

**ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Плотность пород, слагающих рельеф  (г/см куб)

Исходная ведомость пунктов

Результатирующая ведомость

Режим работы

по инструкции

по новым стандартам

по всем

**Параметры расчета по новым стандартам**

Нормальное поле

Гельмерт (1909)

Сомильяна (1929)

Геоид

Атмосфера

Поправка за высоту

0.3086\*N

Маловичко

Ремпель

Каленицкий

Hinze

Серкеров

Конешов

новый стандарт

Поправка за промежуточный слой

0.0419sH

Каленицкий

Bullard

Радиус учета (км)

Рис. 1. Интерфейс программы «Первичная обработка гравиметрических данных»

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18–35–00299 мол\_а.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долгаль А.С., Бычков С.Г., Костицын В.И., Симанов А.А., Хохлова В.В. Моделирование гравитационных эффектов, обусловленных влиянием сферичности Земли // Геофизика. – 2018. – № 5. – С. 50–56.
2. Долгаль А.С., Бычков С.Г., Костицын В.И., Симанов А.А., Хохлова В.В. Оценка искажений аномалий силы тяжести, обусловленных влиянием сферичности Земли // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: сб. науч. тр. Вып. 1 (46) / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2019. – С. 121–126.
3. Хохлова В.В. Алгоритм расчета радиальной составляющей силы тяжести // Горное эхо. – 2019. – № 3 (76). – С. 43–45. DOI: 10.7242/echo.2019.3.12.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2020.2.15

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕДКИХ СОЧЕТАНИЙ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Л.А. Христенко

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Одним из методов безэталонного прогнозирования является метод редких сочетаний (МРС). В МРС каждой точке сети наблюдений соответствует определенная относительная частота встречаемости, рассчитанная как отношение числа значений поля, попадающих в заданный интервал амплитуд, к общему числу точек. Матрицы относительных частот рассчитываются для различных геофизических полей, их трансформант, формализованных геологических признаков. Результативная матрица представляет собой суммарный частотный спектр. Минимальные значения параметра МРС (частоты) отвечают наиболее редким сочетаниям всех использованных признаков. Эффективность использования МРС для электроразведочных параметров была подтверждена сопоставлением его результатов с результатами, полученными ранее методом общего расстояния на участке, расположенном в пределах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Устойчивое выделение областей предполагаемых инженерно-геологических осложнений двумя методами безэталонного прогнозирования, имеющими

различный математический аппарат, подтверждает существование осложнений природного или техногенного происхождения в их пределах.

**Ключевые слова:** частота встречаемости признака, суммарный частотный спектр, кажущееся сопротивление, потенциал естественного поля, статистические характеристики.

Электроразведка входит в комплекс методов, используемых при решении различных геологических и горнотехнических задач, связанных с обеспечением эффективности и безопасности отработки соляных месторождений. При изучении общих закономерностей изменения электрических свойств солевых и надсолевых отложений, для оценки физического состояния водозащитной толщи, картирования водоносных горизонтов и др. применяются наземные методы, позволяющие выделять особенности геологического строения исследуемых участков (Колесников, 2007). Повышение достоверности и информативности результатов интерпретации естественных и искусственных электрических полей – основная цель, на реализацию которой направлены представленные исследования, как и все ранее выполняемые единолично или в соавторстве.

Система комплексного мониторинга, включающая симметричное электропрофилирование (СЭП) и метод естественного поля (ЕП), позволяет получить высокую детальность изучения геологической среды на сравнительно небольших глубинах, повысить точность получаемой информации при комплексировании с другими геолого-геофизическими методами. Но качественная интерпретация данных полевых измерений ЕП и СЭП или простейшие приемы определения глубин и размеров аномалиеобразующих объектов приводят к неоднозначности выводов о природе явлений, вызвавших изменения наблюдаемых параметров.

«Многообразие факторов, оказывающих влияние на величину сопротивления, является, с одной стороны, физической предпосылкой применимости методов электроразведки для решения тех или иных задач, связанных с изучением геологического строения и физического состояния геологической среды, с другой – предъявляет повышенные требования к способам геологического истолкования, которые обеспечивали бы необходимую однозначность и достоверность получаемых материалов» (Колесников, 2007).

