

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОГО ОПРОБОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗОЛЬНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

© 2011 А.А. Сясько, Н.Н.Гриб, А.В. Качаев

Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета,
г. Нерюнгри

Поступила в редакцию 19.05.2011

Рассмотрена методика ядерно-физического опробования (ЯФО) для изучения зольности угольных пластов в естественном залегании, показана реализация методики на конкретном месторождении угля, приведена статистическая оценка предлагаемой методики.

Ключевые слова: ядерно-физическое опробование, зонд, опробование, скважина, уголь, зольность

Исследованием проблемы изучения зольности угольных пластов по данным геофизических методов исследования скважин (ГИС) в Южно-Якутском бассейне занимались А.И. Макаров, М.И. Логинов, Н.Н. Гриб [3, 4, 6]. При разведке выходов угольных пластов под рыхлые отложения есть некоторые особенности, ограничивающие применение уже наработанных методов изучения разрезов угольных скважин. Во-первых, в приложении к предлагаемой методике изучения выходов угольных пластов посредством бурения кустов вертикальных скважин первой группы методы ГИС, применяемые при изучении разрезов скважин второй – третьей группы, отличаются организационной и аппаратной громоздкостью и в данном случае не применяются. Во-вторых, при средней глубине разведочных скважин на выходе пласта на Сыллахском месторождении порядка 8 м [9] и при общем количестве скважин 967 штук дополнительное увеличение глубины каждой скважины примерно на 5 м под карман для зонда привело бы к общему увеличению объема бурения на 60%. В-третьих, предлагаемая методика предполагает более оперативный, недорогой и мобильный комплекс изучения разреза скважин.

Исходя из вышеперечисленных предпосылок, была разработана методика ядерно-физического опробования (ЯФО) скважин [12]. Особенностью применяемого комплекса ЯФО является, прежде всего, применение варианта селективного гамма-гамма метода. В зонде применяется источник – бета-излучатель Sr^{90} в сборке со свинцовой мишенью (рис. 1).

По спектру излучения сборка имитирует спектр изотопа Tl^{204} , применение которого при

изучении разреза угольных скважин описал В.И. Уткин [10, 11]. Зонд работает в 4л-геометрии диффузного рассеяния и рассчитан на опробование обсаженных дюралевыми трубами скважин. Недостатком зонда является высокий фоновый счет и низкая концентрационная чувствительность. Но увеличение времени экспозиции на точке опробования позволяет компенсировать эти недостатки статистически. Достоинством зонда является высокая воспроизводимость результатов как следствие хорошей представительности замера в точке опробования.

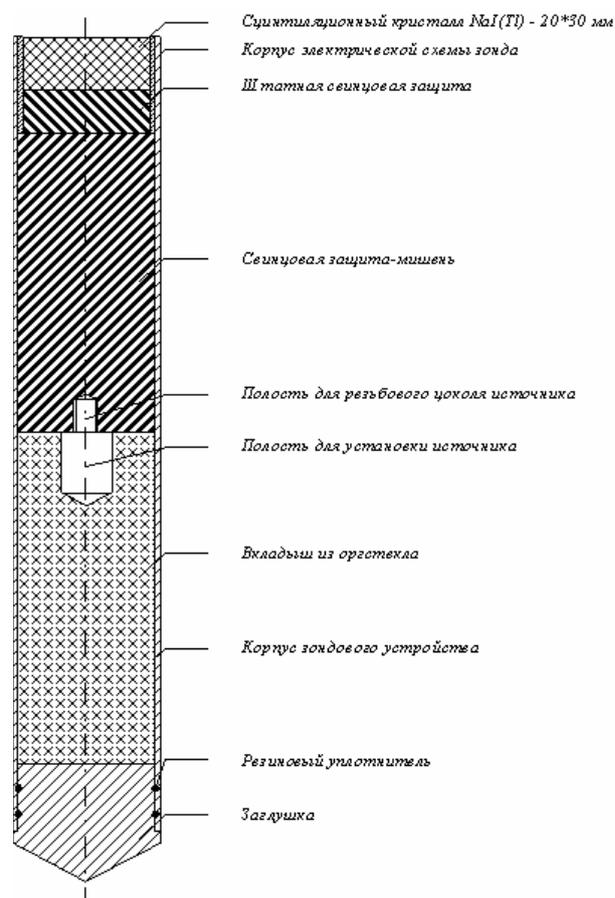


Рис. 1. Схема зонда ГГО-с

Сясько Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры математики и информатики. E-mail: siasko@rambler.ru

Гриб Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе. E-mail: grib@nfygu.ru.

Качаев Андрей Викторович, заведующий лабораторией физики мерзлых пород. E-mail: Kachaev67@gmail.com

Использование при полевых работах портативного персонального компьютера для регистрации данных ЯФО, внедренное при работах на Сыллахском месторождении [9], позволило разработать автоматизированную систему накопления и обработки геолого-геофизических данных вскрытия выходов угольных пластов.

Данные на входе системы организованы достаточно просто: таблицы 1 и 2 представляют собой фрагменты двух основных таблиц базы данных, организованной в СУБД MS Access 7.0,

таблица 1 содержит данные кернового опробования, заполняемые на основании геологической документации скважин и ведомостей лабораторных анализов, таблица 2 организована на основании рабочих таблиц ядерно-физического опробования, импортируемых в базу данных из программы MS Excel 7.0. База данных содержит также таблицы с информацией о контроле качества ядерно-физического опробования и топографических данных.

