

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ РЕШЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов

*Горный институт Уральского отделения РАН, ул. Сибирская, 78а, Пермь 614007, Российская Федерация,
e-mail: liudmila.hristenko@yandex.ru; stepanov@mi-perm.ru*

Интерпретация данных полевых измерений методами электропрофилирования чаще всего основана на простейших приемах оценки глубин и размеров тел или на качественном анализе, что влечет неоднозначность выводов о наличии и природе явлений, вызвавших изменения наблюдаемых параметров. Анализ статистических характеристик потенциалов естественного поля (ЕП) и кажущегося сопротивления (КС) с помощью аппарата теории оценок позволяет значительно увеличить объем полезной информации и более четко проследить неявно выраженные в наблюдаемых полях особенности геологического строения. Разбиение на классы многопризнакового пространства методами безэталонной классификации существенно облегчает локализацию участков возможных инженерно-геологических осложнений. Исходными данными служили значения потенциалов ЕП и КС, полученные при выполнении профильных измерений в пределах Верхнекамского месторождения солей. Расчеты выполнялись с помощью модулей “КОСКАД-ПРОФИЛЬ” и “КОСКАД 2D” программного комплекса “КОСКАД 3D”. Результаты приведены по отдельно взятому профилю и по площади, сформированной из интерполированных по нескольким профилям значений потенциалов ЕП и КС. В результате интерпретации многомерных данных по формальным признакам повышена достоверность выводов о геологической природе изучаемых явлений и процессов, а также выделены зоны инженерно-геологических осложнений.

Ключевые слова: естественное электрическое поле, кажущееся сопротивление, статистические характеристики, классы, инженерно-геологические осложнения.

Электроразведка позволяет получить высокую детальность изучения геологической среды на сравнительно небольших глубинах; использовать облегченные измерительные установки, что удешевляет работы и дает возможность проведения повторных наблюдений; повысить точность получаемой информации при комплексировании с другими геофизическими методами [7]. Возможность выделения и оконтуривания участков инженерно-геологических осложнений по результатам электрометрических наблюдений методами естественного поля (ЕП) и кажущегося сопротивления (КС) в модификации симметричного электропрофилирования (СЭП) способствует их широкому использованию в условиях урбанизированных территорий. Однако интерпретация данных полевых измерений ЕП и СЭП чаще всего основана на качественном анализе или на простейших приемах оценки глубин и размеров аномалиеобразующих тел, а это влечет неоднозначность выводов о наличии и природе явлений, вызвавших изменения наблюдаемых параметров. Что касается метода ЕП, то, как отмечалось [5, 6], “несмотря на многолетний опыт использования явления тока течения в гидрогеологических исследованиях, методика анализа полевых данных, как правило, ограничивается изображением на схемах стрелок, направленных по градиенту потенциала ЕП от отрицательных значений к поло-

жительным. Со стрелками отождествляется направление потока подземных вод”. Всегда желательно использовать несколько дополнительных геофизических методов в интегрированной программе исследования, вместо того чтобы полагаться на единственный метод [12]. Многие исследователи, опираясь на свой многолетний опыт, пытаются оценивать полученные результаты моделированием [1]. Имеются примеры успешного использования ЕП для количественного изучения движения подземных вод и калибровки численных фильтрационных моделей [5, 6]. Повысить достоверность интерпретации можно также путем расширения анализируемого признакового пространства за счет формальных признаков, например, статистических характеристик самих наблюдаемых параметров.

Получаемые в результате геолого-геофизических исследований данные в силу объективных причин можно считать выборкой одной или нескольких случайных величин. Это позволяет анализировать их статистические характеристики с помощью аппарата теории оценок. Такой анализ дает возможность существенно увеличить объем полезной для исследователя информации, содержащейся в наблюдениях, позволяет подчеркнуть особенности изменения геополей, оценить закономерности распределения изучаемого параметра, что повышает эффективность процесса геологи-

ческой интерпретации и качество конечных результатов в целом. Среднее, мода, медиана, центральные моменты и другие характеристики случайной величины позволяют подчеркнуть различные свойства функции распределения конкретной случайной величины X : острровершинность, асимметричность, положение среднего значения, степень разбросанности и др. При расчете статистических характеристик в скользящих окнах выявляются закономерности изменения случайной величины X вдоль профиля, по площади или в пространстве. При интерпретации статистических параметров основной интерес представляют области их экстремальных значений, выделение которых дает возможность эффективно решать задачу районирования в сложных физико-геологических условиях [4].

