

УДК 550.372

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАКТОРНО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ

*Г.С. Хамидуллина, Д.К. Нургалиев, Д.И. Хасанов*

### Аннотация

В статье рассмотрено применение метода главных компонент (факторно-аналитической методики) для интерпретации данных зондирования методом становления поля в ближней зоне. Дано краткое описание подготовки данных зондирования для использования данного метода. Представлены также результаты геологической интерпретации на основе анализа веса факторов (главных компонент) и карт их распределения.

**Ключевые слова:** электропроводность, зондирование методом становления поля в ближней зоне, кривая становления поля, веса факторов, карта распределения факторов.

### Введение

Целью современных геолого-геофизических исследований при поисках углеводородов является расширение ареала нефтеносности продуктивных отложений за счет выделения как по разрезу, так и по площади небольших по размерам залежей и месторождений нефти. Одним из методов нефтегазовой геофизики, хорошо зарекомендовавший себя для изучения геологического строения горизонтально-слоистых осадочных толщ как среды аккумуляции углеводородов, является метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБЗ) [1–3]. Основанный на изучении переходных процессов становления вторичного электромагнитного поля после выключения первичного, метод ЗСБЗ несет информацию о строении как терригенных, так и карбонатных комплексов осадочной толщи, а также прогнозирует глубину залегания кровли фундамента и является одним из структурных методов электроразведки [4–7]. В классической интерпретации данных ЗСБЗ количественные характеристики (например, зависимость  $S_{\tau} \sim f(H)$ , где  $S_{\tau}$  – продольная проводимость, Сим,  $H$  – глубина, м) дают представления о том, в какой части разреза произошло уменьшение или увеличение продольной проводимости. При этом участки возрастания кривой идентифицируются с проводящими толщами (слоями). В результате строятся карты продольной проводимости как отдельных комплексов, так и всей изучаемой осадочной толщи. Результат ЗСБЗ – это преобразование электромагнитного поля с целью получения величин продольных проводимостей по разрезу, суммирующихся с глубиной [5]. Качественный анализ углов наклона кривых  $S_{\tau}$  позволяет выделить проводящие горизонты, которые можно привязать к реальным литолого-стратиграфическим комплексам путем сопоставления петрофизических свойств разреза, полученных при интерпретации

материалов геофизических исследований скважин, с результатами обработанных электромагнитных данных. Полученная в результате интерпретации геоэлектрическая модель представляет собой последовательно переслаивающиеся низкоомные и высокоомные толщи [8, 9]. Отражением субгоризонтальной модели служат карты приращений проводимостей выделенных толщ.

Однако, вероятнее всего, полученная геоэлектрическая информация относится не к одному, а к целому ряду геологических процессов, находящихся друг с другом в различных временных и пространственных взаимоотношениях. Поэтому значения геоэлектрического поля, отражающие реальную геологическую обстановку, следует рассматривать как сумму систематических, закономерных и случайных составляющих, обусловленных действием предполагаемых процессов и некоторых случайных причин. При их изучении весьма эффективными является подход, опирающийся на вероятностное моделирование и на широкое применение факторно-аналитических методов, в частности метода главных компонент (МГК).

В основе МГК лежит предположение о том, что если переменные величины возможно коррелируемы, то это свидетельствует о существовании «внутренних» параметров (факторов), являющихся причинами такой корреляции, но непосредственно не регистрирующихся. МГК был применен к данным ЗСБЗ. В результате была получена новая информация о геоэлектрической модели осадочного чехла и выявлены перспективные зоны с целью поисков углеводородов [10].

### **Общая характеристика объекта изучения**

Данные зондирования методом становления поля удовлетворяют основным критериям применения метода главных компонент:

- геоэлектрические характеристики, отражающие свойства геологической среды, выражены количественно;
- взаимоотношения между переменными отражают внутреннюю структуру геологического строения;
- в исходных данных можно выделить несколько множеств переменных или объектов;
- природа и число определяющих факторов практически неизвестны или мало изучены.

