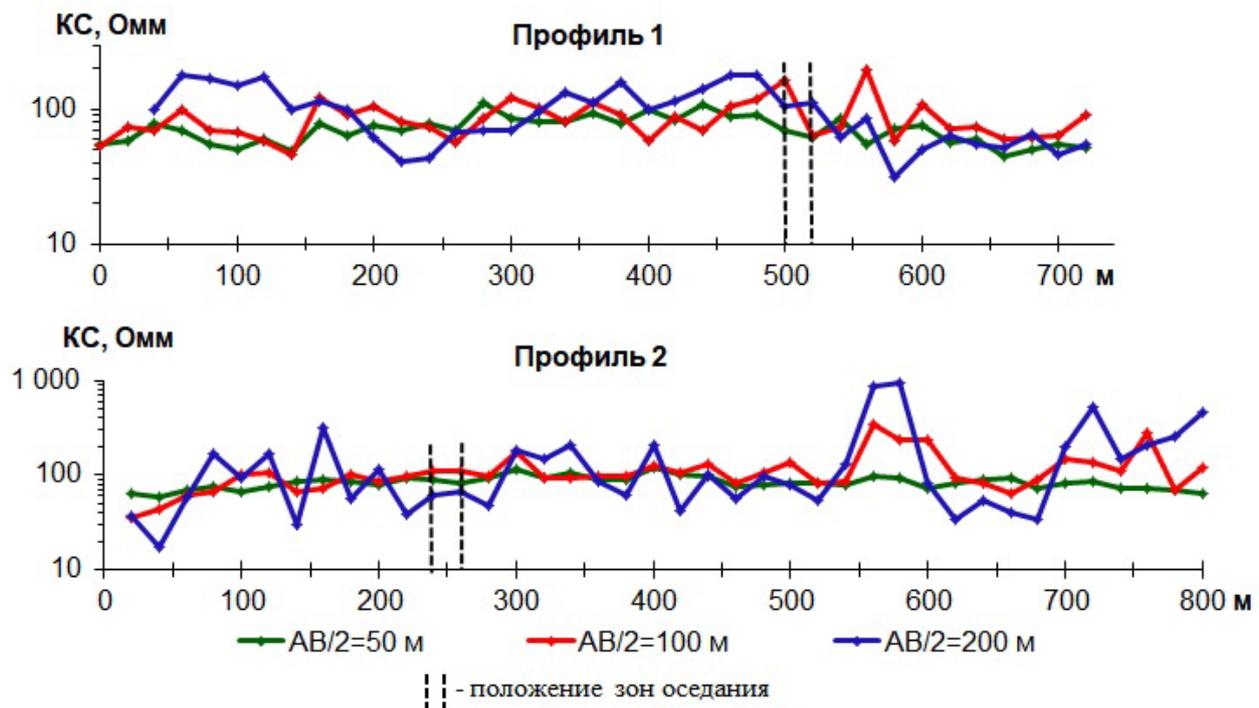


Рис. 1. Графики кажущихся сопротивлений

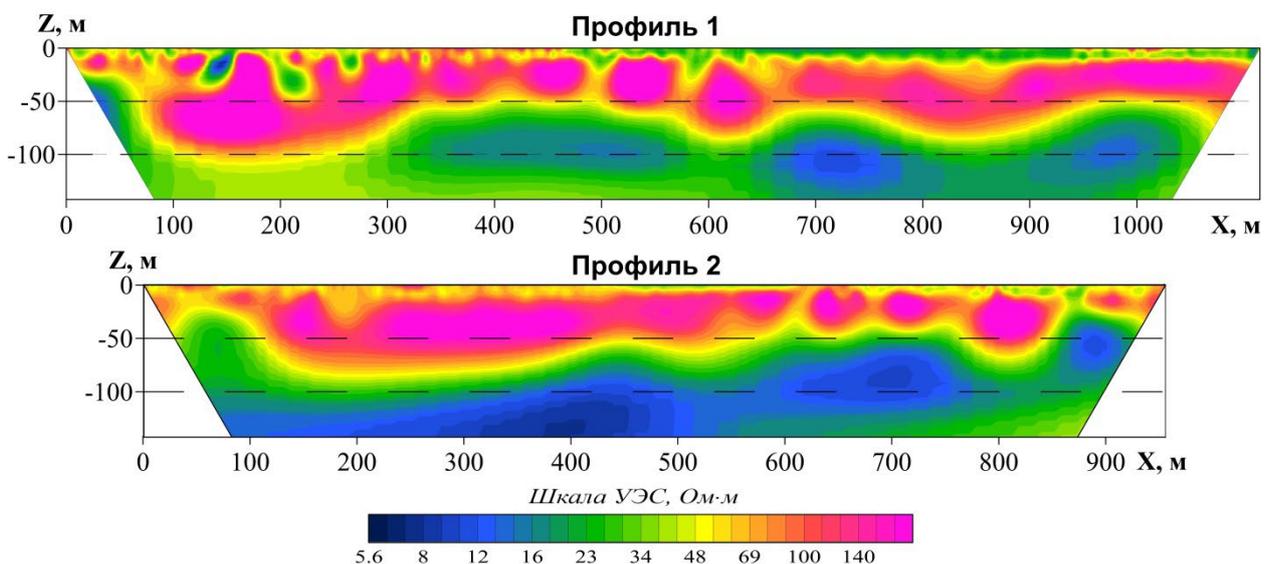


Рис. 2. Геоэлектрические разрезы

В мае 2023 г. электротометрические наблюдения были выполнены на 8 профилях методом сопротивлений по методике электротомографии и методом естественного электрического поля (ЕП).

В ходе двумерной инверсии данных электротомографии были получены разрезы удельного электрического сопротивления (УЭС), которые позволили выделить три геоэлектрических слоя. На рис. 2 приводятся гео-

электрические разрезы для профилей 1–2, включенных в схему майских наблюдений. Первый слой, прослеживающийся от поверхности наблюдений до глубин 10–12 м, характеризуется значениями УЭС 20–80 Ом·м и отождествляется с песчано-глинистыми четвертичными отложениями.

Его подстилают породы терригенно-карбонатной толщи, представленные в основном известняком массивным кавернозным,

трещиноватым. Трещины субвертикальные и субгоризонтальные, открытые и закрытые выполнены кальцитом. Породы ТКТ характеризуются преимущественно высокими значениями сопротивлений (более 100 Ом·м) и прослеживаются до глубин 75–80 м. В нижней части разреза выделяется слой с пониженными сопротивлениями, отвечающий породам соляно-мергельной толщи (СМТ).

Для оценки пространственного распределения удельного электрического сопротивления были построены карты УЭС для различных глубин. На рис. 3 приводятся карты для глубин 50, 100 и 135 м, которые отражают достаточно сложное распределение поля сопротивления и общее его снижение с глубиной без существенного изменения картины распределения. Карта УЭС для глубины 50 м характеризует породы ТКТ. Понижение сопротивления (15–45 Ом·м) отмечается на пересечении профилей 1–3 на северо-западе участка исследования и, вероятно, обусловлено наличием сильно обводненных пород.

На глубине 100 м наблюдается расширение областей пониженного сопротивления с эпицентрами вдоль профиля 3. На глубине 135 м обширная область низких сопротивлений охватывает практически весь участок, за исключением краевых частей. Наиболее низкие значения УЭС прослеживаются в центральной части в пределах профилей 1, 3 и 5. Зона оседания на профиле 1 пространственно

совпадает с одним из эпицентров понижения сопротивления на его пересечении с профилем 8. Зоне оседания на профиле 2 пространственно отвечает область устойчивого снижения сопротивления с глубиной, но выделить какие-то характерные для зоны особенности поля УЭС невозможно.