Таблица 1. Фрагмент таблицы данных кернового опробования

№ скважины	№ пробы лабораторный	Глубина опробования, от	Глубина опробования, до	W ^a	A ^d	V ^{daf}	Характер королька	Вес пробы (кг)
50/к	99840	9,1	9,7	0,82	14,79	44,12	сл.вспуч.	0,67
50/к	99841	9,7	10,3	0,8	9,88	41,2	сл.вспуч.	0,5
50/к	99842	10,3	10,9	0,8	7,03	40,15	сл.вспуч.	0,62
50/к	99843	10,9	11,6	0,78	13,47	44,18	сл.вспуч.	0,65
50/к	99844	11,6	12,2	0,65	11,68	41,96	сл.вспуч.	0,67
50/к	99845	12,2	13	0,65	9,2	41,34	сл.вспуч.	0,8
50/к	99846	13	13,6	0,58	11,84	43,61	сл.вспуч.	0,68

Таблица 2. Фрагмент таблицы ядерно-физического опробования

Код	Глубина опробования	Отсчет	Контроль	Тек. кон-	№ скв.
1	-18.94	1785		1790	48/к
2	-18.88	1782			48/к
3	-18.82	1736			48/к
4	-18.76	1719			48/к
5	-18.7	1728			48/к
6	-18.64	1752	1748		48/к
7	-18.58	1716	1720		48/к
8	-18.52	1719	1718		48/к
9	-18.46	1728	1732		48/к
10	-18.4	1721	1721		48/к

Организация базы данных позволила гораздо свободнее оперировать исходными материалами с минимальными затратами времени. Например, таблица с данными гамма-гамма-опробования селективного для керновых скважин Сыллахского месторождения содержит 30653 строчки данных. Таблица кернового опробования содержит данные о 1835 керновых пробах. Для проведения сопоставления данных кернового и ядерно-физического опробования необходимо: для каждого интервала кернового опробования отобрать соответствующие ему точки ЯФО; провести осреднение отсчета на интервале; вычислить корреляционную зависимость данных; вычислить уравнение регрессии. Ручная обработка массива подобного размера повлекла бы за собой огромные трудовые затраты квалифицированных специалистов. Автоматизация процесса

не только сократила время обработки данных, но и позволила провести многовариантный анализ. Результаты сопоставления данных ЯФО и кернового опробования во многом основаны на особенностях автоматизированной обработки первичного материала и, чтобы дальнейшее изложение результатов исследований было максимально логичным, авторы считают необходимым по возможности подробно описать все этапы схемы обработки данных.

Основную информацию о результатах ЯФО и кернового опробования несут таблицы, фрагменты которых приведены в табл. 1 и 2. В полях таблиц размещены все данные по объекту работ. При анализе данных необходимо выделить из массива данные по отдельной скважине. Мало того, из массива данных по скважине необходимо выделить выборки, сгруппированные

по признаку принадлежности к интервалу кернового опробования. Проще говоря, необходимо взять интервал кернового опробования с результатами анализов керновых проб по этим интервалам и найти в таблице данных ЯФО точки опробования, полученные в этих интервалах. В среде MS Access эта цель достигается просто: на рис. 2 приведена структура запроса на выборку из таблиц данных. Условия на выборку для этих

таблиц: совпадение поля «№ скважины»; значения в поле «Глубина опробования» таблицы данных ЯФО должны находиться в интервале, заданном полями; «Глубина опробования от»; «Глубина опробования до». В результате получаем таблицу, фрагмент которой представлен в табл. 3. Фактически мы получили таблицу данных ЯФО, каждой строке которой отнесены значения зольности углей и интервала кернового опробования.

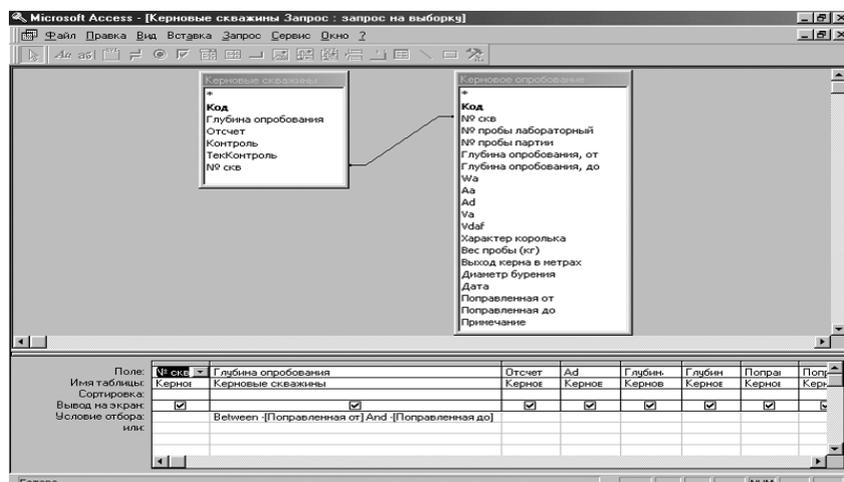


Рис. 2. Запрос на организацию выборки из таблиц ядерно-физического и кернового опробования

Таблица 3. Структура запроса на выборку данных ЯФО и кернового опробования

№ скв.	Глубина опробования	Отсчет	A ^d	Глубина опробования, от	Глубина опробования, до	Поправленная от	Поправленная до	Примечание
124/k2	-15,14	1812	92,49	14,9	15,2	14,89	15,19	
124/k2	-15,08	1823	92,49	14,9	15,2	14,89	15,19	
124/k2	-15,02	1834	92,49	14,9	15,2	14,89	15,19	
124/k2	-14,96	1912	92,49	14,9	15,2	14,89	15,19	
124/k2	-14,90	1910	92,49	14,9	15,2	14,89	15,19	
124/k2	-14,84	2015	63,7	14,82	14,9	14,81	14,89	

Следует отметить, что поинтервальные данные кернового опробования в исходном виде были непригодны для сопоставления – погрешности определения глубин интервалов опробования были достаточно велики. Очевидно, что в ошибках определения глубин интервалов кернового опробования присутствует как систематическая, так и случайная составляющие. Формализация задачи учета влияния этих ошибок невозможна, и поправки в глубины интервалов были внесены, основываясь на данные о морфологии пласта по кривым ЯФО. Исправленные данные были включены в запрос на выборку в поля «Поправленная от» и «Поправленная до». Естественно, что для проведения корректного сопоставления исходные данные непригодны именно из-за несовпадения геологических границ. Следует оговориться, что внесение поправок в интервалы кернового опробования вносились в рамках стандартной обработки данных геологоразведочных работ и, соответственно, ни о какой подгонке результатов с целью наиболее благоприятных

условий сопоставления данных ЯФО и кернового опробования не может быть речи.