Таким образом, данные зондирования методом становления поля могут быть подвергнуты факторно-аналитическому анализу.

Рассмотрим пример применения МГК к данным зондирования методом становления поля, полученным на площади исследования, расположенной на северо-восточном склоне Южного купола Татарского свода Волжско-Камской антиклизы. Нефтенасыщенными породами на данной территории являются трещиноватые коллекторы среднефранского подъяруса верхнего девона.

Осадочный чехол на площади исследования достигает 2000 м и более. Литологически осадочный чехол условно разделен на ряд переслаивающихся терригенных и карбонатных толщ, которые, в свою очередь, можно рассматривать как зоны повышенных и пониженных проводимостей. Таким образом, например,

на востоке республики на графиках  $S_{\tau} \sim f(H)$  наблюдаются следующие «точки перегиба» [8]:

- точка «а» – подошва верейских отложений;
- точка «b» – кровля тульских отложений;
- точка «f» – кровля высокоомных пород нижней карбонатной толщи;
- точка «g» – кровля нижней терригенной толщи;
- точка «h» – подошва кристаллического фундамента.

Используя классическую интерпретацию данных ЗСБЗ, была построена геоэлектрическая модель осадочного чехла территории исследования, отражением которой служат карты приращений проводимостей выделенных толщ, (см. рис. 1).

Геоэлектрическая модель осадочной толщи содержит следующие карты приращений:

– карта продольной проводимости  $\Delta S$  «b–a» (средняя терригенная толща) (рис. 1, А);

– карта продольной проводимости  $\Delta S$  «d–b» (рис. 1, Б);

– карта продольной проводимости  $\Delta S$  «d–f» (рис. 1, В);

– карта продольной проводимости  $\Delta S$  «h–f» (рис. 1, Г).

Таким образом, получена универсальная «укрупненная» модель разреза, которая может нивелировать распознавание более локальных перспективных объектов.

#### **Методика обработки и интерпретации с использованием многомерного статистического анализа**

Подготовка данных ЗСБЗ к проведению факторно-аналитического анализа заключалась в выполнении следующих процедур:

– вычисление удельной кажущейся электропроводности  $\Delta\sigma$ ;

– построение графика  $\Delta\sigma$ ;

– «стратификация» локальных максимумов  $\Delta\sigma$ ;

– приведение к единым кажущимся глубинам выделенных максимумов  $\Delta\sigma$ , с целью создания коррелирующих данных, для последующего проведения МГК;

– построение матрицы исходных признаков (данные приведенных  $\Delta\sigma$ ).

– транспонирование матрицы исходных признаков (переменных) в матрицу объектов.

В рассматриваемом примере в качестве эталонной кривой выбран пункт наблюдения ЗСБЗ № 20, расположенный вблизи скв. № 2. Полученные приведенные данные  $\Delta\sigma$  представляются как исходные признаки в виде матрицы. Анализируя данные ЗСБЗ и электрокаротажа, можно прийти к выводу, что наиболее достоверная информация о геоэлектрическом разрезе получена с кажущихся глубин 695–700 м, где искажающее влияние верхней части разреза минимально, до кажущихся глубин 1400 м, где кривая  $S_{\tau}(H)$  практически выходит на асимптотику. Таким образом, в преобразовании участвуют кажущиеся удельные электропроводности, отвечающие этим глубинам.