На графиках значений потенциала естественного поля на профилях 1 и 2 (рис. 4), видно, что обе зоны оседания пространственно не связаны с экстремумами, а попадают на границы локальных аномалий. Для выделения компонент поля ЕП, приближенно отвечающих этим зонам, в программном комплексе «КОСКАД 3D» (Трусов, Петров, 2000) был выполнен ряд преобразований. Преобразования, реализованные в ПК «КОСКАД 3D», помогают повысить достоверность выводов о геологической природе изучаемых явлений и процессов при решении задач выявления, оценки динамики и влияния выработанного пространства недр на различные объекты (Христенко, Степанов, 2014).

Чтобы зоны, расположенные на разных профилях наблюдений, имели единые характеристики, значения потенциалов ЕП были заинтерполированы. Карта изолиний, построенная по интерполированным значениям, позволила к тому же качественно оценить характер пространственного распределения потенциала.

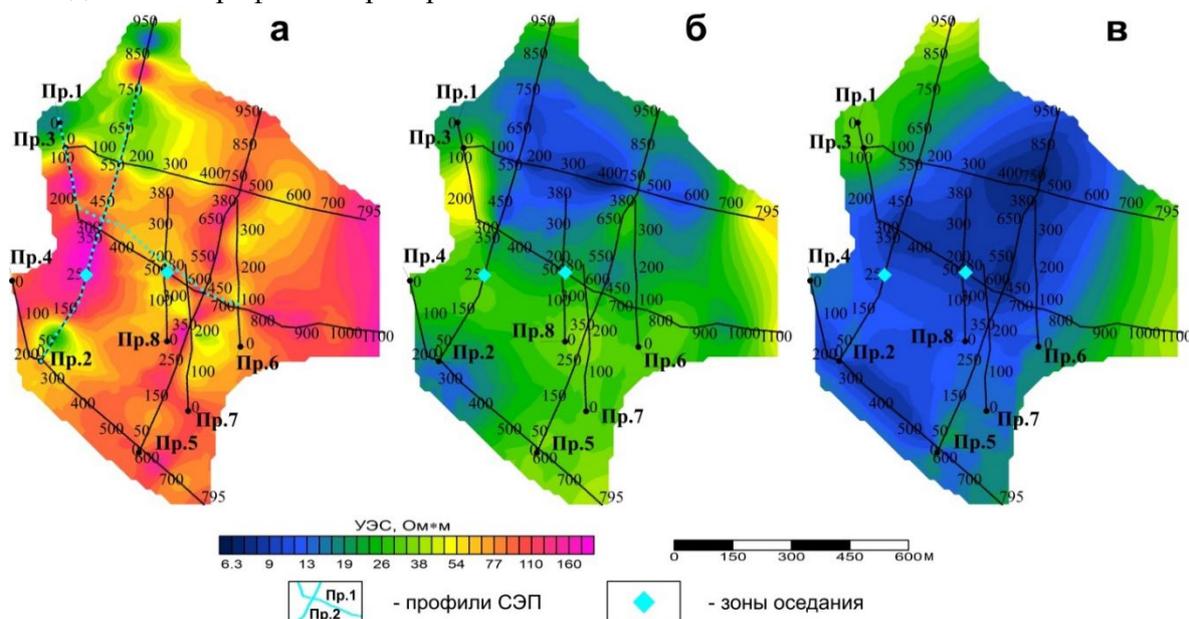


Рис. 3. Карты удельного электрического сопротивления на глубине 50 м (а), 100 м (б), 135 м (в)