Статистические характеристики и методы безэталонной классификации при интерпретации данных электротри. Профильный вариант. Для оценки влияния выработанного пространства недр Верхнекамского месторождения калийно-магневых солей на участках Свердловской железной дороги проводились профильные исследования основания железнодорожной насыпи методами ЕП и СЭП на двух разносах питающей линии АВ: 110 и 210 м. Для значений потенциалов U ЕП и КС по каждому профилю с помощью программного комплекса “КОСКАД-ПРОФИЛЬ” [3] были рассчитаны в скользящем окне оценки их статистических характеристик (среднего, дисперсии, асимметрии, эксцесса, коэффициента вариации). На рис. 1 в качестве примера приведены статистические характеристики потенциалов ЕП по профилю РЖД5-3.

Рассчитанные статистики были использованы в качестве вспомогательных признаков для безэталонной классификации геоэлектрических полей (методами общего расстояния и динамиче-

ских сгущений). Эвристические методы классификации, реализованные в комплексе спектрально-корреляционного анализа данных “КОСКАД 3D” [3] 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. Основная идея заключается в том, что совокупность объектов, находящихся на одинаковом расстоянии от каждого из k эталонов, образует компактную группу.

На рис. 2 показаны результаты разбиения на классы многопризнаковых данных, полученные в результате объединения значений потенциалов U ЕП, КС и их статистических характеристик, методом динамических сгущений с автоматическим определением количества классов.

Алгоритм представляет собой вариант метода классификации многопризнаковых наблюдений на заранее известное число классов k в условиях минимума информации о начальных центрах классов, известный под названием k -средних или k -ближайших соседей. В основе метода лежит итерационный процесс, позволяющий объединять в один класс точки, которые расположены ближе всего (в L2- или L1-метрике) к центру класса. В результате классификации локализован участок инженерно-геологического осложнения между пикетами 180–250 м, не выявленный при качественном анализе графиков поля.

Выявленная по данным ВЭЗ низкоомная зона (пк 1420–1900, м) в нижней части надсоляных отложений, пространственно совпадающая с местоположением Зырянского сдвига, была выделена процедурой классификации при объединении всего двух признаков: потенциалов ЕП и КС [9].

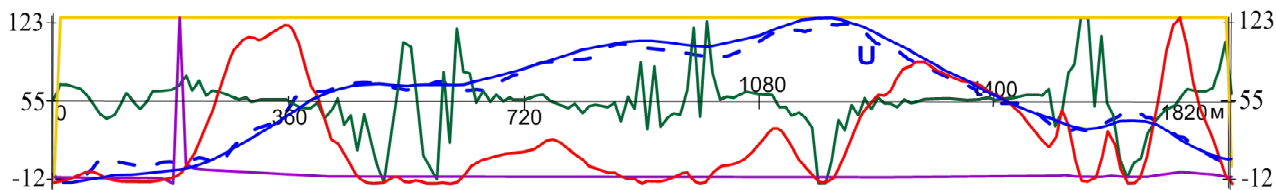


Рис. 1. Статистические характеристики потенциалов ЕП по профилю РЖД5-3: синий цвет – среднее, красный – дисперсия, зеленый – асимметрия, желтый – эксцесс, фиолетовый – коэффициент вариации