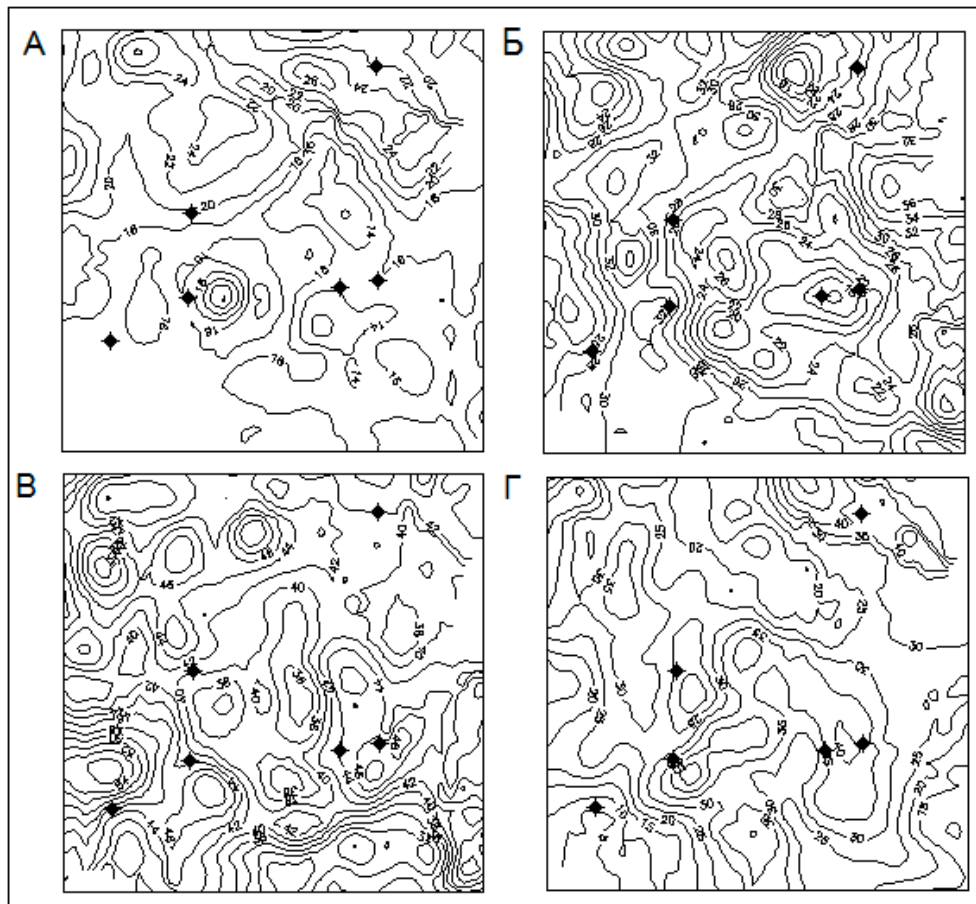


Рис. 1. Геоэлектрическая модель осадочной толщи в области залежи в отложениях среднего подъяруса верхнего девона

Исходные признаки представляются в виде матрицы  $A$ , в которой в строках представлены изменяющиеся с глубиной  $\Delta\sigma$ , а в столбцах – пункты наблюдения ЗСБЗ (в количестве 106). В статистических преобразованиях по МГК использовалась как матрица  $A$  (R-анализ), так и транспонированная матрица  $A^T$  (Q-анализ), где каждой строке соответствует объект – точка наблюдения ЗСБЗ, а столбцу –  $\Delta\sigma$ .

Следующим шагом является анализ веса факторов (компонент). Веса факторов по пунктам наблюдения дают информацию об обобщенной структуре изменчивости проводимости по площади (матрица  $A$ ).

После преобразования матрицы  $A$  веса факторов (компонент) распределились следующим образом: 1-й фактор – 79.57%, 2-й фактор – 7.56%, 3-й фактор – 4.89%. Общий вес трех главных компонент составляет 92.02%, что говорит о высокой корреляции между исходными признаками.

После преобразования матрицы  $A^T$  веса факторов распределились так: 1-й фактор – 40.66%, 2-й фактор – 22.5%, 3-й фактор – 9.04%, 4-й фактор – 7.72%. Общий вес четырех главных компонент составляет 79.92%.

Основным шагом интерпретации является анализ карт распределения компонент.