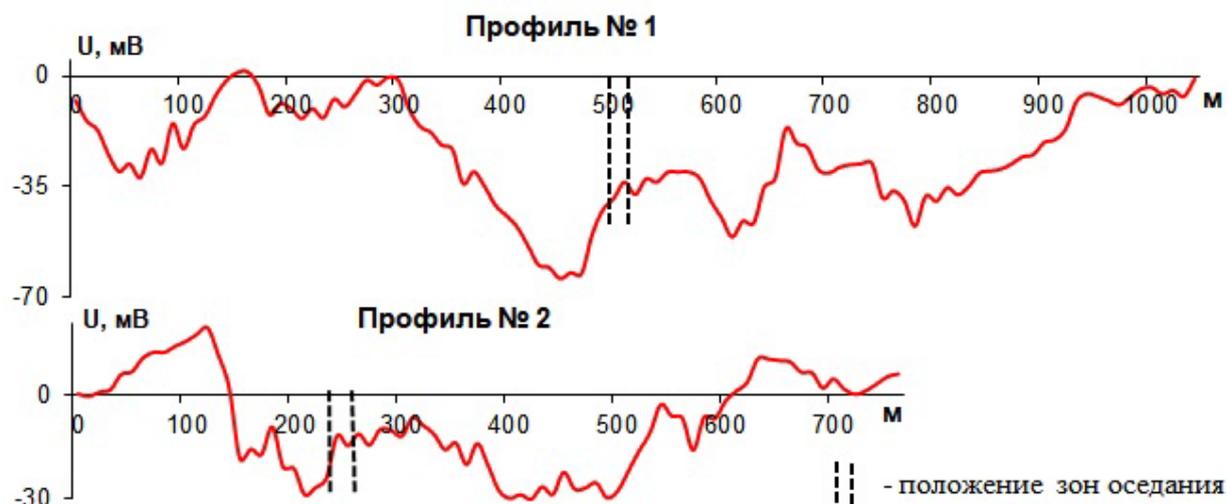


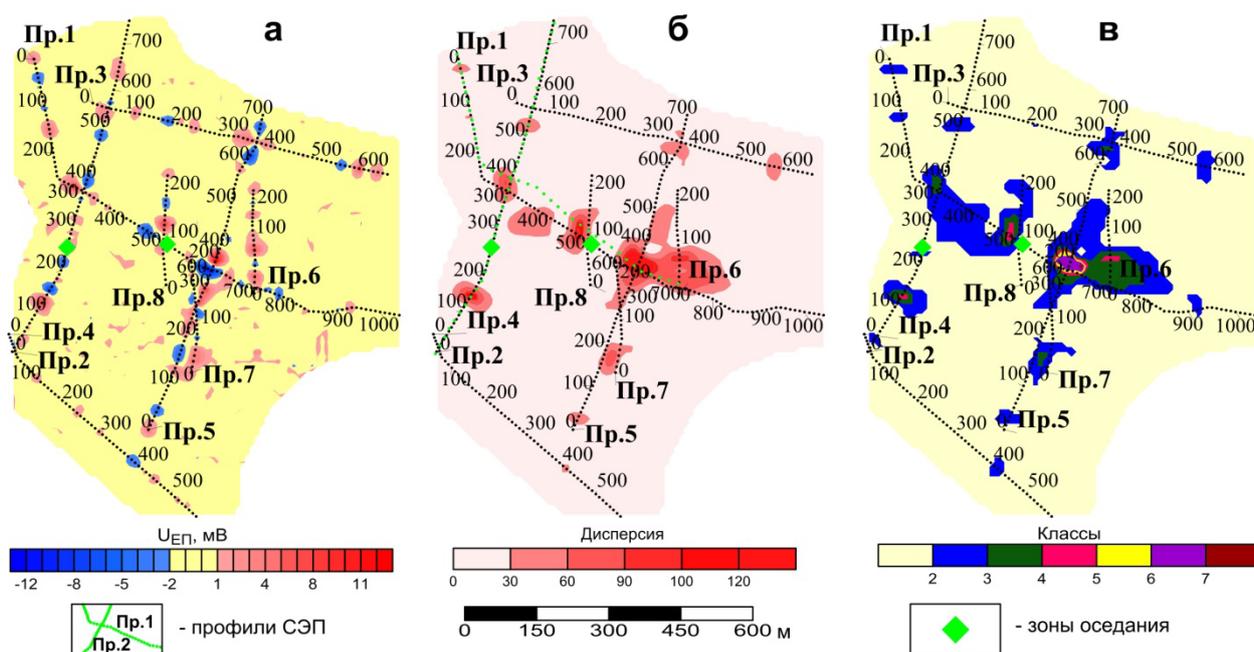
Рис. 4. Графики значений потенциала естественного поля