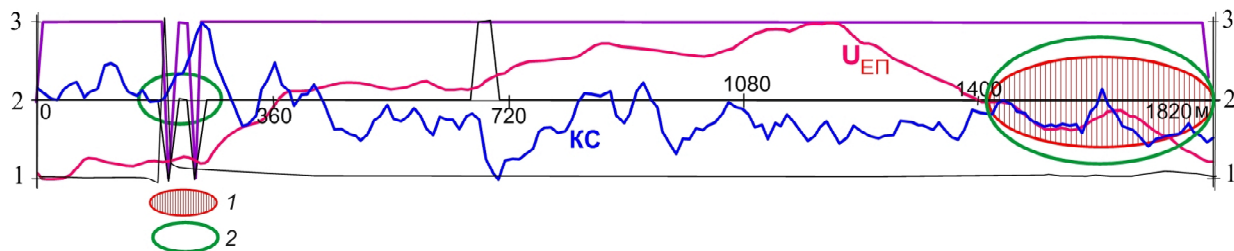


Рис. 2. Результаты интерпретации по профилю РЖД5-3: 1 – зона разуплотнения, полученная по данным ВЭЗ; 2 – зона повышенной фильтрации

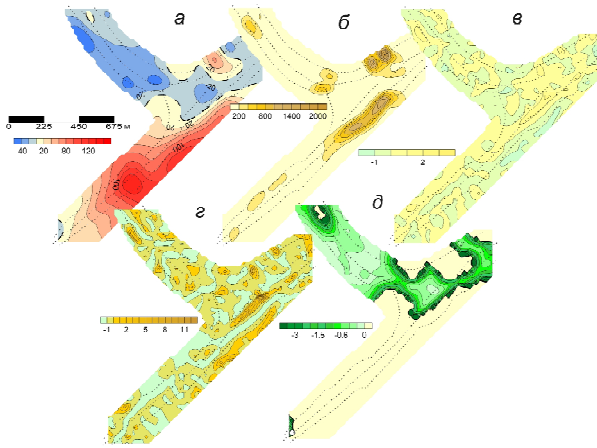


Рис. 3. Статистические характеристики потенциалов ЕП в скользящем окне: а – среднее, б – дисперсия, в – асимметрия, г – эксцесс, д – коэффициент вариации

Протяженность профиля, отвечающего на графиках участку пониженных значений U и КС составляет около 400 м, поэтому достаточно легко провести качественную оценку. Выделить участок протяженностью 70 м при таких частотных и амплитудных изменениях графиков визуально невозможно, а разбиение геоэлектрических параметров на классы по формальным признакам существенно облегчает локализацию участков инженерно-геологических осложнений.

Площадной вариант. Чтобы выделить зоны возможных инженерно-геологических осложнений по единым критериям, целесообразно выполнить классификацию общего признакового пространства по двум сближенным участкам исследований – РЖД4 и РЖД5. Измерения на субпараллельных и практически равноудаленных профилях рассматривались как площадные. Значения потенциалов ЕП и КС интерполировались

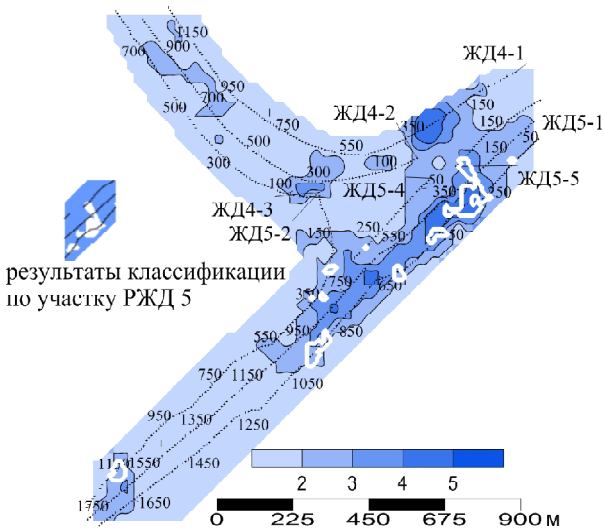


Рис. 4. Результаты классификации многомерных данных

в узлы регулярной сети. Значения потенциалов ЕП по профилям предварительно увязывались между собой.