Карты распределения выделенных факторов (компонент) позволяют провести районирование территории по характеру изменчивости проводимости как по площади, так и по глубине (рис. 2, 3). После анализа веса компонент выясняется смысловое значение факторов, которые вызвали значительную часть изменения кривых.

### Результаты

Поскольку по данным матрицы  $A$  изучалось преобразование между объектами, то веса главных компонент характеризуют удельную электропроводность в целом по разрезу, а карта распределения компонент – по площади. Таким образом, графики весовых нагрузок главных компонент наиболее удобно идентифицировать с изменением  $\Delta\sigma$  по разрезу в целом. При этом наблюдаются следующие закономерности распределения весовых нагрузок факторов (рис. 4).

- График распределения веса первой компоненты фактически повторяет изменение электропроводности по разрезу, но с обратным знаком. При этом наблюдаются отрицательные значения веса главных компонент в зонах проводящих толщ московского яруса и средневизейского подъяруса.

- График распределения веса второй компоненты делит разрез на три комплекса. Области положительного знака в верхней и нижней частях разреза отвечают мячковско-подольскому комплексу московского яруса, что соответствует геоэлектрической модели, и турнейско-франскому комплексу, который рассматривается в модели как высокоомные пласты. Вероятнее всего (а это может быть искомой причиной), на площади исследования есть области, где в турнейско-франском комплексе встречаются зоны, которые соответствуют трещинным карбонатным коллекторам. Область отрицательного знака отвечает каширско-средневизейскому комплексу. В целом комплекс соответствует принятой высокоомной модели, за исключением отложений верейской терригенно-карбонатной толщи, где можно спрогнозировать наличие преобладания карбонатного материала или флюидонасыщенного коллектора.

- График распределения веса третьей компоненты имеет сложное строение. Положительные значения наблюдаются в верхней и нижней частях графика, отвечающие отложениям нижней части подольского и средневизейско-девонскому комплексам соответственно. Следовательно (еще одна возможная причина), можно предположить наличие в разрезе данного типа сильно-трещиноватых карбонатных пород подольского, турнейского и верхнедевонского возраста.

Таким образом, по распределению весов компонент выделяются три типа разреза на рассматриваемой территории. Поскольку по данным матрицы  $A$  изучалось преобразование между объектами, веса главных компонент характеризуют удельную электропроводность в целом по разрезу, а карта распределения компонент позволяет оценить наличие того или иного типа разреза по площади.