Обширная область отрицательного потенциала на карте охватывает практически весь участок, за исключением его северо-восточной четверти. Эпицентры наиболее интенсивных локальных аномалий ( $-40 \div -60$  мВ) этой области располагаются на профиле 1, а границы охватывают профили 2, 3 и 5. Разделение естественного поля с помощью алгоритма адаптивной двумерной энергетической фильтрации позволило выделить 3 составляющие с различными спектрально-корреляционными характеристиками, приведенными в таблице. Первая составляющая описывает наиболее энергоемкие аномалии в центре участка, охватывающие обширную область отрицательного потенциала. Большому количеству менее энергоемких аномалий второй составляющей, расположенных практически равномерно на участке исследований, сложно было придать содержательный смысл без повторной фильтрации, которая позволила получить третью составляющую (рис. 5 а). Обе зоны оседания пространственно совпали с ее положительными остаточными аномалиями. Подобные аномалии отмечаются на других интервалах профилей 1 и 2, а также на профилях 5–8.

Анализ значений статистических характеристик помогает получить дополнительную полезную информацию об особенностях геополья (Никитин, Петров, 2008). В полях дисперсии, асимметрии, эксцесса более контрастны границы аномальных объектов. На рис. 5 б граница зоны оседания на профиле 1 (пк 500) совпадает с областью повышенных дисперсий. Аналогичные области, отмечаемые на профилях 1, 2 и 5, могут отвечать границам других возможных зон оседания. Наряду с дополнительной информацией о границах аномальных объектов, статистические характеристики поля эффективно используются в задачах геологического районирования классификационными программами комплекса «КОСКАД 3D». Метод общего расстояния, предназначенный для разбиения исследуемой территории на области однородные по комплексу признаков, позволил получить сеть, каждая точка которой характеризуется номером класса, к которому она принадлежит. Обе зоны оседания по комплексу признаков относятся ко второму классу (рис. 5 в).

Таблица. Статистические характеристики составляющих естественного поля

№ составляющей	Мин. значение	Макс. значение	Размах	Медиана	Среднее	Ср.кв. отклонен.	Коефф. вариации	Коефф. асимм.	Коефф. эксцесса
1	-50,518	27,28868	77,80664	-4,59488	-5,99379	13,54292	-30,6001	-0,21474	-0,27975
2	-12,3989	11,76195	24,16088	-0,01311	-0,02539	2,108783	-175,117	-0,24404	4,637045
3	-12,6364	15,48515	28,12153	0,002831	0,00193	0,979788	497,3131	0,132896	25,37567



**Рис. 5.** Преобразования естественного поля: адаптивная энергетическая фильтрация (а); дисперсия (б); классификация (в)

Области, объединяющие точки сети, второго класса, согласуются по своему пространственному положению с аномалиями пониженных значений УЭС и результатами других преобразований поля потенциала ЕП, т.е. оконтуривают области с признаками, близкими областям процессов оседания.

Для приблизительной оценки распределения потенциала ЕП на глубину была использована процедура т.н. интерпретационной томографии – оценка параметров аномалиеобразующих объектов по Б.А. Андрееву (рис. б). Глубина объектов определяется по градиенту изменения поля, получаемому в результате полосовой фильтрации осредненного с разными размерами окон исходного поля. На рис. б видно, что зонам оседания отвечают области сходного по характеру распределения поля на глубине.

Подробно о теории и практике томографической интерпретации вообще и геопотенциальных полей в частности говорится в статье А.С. Долгалея и др. авторов (Долгалея и др., 2012). Основными особенностями большинства методов интерпретационной томографии являются: использование минимума априорной информации об источниках поля;

отсутствие трудоемких процедур построения начального приближения; разделение интерпретируемого поля на составляющие, отождествляющиеся с влиянием разноглубинных (не обязательно горизонтальных) слоев горных пород; применение сравнительно быстрых вычислительных алгоритмов и возможность построения различных вариантов пространственных распределений неоднородностей в исследуемом объеме среды.