Программным комплексом “КОСКАД 2D” по геофизическим полям в скользящем окне рассчитывались статистические характеристики. На рис. 3, в качестве примера показаны полученные статистические характеристики потенциалов ЕП. Видно, что максимальные значения поля дисперсии потенциалов U ЕП тяготеют к границам аномальных областей. Минимальные и максимальные значения асимметрии и эксцесса U ЕП также приурочены к границам аномалий. Каждая статистическая характеристика позволяет более четко проследить неявно выраженные в наблюдаемых полях особенности геологического строения. Рассчитанные статистики U ЕП и КС на двух расстояниях АВ и сами наблюдаемые параметры (всего 15) объединялись в многопризнаковое пространство, структура которого анализировалась с помощью методов безэталонной классификации (общего расстояния и динамических сгущений).

Сравнение полученных результатов классификаций с результатами сейсмических и газогеохимических исследований показало, что наиболее содержательные контуры классов позволил получить метод динамических сгущений (рис. 4).

Области, оконтуренные границами 3–5 классов, пространственно совпадают с осложнениями волнового поля и аномалиями, зафиксированными методом газогеохимического опробования (рис. 5). Большинство отличных от фона классов приурочено к площади РЖД5. Контурами белого цвета на рис. 4 вынесены результаты классификации, выполненные ранее [9, 10] только по участку РЖД5. Видно, что увеличение размерности признакового пространства позволило лучше

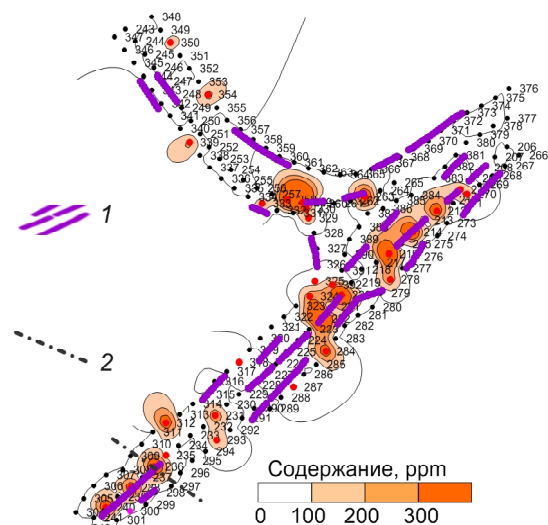


Рис. 5. Результаты газогеохимического опробования [2]: 1 – осложнения волнового поля, выделенные по результатам сейсмических исследований; 2 – Зырянский сдвиг

учесть особенности полей и выделить устойчивые контуры классов [8, 11].

Пространственное совпадение контуров выделенных классов с зонами повышенной трещиноватости, по которым согласно геохимическим данным осуществляется массоперенос газов в приповерхностную часть разреза [2], может свидетельствовать о наличии сквозных зон вертикальных перетоков подземных вод.

При визуальном качественном анализе наблюдений СЭП и ЕП трудно избежать субъективности в интерпретации. Разбиение на классы многопризнакового пространства существенно облегчает локализацию участков возможных инженерно-геологических осложнений.

Выводы. Использование статистических характеристик геоэлектрических параметров и методов классификации многомерных данных по формальным признакам помогает повысить достоверность выводов о геологической природе возникновения изучаемых явлений и процессов, а также выделить зоны инженерно-геологических осложнений.

1. *Выжва С.А.* Мониторинг процессов подтопления на территории национального комплекса “Экспоцентр Украины” / С.А. Выжва И.И. Онищук, И.В. Цюпа // Геоинформатика. – 2010. – № 1. – С. 66–71.
2. *Оценка влияния горных выработок на объекты инфраструктуры на участках Свердловской железной дороги, находящихся над выработанным пространством участков недр Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей, представленных ОАО “Уралкалий”:* отчет по договору № 250/2011 от 01.02.11 с ОАО “Уралкалий”: в 3 кн. и 1 папке. Кн. 1 / ГИ УрО РАН; рук. И.А. Санфиоров. – Пермь, 2012. – 217 с. – (Фонды ГИ УрО РАН).
3. *Петров А.В.* Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии “КОСКАД 3D” / А.В. Петров, Д.Б. Юдин, Хоу Сюели // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2010. – № 2, вып. 16. – С. 126–132.
4. *Петров А.В.* Теоретические основы обработки геофизических данных: Учеб. пособие. – М.: Моск. гос. геол.-разв. ун-т, 2004. – 37 с.
5. *Титов К.В.* Естественное электрическое поле как средство калибровки геофильтрационных моделей / К.В. Титов, П.К. Коносавский, Ю.Т. Ильин, А. Левочки // Материалы конференции “Современные

проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики” памяти В.А. Мироненко, Санкт-Петербург, 28 февр. – 2 марта 2002 г.: Сб. докл. – Изд-во Санкт-Петерб. гос. ун-та, 2002. – С. 522–532.

6. *Титов К.В.* Перспективы применения методов электроразведки при решении гидрогеологических задач. / К.В. Титов, В.А. Тарасов, А.В. Тарасов, П.К. Коносавский // Разведка и охрана недр. – 2003. – № 4. – С. 64–67.
7. *Хмелевской В.К.* Геофизические методы исследования земной коры. Ч. 2. 1997 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.astronet.ru/db/msg/1173324/page22.html> (дата обращения: 08.06.2015).
8. *Христенко Л.А.* Вероятностно-статистические методы интерпретации данных электроразведки ЕП и СЭП при решении инженерно-геологических задач / Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов // XIVth International Conference – Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, Kiev, 11–14 May 2015. – Kiev, Ukraine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=80207> (дата обращения: 08.06.2015).
9. *Христенко Л.А.* Интерпретация профильных электрометрических наблюдений, выполненных в пределах Верхнекамского месторождения солей / Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов // Международная конференция “Седьмые научные чтения Ю.П. Булашевича «Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей»”, Екатеринбург, 8–13 сент. 2013. – Екатеринбург: Гф УрО РАН, 2013. – С. 327–328.
10. *Христенко Л.А.* Интерпретация электрометрических наблюдений при исследовании основания железнодорожной насыпи / Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: 41-я сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. – Екатеринбург: ИГф УрО РАН, 2014. – С. 269–271.
11. *Христенко Л.А.* Электрометрические наблюдения при оценке влияния выработанного пространства недр на основание железнодорожной насыпи / Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7. – С. 58–62.
12. *Wightman W.E., Jalinoos F., Sirls P., Hanna K.* Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems. Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, CO, Publication No. FHWA-IF-04-021, September 2003. Available at: <http://www.cflhd.gov/resources/agm/> (дата обращения: 08.06.2015).

Поступила в редакцию 02.07.2015 г.

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ГЕОЕЛЕКТРИЧНИХ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ІМОВІРНОСНО-СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ВИРІШЕННІ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ ЗАВДАНЬ

Л.А. Христенко, Ю.І. Степанов

Гірничий інститут Уральського відділення РАН, вул. Сибірська, 78а, Перм 614007, Російська Федерація,
e-mail: liudmila.hristenko@yandex.ru

Інтерпретація даних польових вимірювань методами електропрофілювання найчастіше ґрунтується на найпростіших способах оцінювання глибин і розмірів тіл або на якісному аналізі. Це спричинює неоднозначність висновків про наявність і природу явищ, що зумовили зміни спостережуваних параметрів. Аналіз статистичних характеристик потенціалів природного поля (ПП) і уявного опору (УО) за використання апарату теорії оцінок дає змогу істотно збільшити обсяг корисної інформації та чіткіше прослідкувати неявно виражені у спостережених полях особливості геологічної будови. Розбиття на класи багатопризнакового простору методами безеталонної класифікації істотно полегшує локалізацію ділянок можливих інженерно-геологічних ускладнень. Вихідними даними слугували значення потенціалів ПП і УО, отримані під час виконання профільних вимірів у межах Верхньокамського родовища солей. Розрахунки виконано за допомогою модулів “КОСКАД-ПРОФІЛЬ” і “КОСКАД 2D” програмного комплексу “КОСКАД 3D”. Результати наведено за окремо взятим профілем і за площею, сформованою з інтерпольованих за кількома профілями значень потенціалів ПП і УО. В результаті інтерпретації багатовимірних даних за формальними ознаками підвищено достовірність висновків про геологічну природу досліджуваних явищ і процесів, а також виділено зони інженерно-геологічних ускладнень.