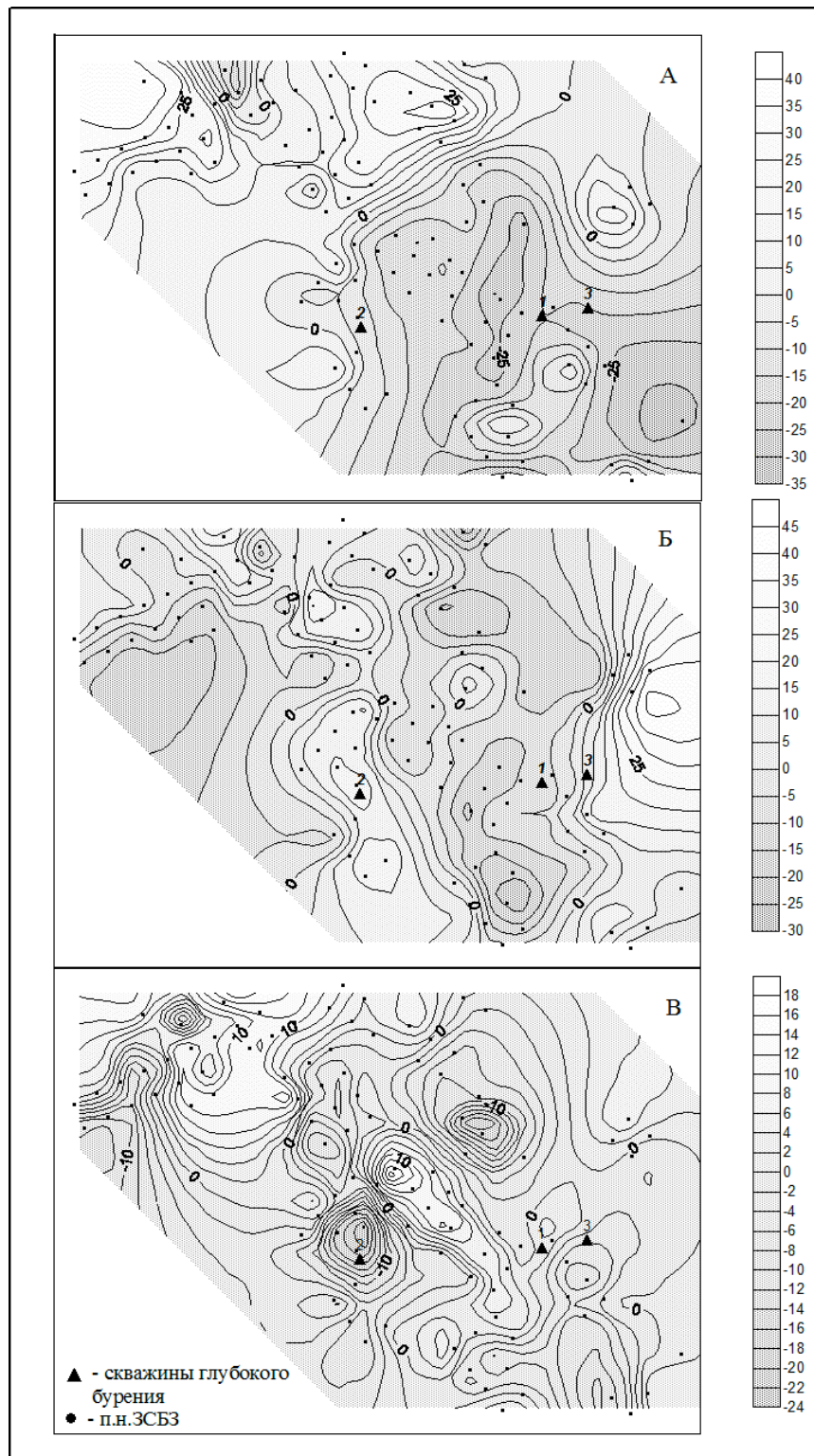


Рис. 2. Карты распределения компонент (R-анализ): А – первая компонента; Б – вторая компонента; В – третья компонента



