

УДК

О возможности применения математических методов в геологии при проведении фациального анализа*

англ. название статьи

В.Н. Михайлов
контактный телефон
e-mail
/ООО "КНТЦ "Недра",
г. Казань/
Ю.А. Волков
yua@csmr.ru
/ООО "ЦСМРнефть", г. Казань/

Ключевые слова: фациальный анализ, методика литолого-генетической типизации горных пород, кластерный анализ макроописаний керна, фациальная диагностика керна, фациальная интерпретация макроописаний керна, экспертная система, математические методы при проведении фациального анализа, программное обеспечение "Геозор"- "Разрез", инновационное проектирование разработки нефтяных месторождений.

Key words:

Разработана экспертная система (на основе программного комплекса "Геозор"- "Разрез") для литолого-генетической типизации и фациальной диагностики осадочных пород на основе кластерного анализа макроописаний керна. Используемые математические алгоритмы обеспечивают воспроизводимость получаемых результатов. Проведены настройка и тестирование экспертной системы на основе обширной базы знаний, включающей около 1000 макроописаний эталонных образцов, представленных в атласах Ботвинкиной, Александрова, Тимофеева, Алексева, фациальная принадлежность которых считается установленной.

англ АННОТАЦИЯ

Постановка проблемы

На сегодняшний день общепризнано, что без учета закономерностей фациального строения невозможны ни получение качественных петрофизических зависимостей, ни правильная корреляция коллекторов. В настоящее время известно несколько методов изучения генезиса отложений с помощью реконструкции обстановок их формирования. В основе методов лежит определение усло-

вий формирования породы на базе диагностических признаков. Неоднократно предпринимались попытки систематизации диагностических признаков в виде таблиц, в строках которых перечисляются литолого-генетические типы пород, характерные для тех или иных фациальных обстановок, а в столбцах отмечается наличие или отсутствие у этих пород определенного набора диагностических признаков.

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке президента Республики Татарстан в рамках Государственного контракта № 2-Ак от 28.06.2012 г. на тему "Создание научных основ инновационного проектирования разработки нефтяных месторождений".

Проблема заключается в том, что разные авторы используют существенно различную номенклатуру литолого-генетических типов пород и несколько разные наборы диагностических признаков. Еще большей проблемой является то, что проявление диагностических признаков в конкретном образце породы носит вероятностный характер. Некоторые признаки встречаются чаще, другие реже. Хотя даже редко встречающиеся признаки могут иметь важное диагностическое значение, если они характерны только для данного литолого-генетического типа. При этом количественные критерии того, что следует понимать под терминами «часто», «редко» и т.п., отсутствуют.

Перечисленные факторы приводят к неоднозначности диагностирования фаций и литолого-генетических типов только по первичным признакам горных пород. Предполагается, что данная неоднозначность может быть уменьшена за счет анализа последовательности залегания фаций в разрезе и по латерали, геометрической формы геологических тел и т.д. Это требует от специалистов, занимающихся фациальным анализом, изучения огромного объема специальной литературы по обстановкам осадконакопления и длительного периода обучения под руководством опытного наставника. При этом обучение обычно проводится по принципу «делай как я».

Но даже при соблюдении этих дополнительных условий нет гарантии, что диагностика фациальных обстановок будет сделана правильно. Доказательством этому служат продолжающиеся порою десятилетиями споры между различными группами специалистов о генезисе тех или иных отложений. Характерным примером является продолжающаяся уже много лет дискуссия о генезисе ачимовских отложений Западной Сибири, предполагаемое палеогеографическое положение которых по разным версиям варьируется от дельты до подножия кон-

тинентального склона. Также много лет продолжается дискуссия о генезисе аномальных разрезов баженовской свиты (представлено не менее 7 альтернативных гипотез), причем без обсуждения каких-либо серьезных аргументов, основанных на литолого-фациальных исследованиях.

В какой-то мере данные факты сами по себе являются убедительным доказательством несовершенства существующих методик фациальной диагностики. Хотя при необходимости можно было бы предъявить также многочисленные примеры внутренних противоречий в существующих методиках диагностики, и особенно – в результатах их применения (итоговые фациальные колонки).

Одним из путей решения названных выше проблем является широкое использование математических методов в геологии при проведении фациального анализа.