Ключові слова: природне електричне поле, уявний опір, статистичні характеристики, класи, інженерно-геологічні ускладнення.

INTERPRETATION OF GEOELECTRIC DATA USING PROBABILISTIC AND STATISTICAL CHARACTERISTICS IN SOLVING ENGINEERING-GEOLOGICAL PROBLEMS

L.A. Hristenko, Y.I. Stepanov

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 78a Sibirskaya Str., Perm 614007,
Russian Federation, e-mail: liudmila.hristenko@yandex.ru

Purpose. The purpose of the article is to study the possibility of applying the theory of assessments and methods of non-standard classifications to localize areas of possible geotechnical complications in interpreting electric methods of horizontal profiling (self-potential and resistance with a symmetric configuration of the electrodes).

Design/methodology/approach. For self-potential and apparent resistances (ρ_a) statistical characteristics were calculated, which were used as additional data at interpretation. Calculations were carried out by a program complex of the spectral and correlation analysis of “KOSKAD 3D” data. The complex is an effective computer technology of processing geologic-geophysical data. The “KOSKAD 3D” includes algorithms of probabilistic and statistical analysis and splitting of the analyzed square into uniform areas (classes). SP, ρ_a and their statistics were united in a uniform space, its structure being analyzed by means of methods of non-standard classifications.

Findings. The results obtained in classification of geophysical parameters and their statistical characteristics allowed us to localize a number of zones of engineering-geological complications on sites of the railroad located within the developed space of a subsoil of the Verkhnekamsky salts field (Ural, Russia).

Practical value/implications. Statistical characteristics of geoelectric parameters and methods of classification of multidimensional data on formal grounds help to increase reliability of allocating of zones of engineering-geological complications.

Keywords: field of self-potential, apparent resistivity, statistical characteristics, classes, engineering-geological complications.

References:

1. Vyzhva S.A., Onishchuk I.I., Tsyupa I.V. *Monitoring protsessov podtopleniya na territorii natsional'nogo kompleksa “Ekspocentr Ukrainy”* [Monitoring processes of flooding on the territory of national complex “Expocenter of Ukraine”]. *Geoinformatika*, 2010, no. 1, pp. 66-71.
2. Sanfirov I.A. *Otsenka vliyaniya gornyykh vyrabotok na ob'ekty infrastruktury na uchastkakh Sverdlovskoy zheleznoy dorogi, nakhodyashchikhsya nad vyrabotannym prostranstvom uchastkov nedr Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliyno-magnievyykh soley, predstavlenyykh OAO “Uralkaliy”: otchet po dogovoru № 250/2011 ot 01.02.11 s OAO “Uralkaliy”* [Assessment of influence of excavations on objects of infrastructure on the sites of the Sverdlovsk railroad which are over the developed space of subsoil plots of the Verkhnekamsky field of the potassium-magnesium salts presented to corp. “Uralkaliy”]. Perm, *Russian Acad. Sci., Min. Inst. Ural Branch*, 2012, vol. 1, 217 p.
3. Petrov A.V., Yudin D.B., Syueli Khou. *Obrabotka i interpretatsiya geofizicheskikh dannykh metodami veroyatnostno-statisticheskogo podkhoda s ispol'zovaniem komp'yuternoy tekhnologii “KOSKAD 3D”* [Processing and interpretation of