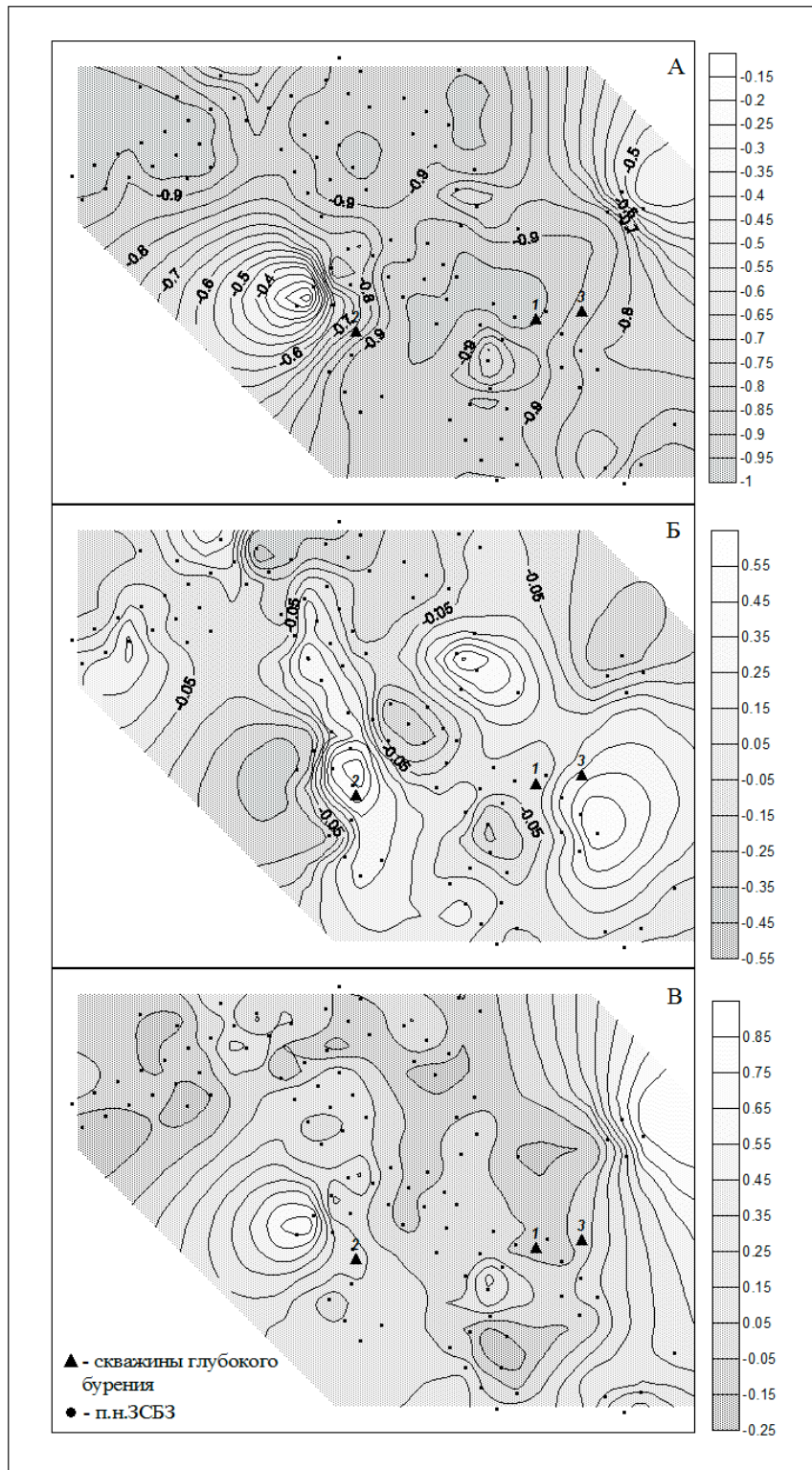


Рис. 3. Карты распределения компонент (Q-анализ): А – первая компонента; Б – вторая компонента; В – третья компонента