Эти особенности делают методы интерпретационной томографии очень привлекательными для геофизиков-интерпретаторов и задают основные направления для дальнейших исследований, связанных с определением достоверности разделения разноглубинных объектов; оценкой возможностей тех или иных алгоритмов томографической интерпретации в конкретных физико-геологических ситуациях путем имитационного моделирования и выполнения серии вычислительных экспериментов; созданием методик, обеспечивающих эффективное комплексирование методов интерпретационной томографии с другими методами интерпретации геофизических полей и др.

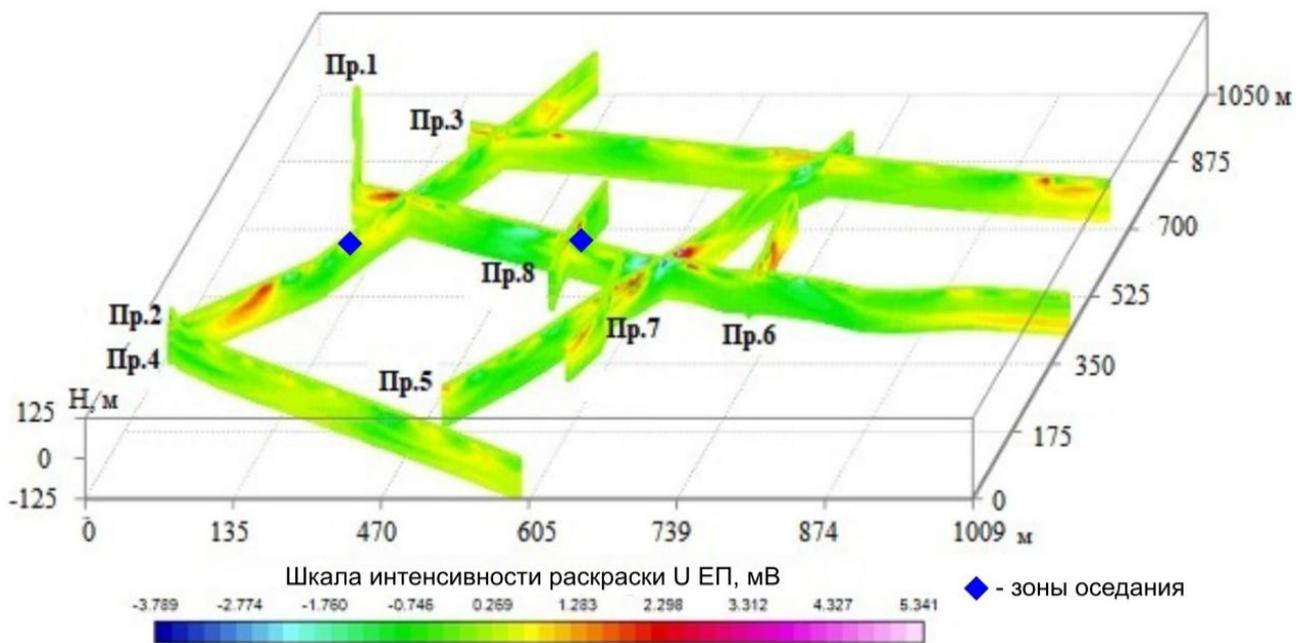


Рис. 6. Относительное распределение потенциала естественного поля

Выполненные преобразования и оценки распределения потенциала ЕП на глубину, по Б.А. Андрееву, полностью отвечают последнему из перечисленных направлений исследований по комплексированию методов интерпретационной томографии с другими методами интерпретации геофизических полей.

Полученные результаты можно использовать в качестве дополнительной информации при совместном анализе с результатами других методов исследований для определения потенциально возможных зон оседания.