После внесения поправок в интервалы кернового опробования таблица данных для проведения первичного сопоставления данных ЯФО и кернового опробования (данные отнесены к точке ядерно-физического опробования) готова. Первичное сопоставление интенсивности счета селективного гамма-гамма опробования (ГГО-с) и зольности керновых проб было проведено по всей выборке. С каждой физической точкой ГГО-с были сопоставлены данные кернового опробования о зольности в этой же точке. При сопоставлении использовались данные по 7128 физическим точкам. Задача первичного сопоставления – оценить корреляционную зависимость «интенсивность счета ГГО-с – зольность на интервале». Результаты сопоставления приведены на рис. 3. Полученный коэффициент корреляции $r = -0,7792$ свидетельствует о хороших перспективах дальнейшего сопоставления.

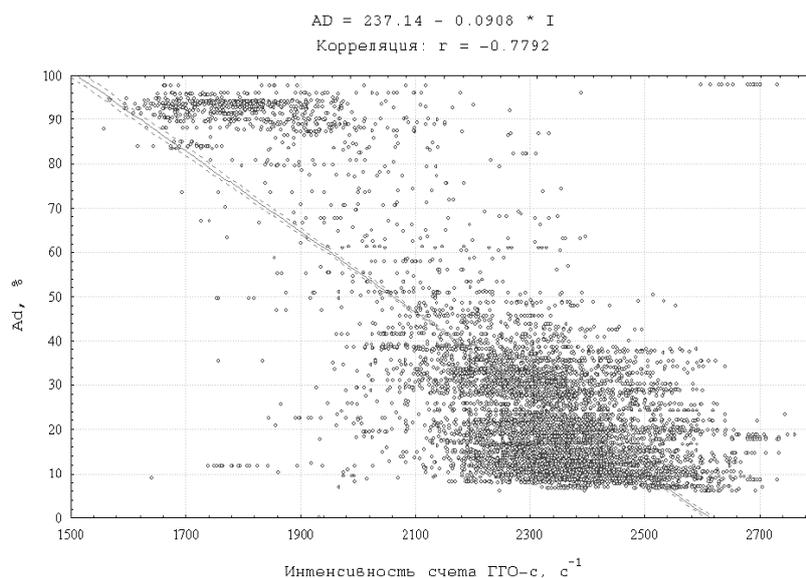


Рис. 3. Сопоставление зольности керновых проб и интенсивности счёта ГГО-с, первый этап

Большую дисперсию значений интенсивности счёта ГГО-с в пределах одного интервала значений зольности можно объяснить различием принципов опробования – значение интенсивности счёта ГГО-с обусловлено дискретным значением зольности угольного пласта в точке опробования, зольность же по керновой пробе величина интегральная. Таким образом, второй этап обработки данных сопоставления зольности керновых проб и интенсивности счёта ГГО-с определен – необходимо получить интегральное значение счёта ГГО-с на интервале кернового опробования. Для упрощения процедуры осреднения счёта ГГО-с на интервалах кернового опробования на языке программирования Visual Basic был написан макрос для программы MS Excel 7.0. С помощью макроса вычислены средние арифметические значения интенсивности счёта ГГО-с в интервалах, соответствующих интервалам кернового опробования для всех керновых скважин. В результате пересчёта получен числовой массив, содержащий 784 строки. Каждая строка содержит данные по отдельной керновой пробе – интервал опробования, зольность и среднеарифметическое значение интенсивности счёта ГГО-с на интервале. По полученным данным был проведен статистический анализ зависимости «средняя интенсивность счёта ГГО-с на интервале – зольность на интервале». Результаты сопоставления приведены на рис. 4. Поставленные на втором этапе обработки задачи были решены – дисперсия интенсивности счёта ГГО-с в пределах одного класса значений зольности уменьшилась, значение коэффициента корреляции интенсивности счёта ГГО-с с зольностью на интервале увеличилось и составило величину – 0,8612. Более того, коэффициент корреляции величины зольности и десятичного логарифма значения интенсивности счёта ГГО-с на интервале опробования

составил еще большую величину – 0,8677. Следует обратить особое внимание на то, что как первый, так и второй этапы сопоставления проводились по полной выборке и какой-либо отбраковки данных не производилось.

На этом же этапе с выборкой была проведена еще одна трансформация – пробы были упорядочены по величине значения зольности – от наименьшего к наибольшему. По полученной выборке был построен простейший градуировочный график – по двум осям ординат откладывались значения зольности и средней интенсивности счёта ГГО-с для каждой керновой пробы, по оси абсцисс – пробы в порядке возрастания. Построенный график приведен на рис. 5. Взаимное расположение кривых прекрасно иллюстрирует существование полиномиальной зависимости интенсивности счёта ГГО-с от зольности на интервале опробования. Очевидно, что значение дисперсии интенсивности счёта ГГО-с в пределах одного класса зольности по-прежнему остается непозволительно большой и уравнение зависимости интенсивности счёта ГГО-с от зольности, полученное по этим данным, не позволит получить удовлетворительную погрешность определения зольности по данным ЯФО.