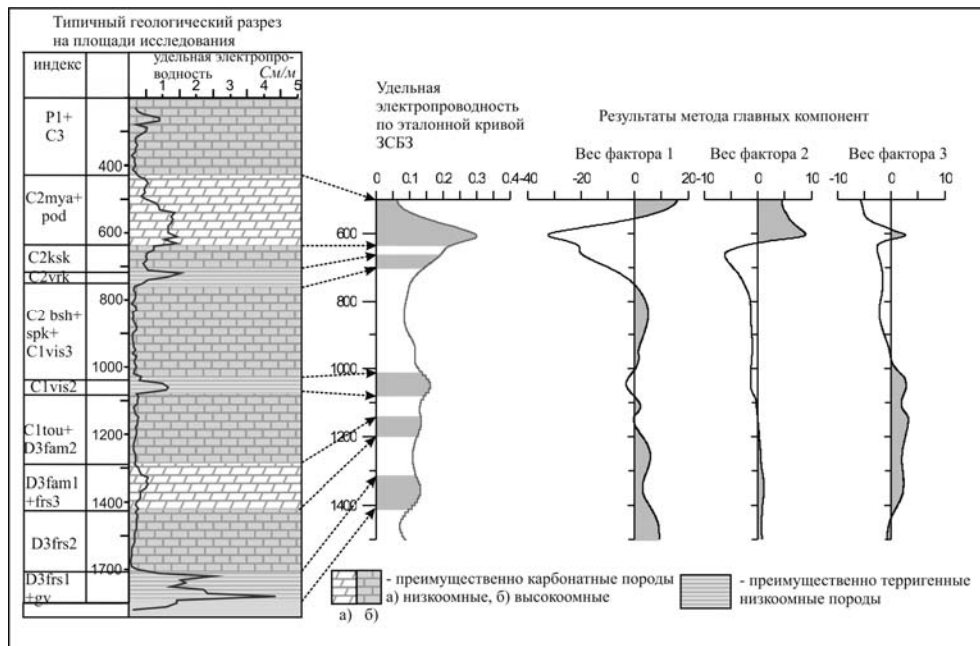


Рис. 4. Сопоставление геоэлектрического разреза, данных геофизических исследований скважины с данными ЗСБЗ и весами факторов

Рассмотрение карты распределения компонент позволяет проследить удельную электропроводность в плане.

На карте распределения первой компоненты видно, что все пункты наблюдения ЗСБЗ расположены в отрицательной области (рис. 2, А). Учитывая, что компонента повторяет эталонную кривую с точностью наоборот, можно предположить, что практически на всех пунктах наблюдения геоэлектрический разрез аналогичен принятой геоэлектрической модели, за исключением области на крайнем северо-востоке и в центрально-западной области.

Второй тип кривых ЗСБЗ распространен по площади фрагментарно в областях положительного знака (рис. 2, Б). Таким образом, можно предположить наличие областей развития трещинных зон-коллекторов в турнейско-франском комплексе. В районе скв. 1 и 3 карбонатные среднефранские отложения нефтенасыщены. В скв. 1 дебит составляет 8.9 т/сут.

Третий тип кривых ЗСБЗ распространен также фрагментарно в центральной и восточной части площади (рис. 2, В).

После анализа факторных нагрузок матрицы  $A^T$  выясняется смысловое значение факторов, которые вызвали значительную часть изменения кривых (рис. 5):

- первая компонента разложилась положительным образом и практически указывает на то, что 40.66% составляет «причина», влияющая на проводимость объекта;

- вторая компонента ведет себя иначе – имеет отрицательные значения в начале кривой. Это вторая «причина», влияющая на проводимость, может быть как положительной, так и отрицательной и составлять 22.5%;





Рис. 5. Графики веса компонент матрицы Q

• третья компонента описывает третью «причину», которая может также менять знак и составлять 9.04%.

Наиболее часто приходится сталкиваться с влиянием на величину удельной электропроводности следующих свойств геологического разреза:

- водонасыщенность породы (влажность);
- минерализация поровой влаги (степень засоленности);
- пористость, структура порового пространства;
- водопроницаемость;
- литологический состав пород, глинистость;
- температура;
- давление.

Вероятнее всего, перечисленные факторы и являются теми причинами, которые влияют на величину электропроводности в целом по всему разрезу.

Первую компоненту можно интерпретировать как влияние водонасыщенности на электропроводность. Вторая компонента может быть связана с засоленностью, а третья, имеющая сложное распределение, — с поровым пространством.

Следовательно, графики весовых нагрузок главных компонент позволяют идентифицировать изменение  $\Delta\sigma$  по разрезу в целом и выделения типов геологического разреза в пределах небольшой территории. Карты распределения компонент указывают на распространения указанных типов разреза. Для полной идентификации геоэлектрического разреза необходимо рассматривать в комплексе все компоненты.

### Заключение

На дифференцированные значения кажущейся продольной проводимости, а значит, и на характер дисперсии свойств разреза влияет неоднородность геоэлектрических свойств, которая отражает строение геологической среды и наличие локализованных в плане и по глубине зон коллекторов, зон разрушений, трещиноватостей и т. д.