Теоретические основы предлагаемого подхода

Автором данной работы впервые была разработана методика литолого-генетической типизации горных пород на основе кластерного анализа макроописаний керна, сочетающая в себе математическую строгость анализа и возможность настройки с учетом существующих диагностических таблиц, а также типовых описаний осадков, характерных для приведенных в различного рода атласах и монографиях фациальных обстановок.

Первая задача, которую было необходимо решить, – это преобразование полнотекстовых макроописаний керна к формализованному виду, пригодному к дальнейшей автоматической обработке на компьютере. Надо сказать, что стандартные текстовые макроописания керна никогда не потеряют своей актуальности прежде всего благодаря возможности передачи с их помощью сколь угодно сложной информации об изучаемых объектах. Однако их недостатком являет-

ся то, что одному и тому же объекту могут соответствовать внешне совершенно различные макроописания, сходство которых может быть выявлено только на основе углубленного анализа текста.

При преобразовании макроописаний к формализованному виду по разработанной автором методике описание любого образца сводится к перечислению ограниченного числа признаков, характеризующих исследуемый образец. Максимальное число возможных признаков ограничено заложенными в систему справочниками (основанными на общепризнанных классификациях горных пород, текстур, структур и т.п.) и составляет несколько сотен. Однако, как показывает опыт, из них активно используется около 200. А число признаков, используемых при формализованном описании одного образца, как правило, не превышает 20.

Таким образом, каждому образцу ставится в соответствие множество его признаков, что позволяет пользоваться для дальнейшей обработки информации математическим аппаратом теории множеств. Далее для любой пары образцов, которым соответствуют множества признаков A и B , можно определить множество признаков $C = (A \text{ xor } B)$, являющееся исключающим объединением множеств A и B . То есть множество C включает все те признаки, которые имеются в A или в B , но не в них обоих.

Присвоим каждому признаку весовой коэффициент $w > 0$ и определим расстояние R между образцами A и B как сумму весовых коэффициентов элементов множества C : $R = \sum w(C_i)$. Очевидно, что определенное таким образом расстояние является хорошей мерой отличия для двух образцов: чем оно больше, тем большим количеством значимых признаков отличаются образцы, а при $R=0$ мы имеем полностью идентичные формализованные описания образцов.



После того как мера расстояния между образцами определена, возможно применение ко всей совокупности образцов стандартной процедуры кластерного анализа, в результате которой все образцы автоматически группируются в кластеры, отображаемые схематически в виде дендрограммы (рис. 1), листьями которой являются описания слоев (образцов), а ветвями – литотипы, т.е. группы описаний слоев со сходным набором диагностических признаков.

Связь выделяемых литотипов с фациями показана на рис. 2. Отметим, что фазию мы понимаем здесь в узком смысле – как осадки, образовавшиеся в определенной палеогеографической обстановке. Как правило, это иерархическая связь, когда одна фация представлена несколькими различными литотипами. Но очень часто связь между фациями и литотипами может носить более сложный сетевой характер, когда один и тот же литотип с разной степенью вероятности может принимать участие в строении нескольких фаций.

В некоторых случаях участие одного литотипа в строении сразу нескольких фаций обусловлено объективными причинами, связанными с повторяемостью одних и тех же обстановок осадконакопления в разных палеогеографических зонах. В других случаях оно может быть обусловлено недостаточной детальностью описания изучаемых образцов горных пород. При более детальном описании не исключено выявление дополнительных признаков, которые позволят обеспечить большую разрешающую способность фациального анализа.

Итак, мы видим, что использованный алгоритм кластерного анализа, безусловно, является мощным инструментом для литолого-генетической типизации горных пород, однако результаты его использования все же зависят, с одной стороны, от степени детальности и качества имеющихся макроописаний, а с другой стороны – от задан-