Для определения дальнейших путей обработки данных для достоверного определения зольности по данным ЯФО обратимся к исходным данным. Необходимо определить, какие факторы влияют на величину дисперсии значения интенсивности счёта ГГО-с в пределах одного класса значений зольности. При сопоставлении зольности керновых проб и интенсивности счёта ГГО-с мы используем только эти две величины. На значение дисперсии влияют и погрешности кернового опробования и погрешности ЯФО. Попытаемся оценить вклад каждого фактора в суммарную погрешность.

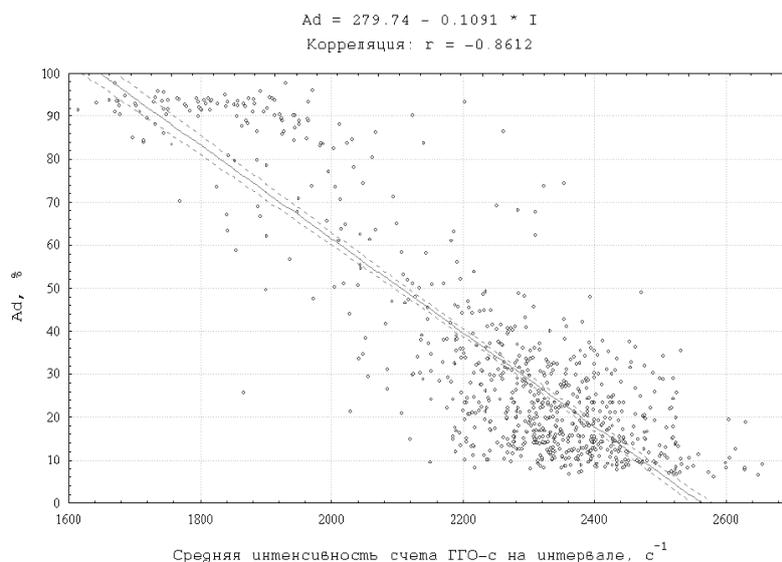


Рис. 4. Сопоставление зольности керновых проб и интенсивности счета ГГО-с, второй этап

Керновое опробование. При керновом опробовании имеют место следующие случайные ошибки: ошибка определения интервалов опробования; засорение керновой пробы шламом; избирательное истирание керна с выносом хрупких разностей; потери части материала при отборе пробы; лабораторная погрешность определения зольности пробы. Оценить влияние каждой составляющей достаточно сложно и поэтому будем исходить из предположения, что керновое опробование проведено корректно и суммарная ошибка определения зольности керновой пробы удовлетворяет инструктивным требованиям и составляет 5 % (для энергетических углей) [5].

Ядерно-физическое опробование. Относительная случайная среднеквадратическая ошибка ГГО-с, определенная по результатам контрольных измерений, составляет 0,43 % (база данных ядерно-физического опробования [9]).

Погрешность сопоставления. Выше уже был описан принцип создания запроса на выборку для сопоставления данных кернового опробования и ГГО-с. В описанном подходе существует некое слабое место – внесение поправок в значения интервалов кернового опробования. Процесс этот сугубо субъективный, тем более, что вносятся поправки не только в значения интервалов, но и в значения зольности на этих интервалах. Погрешность в определении одного из этих параметров может создать существенную ошибку в характеристики отдельного пластосечения. Но имея дело с достаточно большим количеством пластосечений и этот фактор значительно упрощает ситуацию: предположим, что ошибки внесения поправок в данные кернового опробования носят случайный характер. Тогда вступают в силу характеристики случайных ошибок [8]: случайные ошибки, равные по величине и противоположные по знаку (при равноточных измерениях), возникают равновероятно; малые по величине ошибки встречаются чаще, чем большие; при возрастании числа равноточных измерений среднее арифметическое значение случайных ошибок

измерений одной и той же величины стремится к нулю. Исходя из этих положений, случайной ошибкой внесения поправок в данные кернового опробования можно пренебречь.

Таким образом, из всех случайных ошибок, возможных при сопоставлении данных ГГО-с и кернового опробования, наибольший вес имеет погрешность определения характеристик кернового опробования и, как следствие, в дисперсию интенсивности счета ГГО-с для одного класса зольности максимальный вклад вносят именно эти ошибки. Определив ориентировочное значение погрешности сопоставления, продолжим обработку массива данных кернового и ядерно-физического опробования. Суть предлагаемой методики обработки следующая: после 2 этапов обработки массива данных мы получили графики распределения зольности и среднего значения интенсивности счета ГГО-с на интервале керновых проб в порядке возрастания. Значение дисперсии интенсивности счета велико. Мы определили, что максимальный вклад в погрешность сопоставления вносит погрешность кернового опробования и ее величина составляет 3% абсолютных. А это означает возможность осреднения данных кернового и ЯФО в скользящем окне шириной 3% – например, значению зольности керновой пробы 8% равновероятно могут соответствовать значения от 5 до 11%. Технически осреднение выполняется достаточно просто: мы уже имеем массив данных, упорядоченных по возрастанию зольности, введем в массив два новых столбца – осредненная зольность и осредненная интенсивность счета. В каждой строчке, соответствующей керновой пробе вычислим среднее значение зольности в окне шириной 6% и среднее значение интенсивности счета в окне, ширина которого равна ширине окна (в строках) осреднения зольности. На рис. 5 и 6 представлены график зависимости среднего значения интенсивности счета ГГО-с от среднего значения зольности и кривые распределения значений зольности и интенсивности счета для выборки.