Использование факторно-аналитического анализа для интерпретации данных зондирования поля в ближней зоне позволяет проводить экспресс-анализ по типам геоэлектрического разреза без детального рассмотрения каждой кривой ЗСБЗ и перечисления ее к какому-либо типу, а также выявлять скрытые характеристики геоэлектрического разреза.

В результате применения МГК к параметрам электромагнитного поля осуществляется переход от анализа параметров, отображающих свойства геологического разреза, к факторам, определяющим эти свойства. Эти полученные характеристики, подобно исходным признакам, подлежат обработке с помощью любых методов анализа геологической информации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2010-218-01-192).

### Summary

*G.S. Khamidullina, D.K. Nurgaliev, D.I. Khasanov.* Interpretation of the Near-Field Electromagnetic Sounding Data Using Factor-Analytical Techniques.

The article deals with the application of the principal component analysis (factor-analytical techniques) for the interpretation of the near-field electromagnetic sounding data. A brief description of the electromagnetic data preprocessing for using the principal component method is given. The results of the geological interpretation based on the weights of factors (principal components) and the maps of their distribution are presented.

**Key words:** electrical conductivity, near-field electromagnetic sounding, field formation curve, weights of factors, factorial distribution map.

### Литература

1. Каримов К.М., Валеев С.Г., Еронова Е.В., Буткус Е.М. Оценка нефтеперспективности структур в Мелекесской впадине по электромагнитным зондированиям // Гео-ресурсы. – 2005. – № 2 (17). – С. 41–45.
2. Каримов К.М., Шабалин Н.Я., Балахнина Л.Д., Еремина Ю.Н., Козлова Е.В. Геоэлектрическая модель земной коры Татарстана по данным электромагнитных зондирований // Геофизика. – 2003. – Спец. выпуск. – С. 42–46.

3. *Кукуруза В.Д., Смольников Б.М.* Геоэлектрические исследования при поисках залежей нефти и газа. – Киев: Наукова думка, 1984. – 140 с.
4. *Корольков Ю.С.* Зондирование становлением электромагнитного поля для поисков нефти и газа. – М.: Недра, 1987. – 116 с.
5. *Сидоров В.А., Тикишаев В.В.* Электроразведка зондированиями становлением поля в ближней зоне. – Саратов, 1969. – 58 с.
6. *Хмелевской В.К.* Геофизические методы земной коры. Кн. 1. – Дубна: Междунар. ун-т природы, общества и человека «Дубна», 1997. – 184 с.
7. *Якубовский Ю.В., Ренард И.В.* Электроразведка. – М.: Недра, 1991. – 359 с.
8. *Хамидуллина Г.С., Нургалиев Д.К., Хасанов Д.И., Бредников К.И.* Геоэлектрическая модель осадочного чехла центральной части Волжско-Камского региона // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2010. – Т. 152, кн. 4. – С. 9–22.
9. *Хамидуллина Г.С., Хасанов Д.И.* Некоторые методические приемы обработки данных электроразведки становления поля в ближней зоне с целью выявления углеводородов // Нефть. Газ. Новации. – 2009. – № 9. – С. 57–60.
10. *Иберла К.* Факторный анализ. – М.: Статистика, 1980. – 398 с.

Поступила в редакцию  
22.10.12

---

**Хамидуллина Галина Сулеймановна** – старший преподаватель кафедры геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

Е-mail: [galina-khamidullina@yandex.ru](mailto:galina-khamidullina@yandex.ru)

**Нургалиев Данис Карлович** – доктор геолого-минералогических наук, профессор, проректор по научной деятельности Казанского (Приволжского) федерального университета.

Е-mail: [danis.nourgaliev@ksu.ru](mailto:danis.nourgaliev@ksu.ru)

**Хасанов Дамир Ирекович** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

Е-mail: [damir.khassanov@ksu.ru](mailto:damir.khassanov@ksu.ru)