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

#### Библиографический список

Барях А.А., Красноштейн А.Е., Санфиоров И.А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника // Вестн. Пермского научного центра. 2009. № 2. С. 40–49. eLIBRARY ID: 18957498

Барях А.А., Санфиоров И.А., Дягилев Р.А. Мониторинг последствий затопления калийного

рудника // Горный журнал. 2013. № 6. С. 34–39. eLIBRARY ID: 19095939

Димухаметов Д.М., Татаркин А.В., Красильников П.А., Гайнанов Ш.Х., Волошина Ж.Ю. Геотехнический мониторинг и моделирование суффозионного провалообразования на урбанизированных территориях // Вестник Пермского университета. Геология. 2022. № 3 (21). С. 229–236. doi: 10.17072/psu.geol.21.2.229

Долгаль А.С., Бычков С.Г., Костицын В.И. [и др.] О теории и практике интерпретационной томографии геопотенциальных полей // Геофизика. 2012. № 5. С. 8–17.

Никитин А.А., Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: ГНЦ РФ ВНИИгеосистем, 2008. 116 с.

Трусов А.А., Петров А.В. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации – КОСКАД 3D. Геофизика. 2000. № 4. С. 29–33.

Христенко Л.А., Степанов Ю.И. Электротомографические наблюдения при оценке влияния выработанного пространства недр на основание железнодорожной насыпи // Естественные и технические науки. 2014. № 7 (75). С. 58–62. eLIBRARY ID: 22020109

# Interpretation of Electrometric Data in the Study of the Earth's Surface Deformation Processes

A.A. Tainitsky, L.A. Khristenko

Mining Institute, UB RAS,

78a Sibirskaya Str., Perm 614007, Russia. E-mail: liudmila.hristenko@yandex.ru

Interpretation of electrometric (resistivity and natural potential) data in the study of deformation processes of the Earth's surface within the Verkhnekamsk Potash deposit was carried out. Analysis of the distribution of electrical resistivity data was performed. To locate the components of the natural field approximately corresponding to the subsidence zones, we applied a number of transformations such as field division with an adaptive two-dimensional energy filtering algorithm, dispersion assessment, classification and assessment of the potential depth distribution using COSCAD 3D software package. The obtained results might be used for location of the potential subsidence zones.

Key words: *the natural potential, electrical resistivity tomography, filtering, classification.*

## References

- Baryakh A.A., Sanfirov I.A., Dyagilev R.N. 2013. Monitoring posledstviy zatopleniya kaliynogo rudnika [Monitoring the consequences of flooding a potash mine]. *Gornyy Zhurnal*. 6:34-39. (in Russian)
- Baryakh A.A., Krasnoshtein A.E., Sanfirov I.A. 2009. Gornotekhnicheskiye avarii: zatopleniye Pervogo Bereznikovskogo kaliynogo rudnika [Mining accidents: flooding of the First Bereznikovskiy potash mine]. *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra*. 2: 40-49. (in Russian)
- Dimukhametov D.M., Tatarkin A.V., Krasilnikov P.A., Gainanov Sh.Kh, Voloshina Zh.Yu. 2022. Geotekhnicheskiy monitoring i modelirovaniye suffuzionnogo provalooobrazovaniya na urbanizirovannykh territoriyakh [Geotechnical Monitoring and Modeling of Suffusion Sinkhole Formation in Urban Areas]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 3(21):229–236. (in Russian) doi: 10.17072/psu.geol.21.2.229
- Dolgal A.S., Bychkov S.G., Kostitsyn V.I., Novikova P.N., Pugin A.V., Rashidov V.A., Sharkhimullin A.F. 2012. O teorii i praktike interpretatsionnoy tomografii geopotentsialnykh poley [About the theory and practice of the interpretational tomography of geopotential fields]. *Geofizika*. 5:8–17. (in Russian)
- Nikitin A.A., Petrov A.V. 2008. Teoreticheskiye osnovy obrabotki geofizicheskoy informatsii [Theoretical foundations of geophysical information processing]. Moskva, GNTS RF VNIIGeosistem, p. 116. (in Russian)
- Trusov A.A., Petrov A.V. 2000. Kompyuternaya tekhnologiya statisticheskogo i spektralno-korrelyatsionnogo analiza trekhmernoy geoinformatsii – KOSKAD 3D [Computer technology for statistical and spectral-correlation analysis of three-dimensional geological data – COSCAD 3D]. *Geofizika*. 4:29–33. (in Russian)