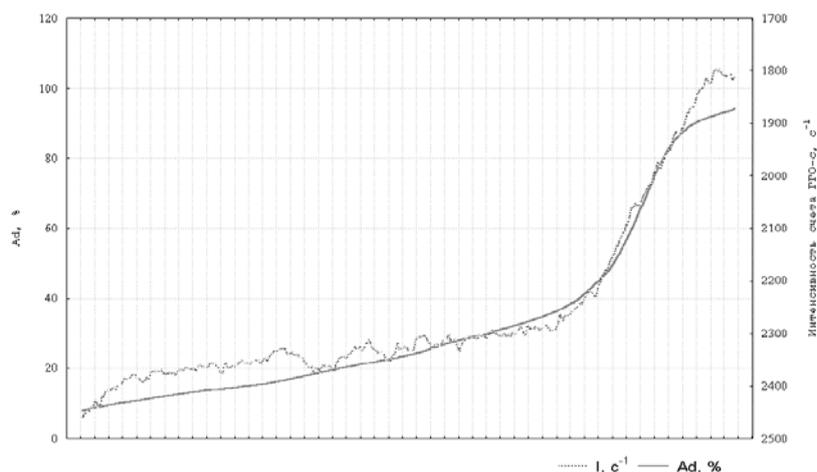


Рис. 5. Кривые распределения зольности и интенсивности счета, пробы упорядочены по возрастанию зольности

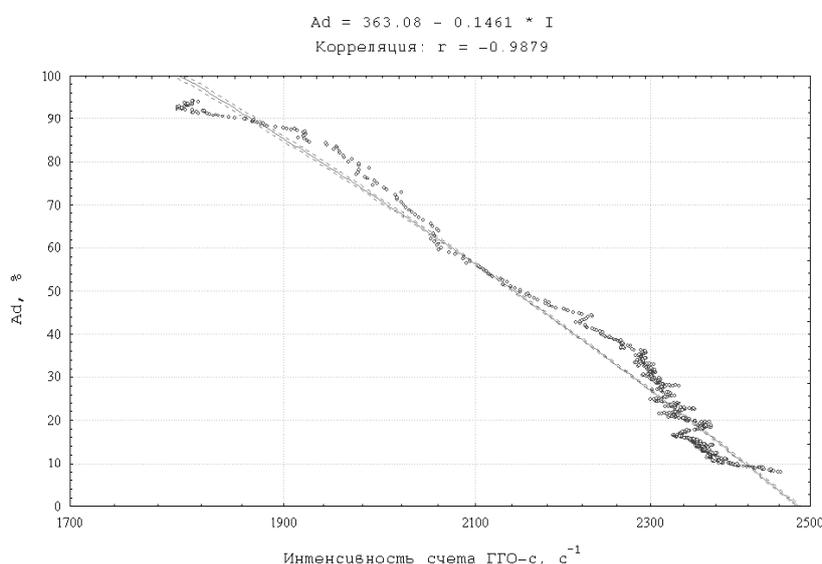


Рис. 6. Сопоставление зольности керновых проб и интенсивности счета ГГО-с, третий этап

Очевидно, что поставленная задача решена: значение коэффициента корреляции увеличилось до величины $-0,9879$, дисперсия интенсивности счета ГГО-с для класса зольности существенно уменьшилась. Уменьшение дисперсии подтверждает наше предположение о преимущественно случайной природе погрешностей сопоставления данных ядерно-физического и кернового опробования. Итак, значения статистических параметров позволяют сделать первую попытку определения зольности керновой пробы по среднему значению интенсивности счета ГГО-с на интервале опробования.

В первом приближении для получения зависимости был использован весь массив данных кернового и ЯФО. Для лучшей сходимости результатов при вычислениях был использован натуральный логарифм интенсивности счета ГГО-с. При установлении зависимости использовалось уравнение регрессии вида:

$$y = b1 * x + b2 * x^2 + b3 * x^3 + b4 * x^4 + b5 * x^5 + b6,$$

где y – зольность керновой пробы; x – натуральный логарифм среднего значения интенсивности счета ГГО-с на интервале опробования. На рис. 7 представлен результат первого расчета.

Очевидно, что для лучшей сходимости функции необходимо разбить массив на две части – с пробами, средняя зольность которых меньше или равна $42,67\%$ и пробами большей зольности. Исходные данные были разделены на две части и вычисления уравнений регрессии были произведены отдельно для каждого массива. Графические результаты вычислений представлены на рис. 8 и 9, числовые значения коэффициентов $b1 - b6$ для всех трех этапов подбора представлены в табл. 4. Полученные уравнения были использованы для вычисления теоретической зольности керновой пробы по данным ГГО-с. По всему массиву было проведено сравнение вычисленной и фактической зольности керновых проб. Результаты сравнения представлены в табл. 5. Для достоверной оценки полученных уравнений регрессии необходимо вернуться к элементарной ячейке сопоставления – керновой пробе.