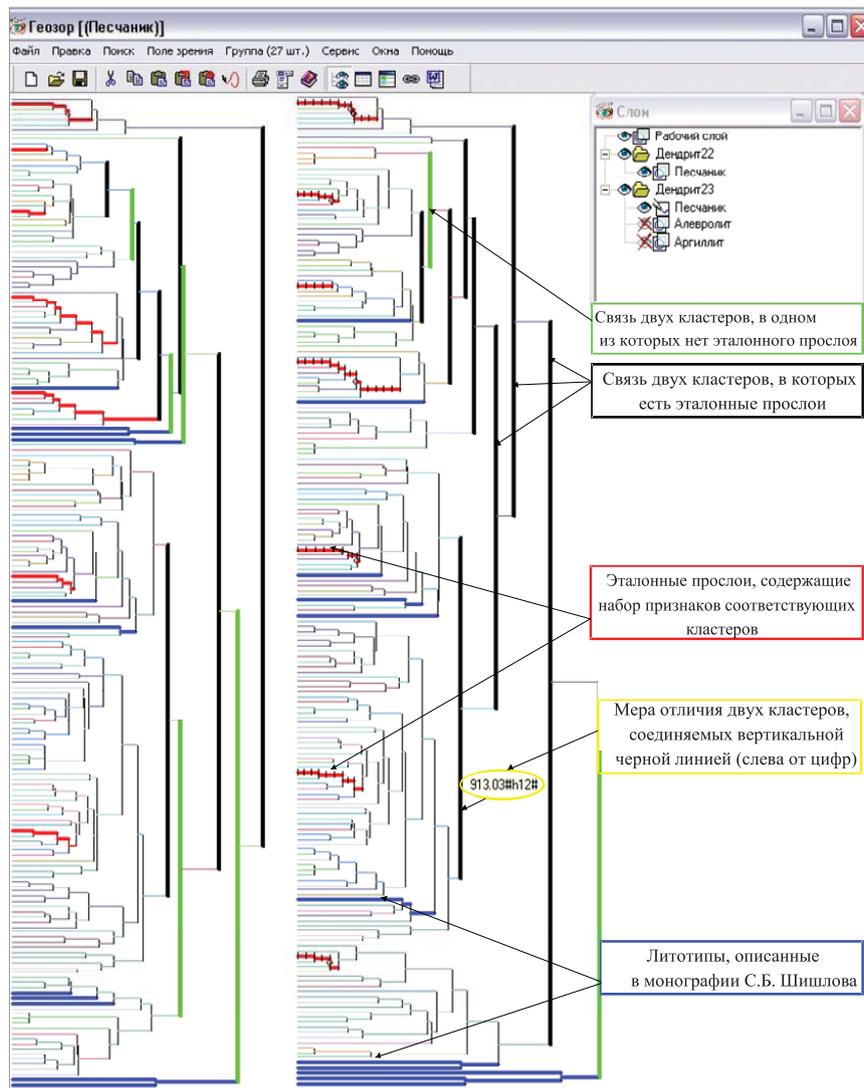


Рис. 1. Сравнение двух дендрограмм в окне программы "Геозор"

ных весовых коэффициентов признаков. Поэтому для использования возможностей кластерного анализа в полном объеме требуется определенная настройка алгоритма путем подбора оптимального набора диагностических признаков и соответствующих им весовых коэффициентов.

Настройка и тестирование экспертной системы

Возможны различные подходы к настройке экспертной системы. Наиболее эффективным представляется использование для настройки/тестирования экспертной системы базы знаний, содержащей полнотекстовые и формализованные

макроописания эталонных слоев (образцов), которые представляют собой либо описания конкретных образцов, фациальная обстановка осадконакопления которых известна, либо описания литотипов, характерных для тех или иных фациальных обстановок. Такая база знаний, содержащая около 1000 эталонных описаний, была составлена по материалам четырех атласов [1, 2, 3, 4].

При правильно составленных формализованных описаниях и оптимальном подборе управляющих весовых коэффициентов признаков в каждом кластере должен находиться хотя бы один эталонный слой. Если же в одном кластере на-

рис. 4 видно, что из 10 образцов литотипа БП-2 (тип БП-2 – алевролиты, иногда песчаник мелкозернистый с корневыми остатками – подпочва угольного пласта) 80 % попали в свой литотип, а два образца присоединились к БП-3. Из других литотипов к литотипу БП-2 присоединились 3 образца из БП-1 и по одному образцу из БП-3 и МП-1.