В рамках гранта РФФИ в 2016-2019 гг. решалась задача определения эффективного набора процедур для обработки и интерпретации данных электрометрических наблюдений при использовании вейвлет-преобразований и методов вероятностно-статистического подхода. Исследованиями авторов установлено, что использование быстрого вейвлет-преобразования (БВП) в качестве процедуры предварительной подготовки данных позволяет уточнить пространственное положение комплексных геофизических аномалий (Христенко, 2016; Христенко и др., 2017; Hristenko et al., 2018; Khristenko et al., 2019). Но использование вейвлет-преобразований значений потенциала естественного поля  $U_{ЕП}$  не дало значимых различий по сравнению с процедурой осреднения в скользящих окнах, поэтому дальнейшие перспективы выделения информативных составляющих физических полей, в том числе ЕП, были связаны с использованием эмпирической модовой декомпозиции (Empirical Mode Decomposition – EMD). Метод предназначен для частотного представления нестационарных сигналов, как и вейвлет-преобразование, но его отличительной особенностью является отсутствие априорно заданного функционального базиса разложения (Долгаль, Христенко, 2017).

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 (Петров, 2004).

Результаты анализа статистических характеристик значений  $U_{ЕП}$  и КС с помощью аппарата теории оценок позволили существенно увеличить объем полезной

информации и более четко проследить неявно выраженные в наблюдаемых полях геопроцессы и особенности геологического строения. Характеристики распределения эффективно используются в задачах районирования классификационными программами, в том числе и программного комплекса КОСКАД–3D (Петров и др. 2010), который использовался для расчета самих статистических характеристик и дальнейшего их анализа (Христенко, Степанов, 2014; Христенко и др. 2017; Hristenko et al., 2018; Khristenko et al., 2019).

Эффективность геофизических исследований в значительной мере определяется технологией извлечения информации из данных полевых геофизических наблюдений. Как отмечал В.Н. Страхов (1979): «Оптимальность (полноценность) итога в интерпретационной системе должна достигаться за счет использования многих неоптимальных (не дающих нужного конечного итога) технологий извлечения информации из данных наблюдений». Реализацией его идеи системной оптимизации является объединение различных методов в единую технологическую цепочку (Долгаль, 1999). Наиболее достоверными являются результаты комплексной интерпретации, которые устойчиво выявляются в рамках различных моделей (методов) извлечения информации из исходных данных (Долгаль, Христенко, 2001).

Для проверки достоверности выполненных ранее преобразований автором был использован еще один из методов безэталонного прогнозирования – так называемый метод редких сочетаний (МРС), предложенный и апробированный Н.Н. Боровко в 1973 г. на золоторудных и редкометальных месторождениях Казахстана.

Существенным недостатком эвристических методов, к которым относятся методы безэталонного прогнозирования, является то обстоятельство, что они строятся в предположении независимости отдельных признаков между собой, но большинство геологических объектов образуются не случайно, а закономерно, и результаты каждого наблюдения в выборке в той или иной степени зависят от других наблюдений. Область применения статистических моделей в геологии поэтому весьма ограничена. Однако наличие отдельных недостатков не уменьшает их значимости в обработке геолого-геофизических наблюдений. В прикладных задачах эвристические алгоритмы стали применяться одними из первых и до сих пор сохраняют большое значение благодаря наглядности полученных результатов и простоте реализации. Каждой точке сети наблюдений отвечает (соответствует) определенная вероятность или относительная частота встречаемости, рассчитанная как отношение числа значений поля, попадающих в заданный интервал амплитуд, к общему числу точек поля. В статистике эти величины называются частотами, на основании которых строят графики распределения вероятностей значений выборки (Дэвис, 1990). Матрицы относительных частот, рассчитанные для различных полей и их трансформант, суммируются. Результативная матрица представляет собой суммарный частотный спектр. Минимальные значения параметра МРС отвечают редким сочетаниям всех использованных при суммировании признаков (наиболее аномальным в широком смысле), т.е. являются индикаторами наличия слабо распространенных на данной площади геопроцессов или геологических образований.

Усовершенствованный в 2001 г алгоритм МРС был реализован в программе MRS, написанной с помощью системы визуального объектно-ориентированного программирования Delphi 4. Число интервалов или классов группирования программа рассчитывает автоматически используя формулу Стерджеса:

$$k=1+3,332*\lg N,$$

где N – объем выборки.