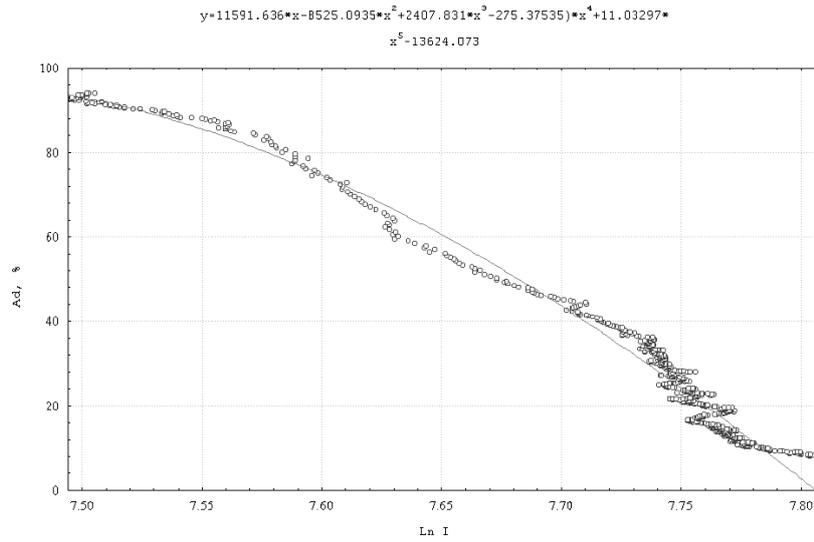


Рис. 7. Получение уравнения регрессии $A^d = f(I_{ГТО-с})$

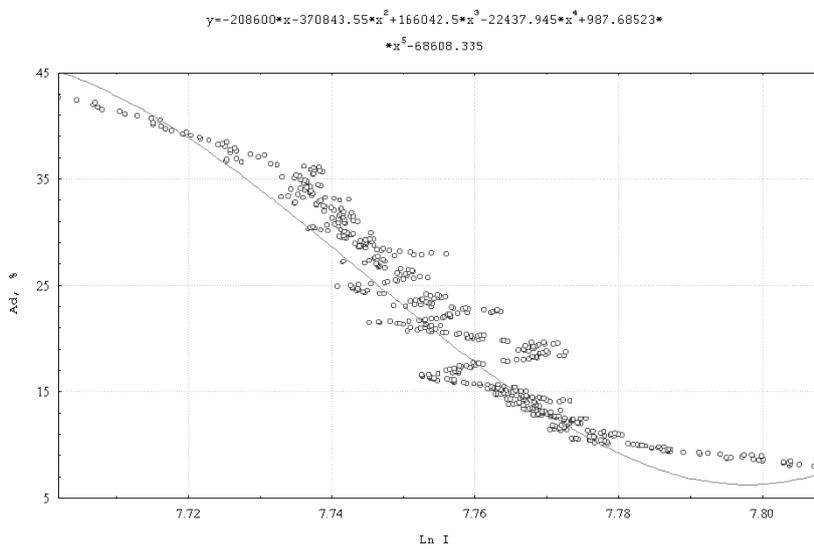


Рис. 8. Получение уравнения регрессии $A^d = f(I_{ГТО-с})$

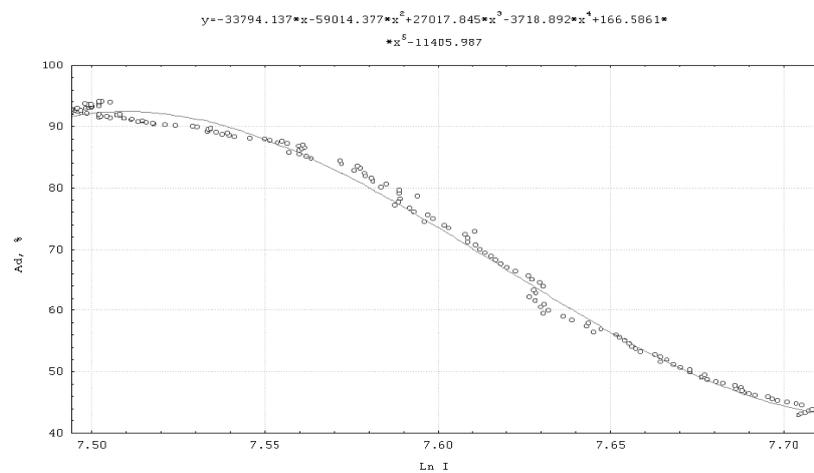


Рис. 9. Получение уравнения регрессии $A^d = f(I_{ГТО-с})$

Таблица 4. Коэффициенты уравнения регрессии $A^d = f(I_{\text{ГГО-с}})$

Интервал зольности	Значения коэффициентов $b_1 - b_6$ для уравнений регрессии $y = b_1*x + b_2*x^2 + b_3*x^3 + b_4*x^4 + b_5*x^5 + b_6$					
	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
0 – 100 %	11591,636	-8525,0935	2407,831	-275,37535	11,03297	-13624,074
0 – 42,67 %	-208600	-370843,55	166042,5	-22437,945	987,68523	-68608,335
42,67 – 100 %	-33794,137	-59014,377	27017,845	-3718,892	166,5861	11405,987

Таблица 5. Статистические характеристики фактической и теоретической зольности керновых проб

Параметр	Кол-во проб	Среднее	Доверительный интервал		Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
			-95,00%	+95,00%				
$A^d_{\text{ГГО}}, \%$	782	33,74703	31,90007	35,59399	23,295	6,14	97,62	26,31112
$A^d_{\text{теор}}, \%$	744	33,39125	31,56785	35,21465	26,54864	-34,5685	99,57129	25,33449
$A^d_{\text{ГГО}} - A^d_{\text{теор}}, \%$	744	-0,64524	-1,79122	0,500733	0,596902	-89,4641	63,10877	15,92229

В ходе сопоставления мы шли от частного к общему, от значения зольности и интенсивности счета в точке ЯФО к осредненным значениям в доверительном интервале. Оценивая результаты сопоставления, будем действовать в обратной последовательности – от общего к частному – от всего массива данных кернового и ЯФО к отдельному пластосечению и керновой пробе. Необходимо оценить сопоставимость фактической и расчетной по результатам ГГО-с зольности для отдельных пластосечений. Параллельно с этим провести подготовку к подобному сопоставлению для отдельной керновой пробы.

Формализация задачи:

Исходные данные: на входе системы мы имеем табл. 3, содержащую данные ЯФО и кернового опробования, отнесенные к глубине точки ядерно-физического опробования.