Анализ показывает, что для данной фации изменчивость осадков обусловлена влиянием субстрата. В зависимости от того, на каких отложениях развивались болота – на аллювиальных или переходных и морских, – можно выделить как минимум три разновидности почвы и подпочвы, формирование которых протекало в несколько различных условиях, а именно: если болота развивались на аллювиальных осадках, значит, существовали условия заболоченных приустьевых прибрежно-аллювиальных равнин, если же они развивались на переходных и морских отложениях, это свидетельствует о существовании условий заболоченных, собственно прибрежно-морских равнин. Таким образом, облик породы, в частности ее гранулометрический состав, характер слоистости на тех участках породы, где она еще не была полностью переработана болотной растительностью, может изменяться в очень широком диапазоне. Именно это явилось причиной неправильной диагностики относящихся к данной фации литотипов.

Однако качество диагностики только на первый взгляд кажется низким. На самом деле для решения задач фациального анализа эффективность распознавания типа БП-2 в данном примере является стопроцентной, так как из 7 «неправильно» диагностированных образцов 6 образцов относятся к одной и той же фации.

Один образец ([1], табл. 83, фиг. 2, тип МП-1) относится к другой фации. Процитируем его описание: «Песчаник мелкозернистый, неслоистый, однородный. Образец из самой верхней части толщи, яв-

ляющейся переходом к подпочве угольного пласта. Видны неравномерная примесь органического материала (темные пятна), нитевидные остатки корней растений. Цвет – серый, слегка зеленоватый».

Из этого описания видно, что экспертная система на самом деле совершенно правильно отнесла данный образец к типу БП-2.

Кстати, приведенный в качестве примера тип БП-2 является весьма показательным еще в одном отношении. Речь идет о том, что использование экспертной системы не только многократно повышает производительность труда при проведении фациального анализа, но и во многих случаях позволяет проводить диагностику более точно, чем если бы мы пользовались для диагностики теми же самыми описаниями литотипов, но без использования экспертной системы.

Так, согласно Ботвинкиной, тип БП-2 «резко отличается от типов всех остальных фаций, поскольку для него характерна слабовыраженная комковатая («кучерявая») текстура, обусловленная присутствием корневых остатков. Другими отличительными признаками являются: наличие в отложениях аппендиксов и мелких волосковидных корневых остатков, большое количество макроконкреций – псевдоморфоз по корневым остаткам (пальцеобразной и желвакообразной форм), наличие микроконкреций и сферолитов сидеритов и мелких включений пирита (в нижней части подпочвы), иногда трудноразличимая первичная структура и текстура пород, на которых развивается подпочва, площадное развитие».

Однако, проанализировав представленные образцы, мы видим, что комковатая текстура встречена лишь однажды, а конкреции – лишь в 4 образцах из 10. Это показывает, что для правильного использования приведенных в атласе описаний литотипов необходимо в дополнение к ним анализировать частоту встречаемости тех или иных

признаков в конкретных образцах. Преимущество использования разработанной экспертной системы заключается в том, что она позволяет проводить такой анализ автоматически.

Другие функциональные возможности экспертной системы

Как известно, фациальная диагностика керна является лишь одной из многих задач, решаемых при проведении литологических исследований. Программное обеспечение «Геозор»-«Разрез», на базе которого реализована экспертная система, также представляет собой многофункциональный продукт, сочетающий возможности базы данных, информационно-поисковой системы и векторного картографического редактора. Отметим здесь только некоторые из имеющихся функций, которые могут быть использованы для обеспечения более наглядного представления и облегчения анализа полученных результатов, а также при настройке и тестировании экспертной системы:

- конструктор поисковых запросов для выборки произвольной информации из базы данных;
- конструктор тематических карт и колонок, позволяющий формировать произвольного вида карты, колонки и разрезы на основе хранящейся в базе данных информации, включая данные каротажа и лабораторных анализов;
- полнофункциональный векторно-растровый картографический редактор «Геозор»;
- хранение результатов промежуточных итераций в виде дендрограмм (см. **рис. 1**), их оперативный просмотр и сравнение;
- использование толщины и цвета линий на дендрограмме для выделения слоев, относящихся к разным скважинам, а также эталонных слоев, взятых из различных источников;



- оперативная связь дендрограммы с базой данных: возможность выбрать слой в базе данных, показать его на дендрограмме или, наоборот, щелкнув мышью на лист дендрограммы, показать его полное описание в базе данных;
- вывод результатов литолого-генетической типизации на сводные геолого-геофизические колонки и профили;
- вывод подробной статистики по произвольному кластеру на дендрограмме, сравнительная статистика по двум выбранным кластерам (рис. 5);
- анализ чувствительности экспертной системы в отношении различных диагностических признаков и автоматический подбор оптимальных весовых коэффициентов.