При аппроксимации эмпирических распределений свойств геологических объектов и геофизических полей чаще всего используется нормальный и логнормальный законы. Нормальному распределению подчиняется случайная техническая погрешность опробования, распределение содержаний породообразующих минералов и химических элементов в горных породах, распределение плотности руд, их объемной массы и пористости, содержание некоторых полезных компонентов в рудах, когда они составляют целые % и т.д. Логнормальным распределением характеризуются, например, содержания элементов в рудах редких, цветных и благородных металлов, электрическое сопротивление горных пород и др. Поэтому в программе MRS предусмотрена возможность предварительного выполнения преобразования логнормального распределения параметра  $x$  к нормальному:  $x = \ln(x)$ . Зафиксировано число интервалов разбиения амплитуд признака при построении единичного частотного спектра (в программе MRS оно составляет 100), что позволяет повысить устойчивость решений. Это позволяет работать с самыми различными трансформантами наблюдаемых полей, не связывая процесс вычисления частотного спектра с характеристикой точности задания анализируемого параметра, как было принято ранее.

Эффективность использования MRS для электроразведочных данных была проверена на участке, расположенном в пределах шахтного поля БКПРУ-2 Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (рис. 1). Детальные исследования по 7 профилям выполнялись методами естественного поля и трехразносного симметричного электропрофилирования с полуразносами питающей линии АВ 50, 125 и 250 м. Шаг измерений MN составлял 10 м. Исходными признаками для формирования матриц MRS служили статистические характеристики электрических параметров (значений потенциала естественного поля  $U_{ЕП}$  и кажущихся сопротивлений КС). Поскольку интервалы изменений значений кажущихся сопротивлений на всех разносах питающей линии варьируют в пределах одной декады (порядка) и характер их распределений близок к нормальному закону (рис. 2), логнормальное преобразование не выполнялось.

Количество матриц, в данном случае 3, определялось числом разносов питающей линии АВ. Формировались матрицы MRS путем поочередного суммирования относительных частот статистик, которые были рассчитаны для значений  $U_{ЕП}$  и КС, полученных, соответственно, на разносах  $AB/2=50, 125$  и  $250$  м.