Задачи обработки: пересчет данных ЯФО в зольности, исходя из уравнения регрессии; $A^d = f(I_{\text{ГГО-с}})$ для каждой точки опробования; организация корректного перехода от зольности в точке ЯФО к поплачной зольности; вычисление среднепластовой зольности по данным ЯФО; вычисление средней зольности по данным ЯФО на интервале кернового опробования (термин «средняя зольность» вместо термина «средневзвешенная зольность» употреблен сознательно, при вычислении зольность не взвешивалась на интервал ввиду равенства длин интервалов опробования).

Ранее мы уже упоминали о макросах для программы MS Excel, написанных на языке Visual Basic, созданных для решения перечисленных выше задач обработки данных ЯФО и значительно упростивших процесс исследований. Краткое описание принципа действия макросов:

1. Первый макрос позволяет подготовить массив данных для проведения сопоставления зольности интервала кернового опробования по лабораторным данным со средним счетом ЯФО на интервале. Программа последовательно перебирает строчки таблицы, суммируя значения счета ЯФО до тех пор, пока в столбце, содержащем значения зольности керновых проб, находит одинаковые значения зольности. При изменении

значения зольности сумма отсчета делится на количество строк и делается запись среднего значения счета ЯФО на интервале.

2. Макрос YFO(), позволяет автоматизировать вычисление зольности углей по данным ЯФО. Особенность макроса заключается в том, что в нем попутно производится осреднение зольности в пределах инструктивной погрешности. Перебирая значения интенсивности счета ЯФО, программа сравнивает каждый последующий отсчет с предыдущим, и, если разница отсчетов находится в пределах 3%, суммирует их. Как только последующий отсчет отличается от предыдущего более, чем на 3%, производится осреднение счета на предыдущем интервале и переход к пересчету интенсивности счета в зольность посредством введенного уравнения нелинейной регрессии. Предусмотрено «кусочное» применение уравнения в зависимости от абсолютного значения интенсивности счета – счет в породе, на высокозольных и малозольных углях производится по уравнениям регрессии, соответствующим этим интервалам.

Последующие макросы являются вспомогательными и предназначены для визуализации полученных данных. Результаты вычисления разбиты на 3 группы: а) с хорошим совпадением расчетных и фактических данных; б) с удовлетворительным совпадением; в) с плохим совпадением. По выделенным 3 группам данных проведено сравнение: из значения фактической зольности для каждой пробы вычтено значение зольности расчетной, для каждой скважины группы вычислено среднее значение разности зольностей. Сокращения и отбраковки проб не проводилось. Полученные параметры обозначены условно как DELTA 1, 2 и 3 для первой, второй и третьей групп соответственно. В таблице 7 представлена статистическая характеристика разности зольностей для всех групп. Для первой и второй группы скважин получены вполне удовлетворительные результаты. Причины слабой сходимости результатов для третьей группы рассмотрим особо.

Таблица 7. Статистические характеристики сопоставления фактической и вычисленной зольности

Параметр	Кол-во сопоставлений	Среднее	Доверительный интервал		Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
			-95,00%	+95,00%				
DELTA1, %	12	-1,063	-2,697	0,571	-1,035	-4,710	3,000	2,572
DELTA2, %	12	-2,818	-7,118	1,483	-1,830	-16,660	7,230	6,768
DELTA3, %	12	5,294	-2,294	14,882	10,420	-17,880	16,720	11,943

При оценке достоверности результатов ЯФО руководствуемся методическими указаниями [7]. Оценка достоверности проводилась путем сопоставления данных, полученных ЯФО с данными кернового опробования. При этом, согласно методических указаний [7], данные опробования по скважинам, которые использовались при построении градуировочных характеристик, в материалы по оценке достоверности не включаем. При оценке достоверности данных ЯФО используются данные по 12 скважинам.

В табл. 8 приведены данные кернового и ЯФО по скважинам контрольной выборки. Из 12 скважин 9 попадают в интервал допустимой погрешности безо всяких дополнительных условий. Природу больших отклонений определения зольности и значимость возможного систематического расхождения еще следует определить. В табл. 9. приведены описательные статистики результатов сопоставления данных кернового и ЯФО.

Таблица 8. Сопоставление данных кернового и ЯФО, контрольная выборка

№ скв.	Зольность, %		Разница
	по данным ГО	по данным ЯФО	
115\k	34,28	33,92	0,36
194\k	29,98	29,46	0,52
64\k ₂	37,81	39,99	-2,18
131\k	21,78	24,1	-2,32
55\k	61,66	64,85	-3,19
57\k	22,11	25,72	-3,61
209\k	35,47	31,72	3,75
52\k	15,68	20,08	-4,4
47\k	15,95	20,59	-4,64
138\k ₂	18,07	23,73	-5,66
80\k	10,64	17,19	-6,55
217\k	32,78	24,76	8,02
154\k	23,04	32,64	-9,6
214\k	33,33	22,44	10,89
211\k	33,54	22,5	11,04

Таблица 9. Описательные статистики результатов контрольного сопоставления

Параметр	Среднее значение	Доверительные границы для среднего		Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Стандартное отклонение	Стандартная ошибка
		- 99%	+ 99%						
A _d ГО	28,41	18,77	38,05	29,98	10,64	61,66	157,34	12,54	3,24
A _d ГГО-с	28,91	19,94	37,88	24,76	17,19	64,85	136,18	11,67	3,01
DELTA	-0,50	-5,35	4,34	-2,32	-9,60	11,04	39,77	6,31	1,63

Исходя из статистического анализа данных контрольного сопоставления, можно сделать вывод об отсутствии значимых систематических расхождений между данными кернового и ЯФО. Из данных таблиц 5 и 9 можно сделать вывод, что случайные расхождения между данными ЯФО и кернового опробования контрольной выборки не превосходят аналогичных расхождений, полученных при построении градуировочных графиков. Аппаратурный диапазон определений зольности для применяемой методики от 0 до 100%, следовательно, можно сделать вывод о соответствии аппаратуры и методики требованиям [7]. Методика осреднения данных ЯФО на интервалах кернового опробования такова, что значения коэффициентов вариаций зольности для отдельных пластосечений, подсчитанные по данным кернового опробования и по данным ЯФО близки.