В качестве примера на рис. 5 показана таблица сравнительной статистики по двум кластерам. Для каждого кластера отображается следующая информация: диапазон номеров листьев кластера; название признака (short); название справочника/словаря (runame); частота встречаемости данного признака в процентах в прослоях, соответствующих листьям кластера (f). Признаки отсортированы в порядке уменьшения частоты.

В колонках перекрестной статистики (справа) показывается та же самая информация о частоте встречаемости признаков для каждого кластера. Кроме того, показана разница частот (df). Признаки отсортированы в порядке уменьшения разницы частот. Таким образом, с помощью данной статистики можно легко понять, чем же отличаются выделенные программой кластеры друг от друга.

Заключение

Проведенные исследования показали, что использование математического аппарата кластерного анализа может быть весьма эффективным для решения широкого круга задач, связанных с распознаванием образов и классификацией геологических объектов, в частнос-

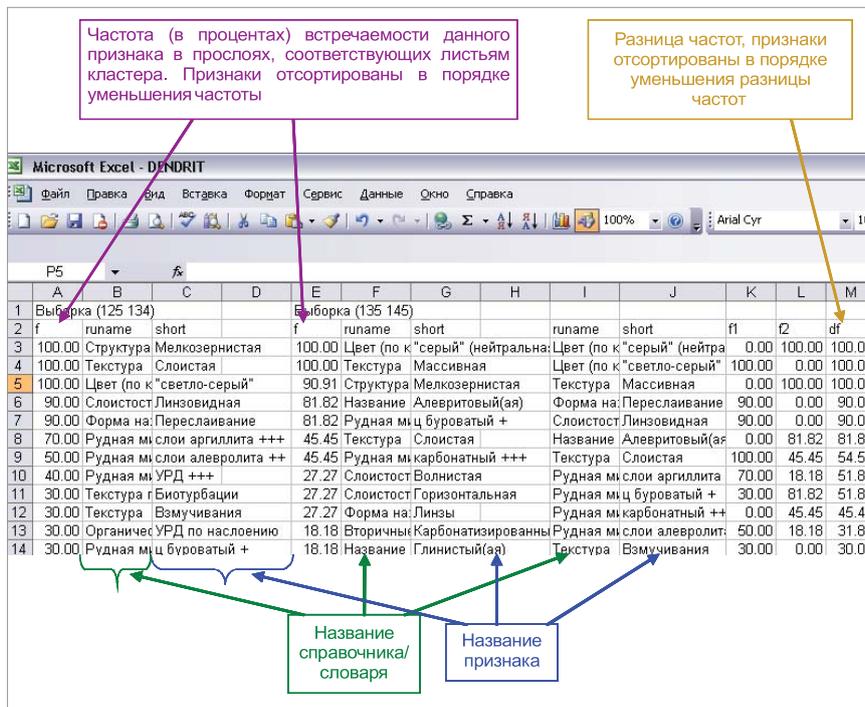


Рис. 5. Сравнение частоты встречаемости признаков по двум кластерам

ти задач фациальной интерпретации макроописаний керна. Методика реализована в виде экспертной системы на базе программного комплекса «Геозор»-«Разрез» [5]. Внедрение системы в научных и производственных организациях позволит:

- добиться высокой воспроизводимости результатов фациальных и седиментологических исследований, выполняемых разными группами специалистов;
- создать научную основу для решения спорных вопросов о генезисе тех или иных проблемных отложений;
- в целом повысить качество корреляции и создаваемых петрофизических моделей месторождений.

Тестирование экспертной системы показало, что качество распознавания ограничивается в основном следующими объективными и субъективными факторами:

- малый размер образца или неполнота макроописания образца. Даже сами авторы использованных для тестирования атласов при описании эталонных образцов

не всегда указывают весь необходимый комплекс диагностических признаков;

- полиморфизм и изоморфизм фаций. Некоторые литогенетические типы пород могут входить в состав осадков, формирующихся в различных фациальных обстановках. Негативное влияние этого фактора усугубляется, если не разделять четко понятия фации и литотипа, как это показано на рис. 2;
- возможное несовершенство исходных систем классификации. Пока еще рано делать окончательные выводы, но обнаруженные противоречия в трактовке диагностических признаков фаций разными исследователями дают основания предполагать, что истина находится где-то посередине.