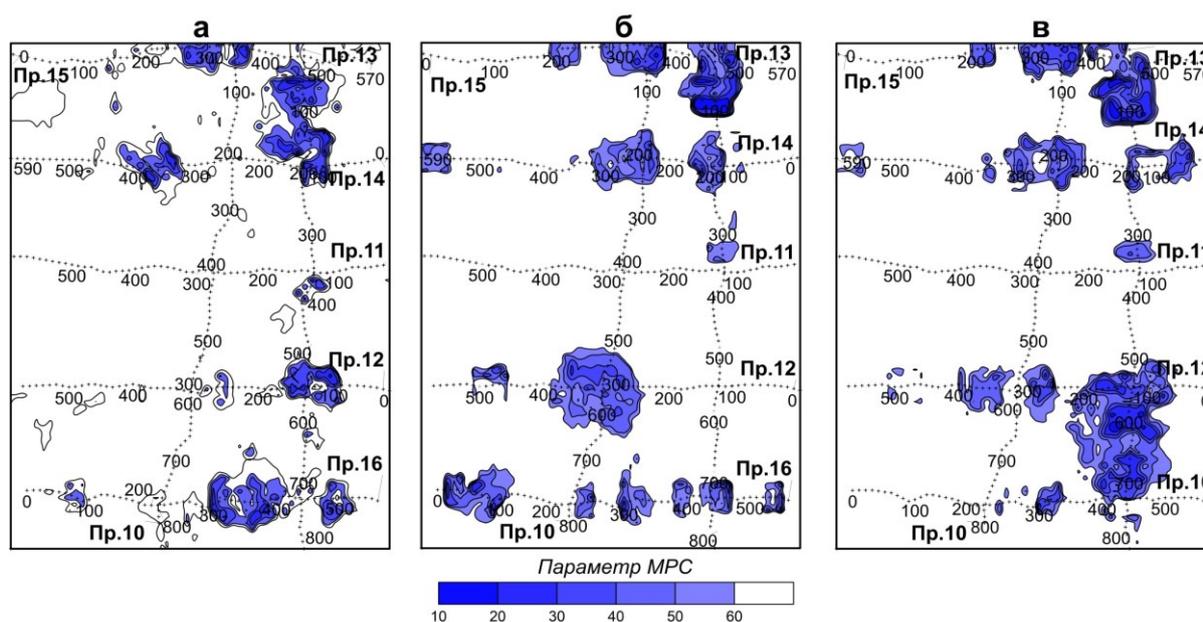
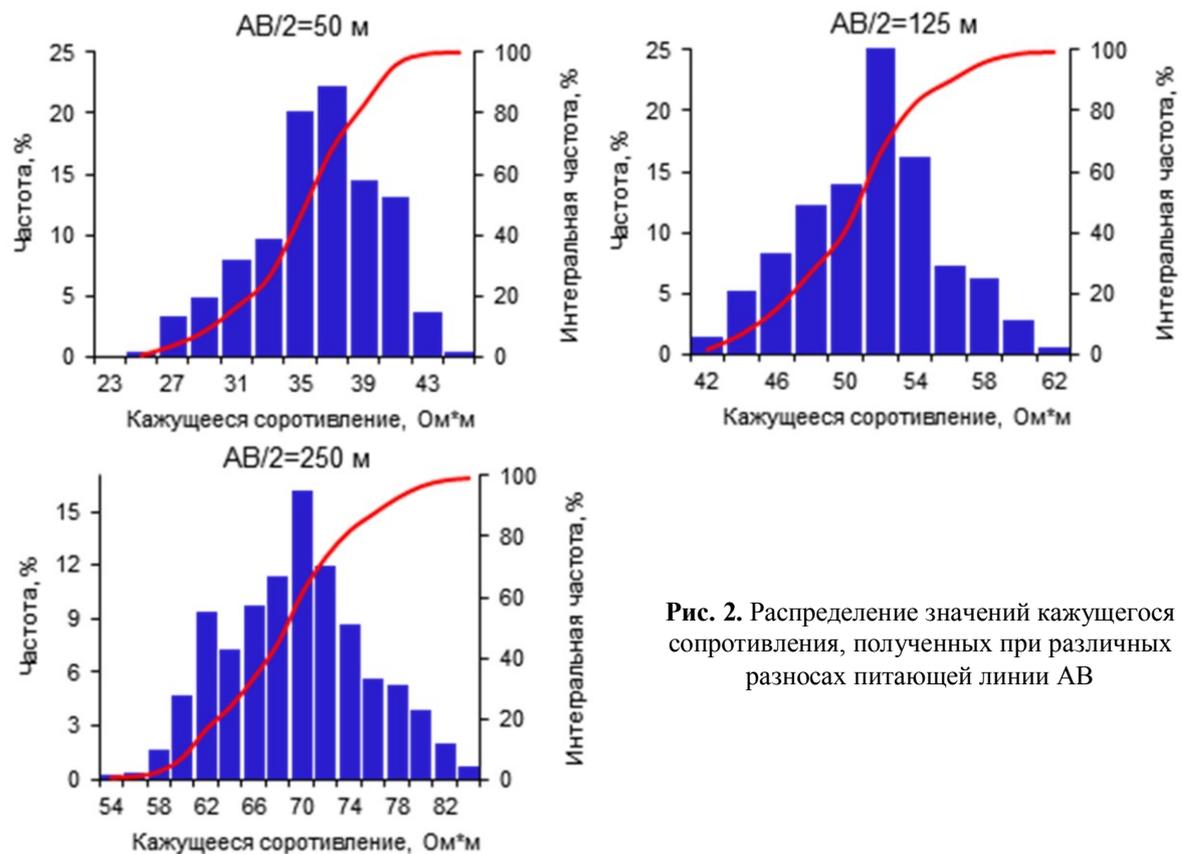


Рис. 1. Области низких значений параметра MRS

Кажущиеся сопротивления получены на полуразносах питающей линии АВ: а) 50; б) 125; в) 250 метров.



**Рис. 2.** Распределение значений кажущегося сопротивления, полученных при различных разносах питающей линии АВ

Положение областей, выделенных на участке исследования при использовании МРС, пространственно согласуется с контурами наиболее содержательных классов, полученных методом общего расстояния (Христенко и др., 2017).