- geophysical data by methods of probabilistic and statistical approach with use of the computer technology “KOSKAD 3D”]. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2010, no. 2, issue 16, pp. 126-132.
4. Petrov A.V. *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskikh dannykh. Uchebnoe posobie* [Theoretical bases of processing of geophysical data. Manual]. Moscow, *Moscow State Geological Prospecting University*, 2004, 37 p.
 5. Titov K.V., Konosavskij P.K., Il'in Ju.T., Levicki A. *Estestvennoe jelektricheskoe pole kak sredstvo kalibrovki geofil'tracionnyh modelej* [Natural electric field as means of calibration of geofiltrational models]. *Sbornik dokladov konferencii "Sovremennye problemy gidrogeologii i gidrogeomehaniki" pamjati V.A. Mironenko* [The proceedings of the conference “Modern problems of hydrogeology and hydrogeomechanical” to the memory of V.A. Mironenko]. St. Petersburg, *St. Petersburg State University*, 2002, pp. 522-532.
 6. Titov K.V., Tarasov V.A., Tarasov A.V., Konosavskij P.K. *Perspektivy primeneniya metodov jelektrorazvedki pri reshenii gidrogeologicheskikh zadach* [Prospects of application of methods of electrical prospecting in solving hydrogeological problems]. *Razvedka i ohrana neдр*, 2003, no. 4, pp. 64-67.
 7. Hmelevskoj V.K. *Geofizicheskie metody issledovanija zemnoj kory. Chast' 2.* [Geophysical methods of studying the earth's crust. Part 2]. 1997. Available at: <http://www.astronet.ru/db/msg/1173324/page22.html> (accessed: 8 June 2015).
 8. Hristenko L.A., Stepanov Ju.I. *Veroyatnostno-statisticheskie metody interpretacii dannyh jelektrorazvedki EP i SJeP pri reshenii inzhenerno-geologicheskikh zadach* [Probabilistic-statistical methods of data interpretation of electrical prospecting EP and SEP in the solution of geological engineering problems]. XIVth International Conference - Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 11–14 May 2015, Kiev, Ukraine, 2015. Available at: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=80207> (accessed: 8 June 2015).
 9. Hristenko L.A., Stepanov Ju.I. *Interpretacija profil'nyh jelektrometriческих nabljudenij, vpolnennyh v predelakh Verhnekamskogo mestorozhdenija solej* [Interpretation of electrometric profiling observations within the Verhnekamskoye Deposit of salts]. *Mezhdunarodnaja konferencija "Sed'mye nauchnye chtenija Ju.P. Bulashevicha" Glubinnoe stroenie, geodinamika, teplovoe pole Zemli, interpretacija geofizicheskikh polej, 8-13 sentjabrja 2013, Ekaterinburg* [International conference “Seventh scientific reading of Yu. Ulasevich” Deep structure, geodynamics, thermal field of the Earth, interpretation of geophysical fields]. Ekaterinburg, *Russian Acad. Sci., Inst. of Geophysics Ural Branch*, (Institut geofiziki Ural'skogo otdeleniya Rossiyskoy Akademii nauk), 2013, pp. 327-328.
 10. Hristenko L.A., Stepanov Ju.I. *Interpretacija jelektrometriческих nabljudenij pri issledovanii osnovanija zheleznodorozhnoj nasypi* [Interpretation of resistivity observations in the study of the foot of the railway embankment]. *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretacii gravitacionnyh, magnitnyh i jelektricheskikh polej: 41-ja ses. Mezhdunar. seminara im. D.G. Uspenskogo* [The theory and practice of geological interpretation of gravity, magnetic and electric fields: 41-I SES. Intern. workshop them. D.G. Uspensky]. Ekaterinburg, *Russian Acad. Sci., Inst. of Geophysics Ural Branch*, (Institut geofiziki Ural'skogo otdeleniya Rossiyskoy Akademii nauk), 2014, pp. 269-271.
 11. Hristenko L.A., Stepanov Ju.I. *Jelektrometriческие nabljudeniya pri ocenke vlijaniya vyrabotannogo prostranstva neдр na osnovanie zheleznodorozhnoj nasypi* [Electrometric observations when assessing the influence of a goaf of the subsoil at the base of the railway embankment]. *Estestvennye i tehničeskie nauki*, 2014, no. 7, pp. 58-62.
 12. Wightman W.E., Jalinoos F., Sirls P., Hanna K. Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems. Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, CO, Publication No. FHWA-IF-04-021, September 2003. Available at: <http://www.cflhd.gov/resources/agm/> (accessed: 8 June 2015).

Received 02/07/2015