Разумеется, использование экспертной системы в данном случае не позволяет автоматически исправлять выявленные в процессе работы недостатки существующих систем классификации. Но она, несомненно, является незаменимым инструментом для совершенствования используемых систем классификации на основе систематичес-

кого выявления и исправления существующих недостатков. По сравнению с применяемыми традиционными методами экспертная система обеспечивает почти автоматическое выявление различного рода ошибок в существующих системах классификации. Благодаря этому минимизируется вероятность принятия заключения о фациальной принадлежности горных пород на основе ошибочных предпосылок.

Вместе с тем тестирование показало, что результаты работы экспертной системы достаточно устойчивы к наличию отдельных ошибок или неточностей, допущенных при описании характерных признаков как литотипа, так и конкретных образцов.

Кроме того, при работе с экспертной системой мы в любой момент можем получить и использовать выраженную в процентах информацию о частоте встречаемости того или иного признака. Если эта частота близка к 0 или 100 %, то правильное заключение о фациальной принадлежности может быть принято с достаточно высо-

кой вероятностью. Если нет, то, основываясь на величине коэффициента эффективности распознавания, который сама же экспертная система и вычисляет, геолог может сделать вывод о необходимости выделения в составе фации нескольких литотипов. Если и это не поможет, значит, для фациальной диагностики необходимо привлекать дополнительные признаки, получаемые, например, в процессе микроскопического изучения шлифов или лабораторных исследований.

Следовательно, система является обучаемой и в настоящее время работы по ее совершенствованию продолжаются:

- на основе сравнительного анализа основных существующих на сегодняшний день методик литолого-генетической типизации и фациального анализа разрабатывается унифицированная номенклатура литолого-генетических типов и соответствующих им фациальных обстановок;

- готовятся рекомендации по проведению седиментологического

описания керна, необходимого для более качественной фациальной реконструкции;

- ведутся исследования по оптимизации набора используемых диагностических признаков, а также разделению их на объективные (имеющие неизменное диагностическое значение), случайные (имеющие диагностическое значение в пределах ограниченных геологических областей) и субъективные (обусловленные субъективным подходом при описании керна и/или фациальной интерпретации признаков).

Применение методики на Повховском месторождении Западной Сибири [6] позволило (в совокупности с другими методами исследований) доказать некорректность ранее сделанных трех вариантов корреляции и построить систему доказательств для обоснования нового варианта корреляции продуктивных пропластков. Также было показано значимое отличие петрофизических зависимостей для некоторых из выделенных литолого-генетических типов пород.

Литература

1. Атлас литогенетических типов угленосных отложений среднего карбона Донецкого бассейна / Л.Н. Ботвинкина, Ю.А. Жемчужников, П.П. Тимофеев, А.П. Феофилова, В.С. Яблоков. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 367 с.
2. Алексеев В.П. Атлас фаций юрских терригенных отложений (угленосные толщи Северной Евразии). – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – 209 с.
3. Атлас литологических типов угленосных отложений Алдано-Чульмановского района Южно-Якутского каменноугольного бассейна / А.В. Александров, В.М. Желинский, В.Н. Коробицына, Ш.А. Сяндюков, В.И. Фролов. – М.: Наука, 1970. – 226 с.
4. Тимофеев П.П. Геология и фации юрских угленосных формаций Южной Сибири / Труды Геологического

института АН СССР, вып.197. – М.: Наука, 1969. – 556 с.

5. Михайлов В.Н., Туманов В.Р., Горбунов С.А. Технология создания постоянно действующей модели геологического строения территории на основе интеграции электронных колонок, карт и баз знаний / Квартер-2005 – IV Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода: Материалы совещания (Сыктывкар, 23-26 августа 2005 г.). Институт геологии Коми НЦ УрО РАН. – Сыктывкар: Геопринт, 2005. – С. 281-282.
6. Михайлов В.Н., Шемонаев И.А. Литолого-генетическая типизация неокотских пород Западной Сибири на основе кластерного анализа макроописаний керна / Увеличение нефтеотдачи – приоритетное направление воспроизводства запасов углеводородного сырья: Междунар. науч.-практ. конференции (7-8 сентября 2011 г.). – Казань, 2011. – С. 329-333.