Таким образом, области предполагаемых инженерно-геологических осложнений устойчиво выделяются двумя методами, имеющими различный математический аппарат. Это, с одной стороны, подтверждает достоверность выполненных преобразований, а с другой стороны – существование осложнений природного или техногенного происхождения в пределах выделенных областей.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-05-00654 А).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боровко Н.Н. Количественный анализ поисковых критериев крупных эндогенных рудных месторождений // Веселов В.В. Месторождение важнейших металлических полезных ископаемых: Обзор. – М., 1973. – 63 с. – (Геология, методы поисков и разведки месторождений металлических полезных ископаемых).
2. Долгаль А.С. Аналитические аппроксимации геопотенциальных полей и их практическое применение // Геофизический журнал. – 1999. – № 4. – С. 41-50.
3. Долгаль А.С., Христенко Л.А. Локальное прогнозирование золотого оруденения в Ольховско-Чибижском рудном районе // Геофизические методы поисков и разведки. Технология и техника геологоразведочных работ, горное дело: Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Горно-геологическое образование в Сибири. 100 лет на службе науки и производства» / ТПУ. – Томск, 2001. – С. 150-153.
4. Долгаль А.С., Христенко Л.А. Применение эмпирической модовой декомпозиции при обработке геофизических данных // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 100-108.

5. Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии: В 2 кн. Кн. 1. – М.: Недра, 1990. – 319с.
6. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. – М.: Науч. мир, 2007. – 247 с.
7. Петров А.В. Теоретические основы обработки геофизических данных: Учеб. пособие. – М., 2004. – 37с.
8. Петров А.В., Юдин Д.Б., Хоу Сюели Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2010. – № 2, Вып. 16. – С. 126-132.
9. Страхов В.Н. Основные идеи и методы извлечения информации из данных гравитационных и магнитных наблюдений. // Теория и методика интерпретации гравитационных и магнитных аномалий: [сб. ст.] / Ин-т Физики Земли АН СССР. – М.: ИФЗ, 1979. – С. 146-269.
10. Христенко Л.А. Использование вейвлет-преобразования при интерпретации электроразведочных данных (на примере ВКМКС) // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Сб. ст. по материалам юбилейной конф., посвящ. 100-летию Перм. ун-та и 85-летию геологич. ф-та / ПГНИУ; под общ. ред. Р.Г. Ибламинова. – Пермь, 2016. – С. 143-146.
11. 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.
12. Христенко Л.А., Степанов Ю.И., Кичигин А.В., Паршаков Е.И., Тайницкий А.А., Ширяев К.Н. Совершенствование интерпретации данных мониторинговых электроразведочных наблюдений с помощью аппарата теории оценок // Инженерная геофизика 2017: материалы 13-й науч.-практ. конф. и выставки. – Кисловодск, 2017. – DOI 10.3997/2214-4609.201700419. Электрон. изд. режим доступа:
13. Hristenko L., Stepanov Yu., Kichigin A., Parshakov E., Tainitsky A. Interpretation of electroprospecting monitoring observations with use of probabilistic-statistical characteristics // Engineering and mining Geophysics 2018: 14th Conference & Exhibition, 23-27 april 2018. – Almaty, 2018. – code 137600. DOI: 10.3997/2214-4609.201800511.
14. Khristenko L.A., Stepanov Ju.I., Kichigin A.V., Parshakov E.I., Tainitskiy A.A., Shiryayev K.N. Using of Probabilistic-Statistical Characteristics in the Interpretation of Electrical Survey Monitoring Observations // Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields: Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar, Kazan, Russia / ed. D. Nurgaliev, N. Khairullina; Kazan Federal University. – Springer, Cham, 2019. – P. 313-320. – (Book series: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences). DOI: 10.3997/2214-4609. 201700419.

УДК 550.832.4

DOI:10.7242/echo.2020.2.16

## РАЗВИТИЕ МАЛОГЛУБИННЫХ СКВАЖИННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ

А.В. Чугаев

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Приведен обзор скважинных сейсморазведочных методик, применяемых на Верхнекамском месторождении калийных солей для обеспечения безопасности ведения горных работ. Рассмотрены особенности методических решений. Отмечены перспективные направления исследований, которые могут повысить информативность скважинных сейсморазведочных работ.

**Ключевые слова:** межскважинное просвечивание, вертикальное сейсмопрофилирование, сейсмоакустический каротаж, скважинное профилирование ОГТ.

Скважинные сейсморазведочные исследования имеют ряд особенностей по сравнению с наземными. Основным преимуществом скважинных исследований является непосредственная близость к объекту изучения, что избавляет волновое поле от фильтрующего воздействия рыхлых приповерхностных отложений, вследствие чего спектр регистрируемого сигнала существенно выше при сравнимых удалениях источника и приемника, и записи в большинстве случаев имеют более высокое отношение сигнал/шум. В свою очередь, проведение скважинных исследований требует бурения и специального обустройства скважин для выполнения геофизических работ, что существенно увеличивает стоимость и время выполнения таких ис-