Средняя плотность углей Сыллахского месторождения составляет 1,4 г/см³ при средней плотности вмещающих пород 2,5 г/см³. Угольные

пласты на кривых гамма-гамма-опробования плотностного (ГГО-п) фиксируются по максимуму интенсивности счета. Определение зольности углей по гамма-гамма-плотностными методами широко описано в литературе [1, 2]. Важным условием достоверности определения зольности углей является максимальное уменьшение влияния неоднородности промежуточной зоны и высокий коэффициент корреляции значений объемной плотности и зольности углей. При исследованиях на Сыллахском месторождении метод ГГО-п применялся как вспомогательный метод для отбраковки возможных каверн и задача определения зольности углей по данным ГГО-п перед исследованиями не ставилась. Но проведение исследований на высоком уровне качества, за сравнительно короткий срок (менее 3 лет) и стабильная работа аппаратуры ППГР-1, подтвержденная регламентными работами на контрольно-градуировочной скважине, позволили провести сопоставление данных ГГО-п и зольности углей по ряду керновых скважин. При проведении

сопоставления авторы руководствовались следующими принципами: привлечение к сопоставлению всех данных ЯФО без исключения (субъективная отбраковка данных не проводилась); использование при сопоставлении ненормированных данных ЯФО (гамма-фон в пределах Сыллахского месторождения примерно одного уровня и аппаратура в период исследований работала стабильно); при определении геометрических параметров пластосечений использовались данные гамма-гамма-опробования селективного, как метода, обладающего максимальной разрешающей способностью.

Таким образом, при проведении сопоставления исходные данные максимально засорены – не учтены ни вариации гамма-фона, ни аппаратурные девиации. Подобная методика сопоставления выбрана сознательно – при прочих равных результаты подобного сопоставления хуже быть не могут – только лучше. Методика предварительной

обработки данных аналогична методике обработки ГГО-с описанной выше. По сути говоря, подготовка данных ГГО-п и кернового опробования к сопоставлению свелась к определению истинных границ пластосечений, проведенному еще в рамках сопоставления данных ГГО-с и кернового опробования. Далее работа проводилась по уже апробированной процедуре – сопоставление данных о зольности керновых проб и осредненного отсчета ГГО-п на интервале опробования; сопоставление зольности и данных ГГО-п, осредненных в скользящем окне шириной 6% абсолютных (рис. 10). Рис. 11 иллюстрирует увеличение коэффициента корреляции – от значения $-0,8692$ на первом этапе сопоставления до значения $-0,9697$ на втором этапе сопоставления. Убедившись в значимости величины коэффициента корреляции, перейдем к получению уравнения регрессии $A_d = f(I_{\text{ГГО-п}})$.

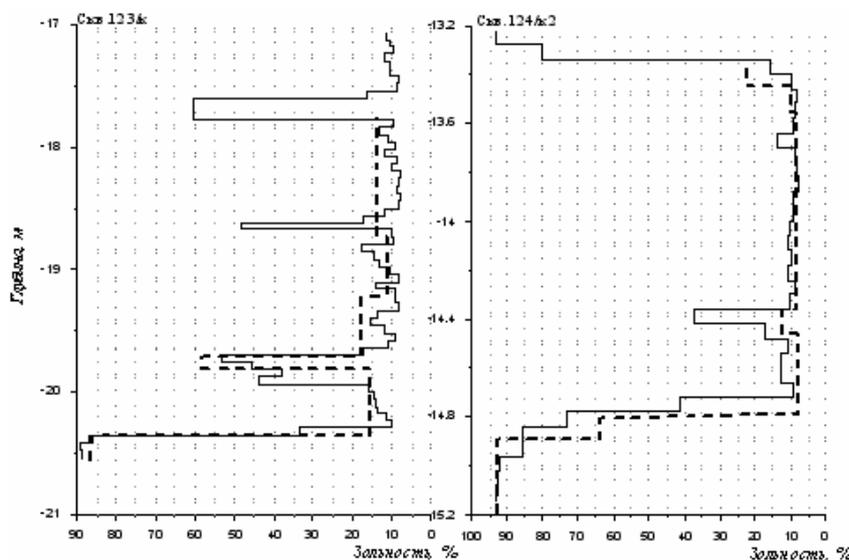


Рис. 10. Гистограммы зольности угольных пластов, построенные по данным кернового опробования и по данным ЯФО



Рис. 11. Градуировочная зависимость зольности углей от интенсивности счета ГГО-п

Уравнение регрессии представим в виде полинома четвертой степени, при этом будем использовать значения натурального логарифма интенсивности счета ГГО-п. На графике рис. 12 представлена кривая зависимости $A^d = f(I_{\text{ГГО-п}})$, полученная в результате сопоставления. Следует оговориться, что функциональная зависимость не непрерывна: четко видно, что в интервале 45-60% зольности находится некая точка перелома, но, по большому счету, в рамках исследования нас интересуют значения зольности от первых процентов до 45% - «угольный» интервал, и во

избегание излишних усложнений, прерывностью уравнения регрессии можно пренебречь. В сопоставлении были приняты к рассмотрению данные по 9 скважинам (263 керновые пробы). Для достоверной оценки результатов определим среднепластовую зольность для скважин, данные по которым в сопоставлении не участвовали. Итак, рассмотрим скважины 55/к, 52/к, 57/к, 64/к2, 115/к, 154/к и 80/к, пройденные в ходе исследовательских работ на Сыллахском месторождении.

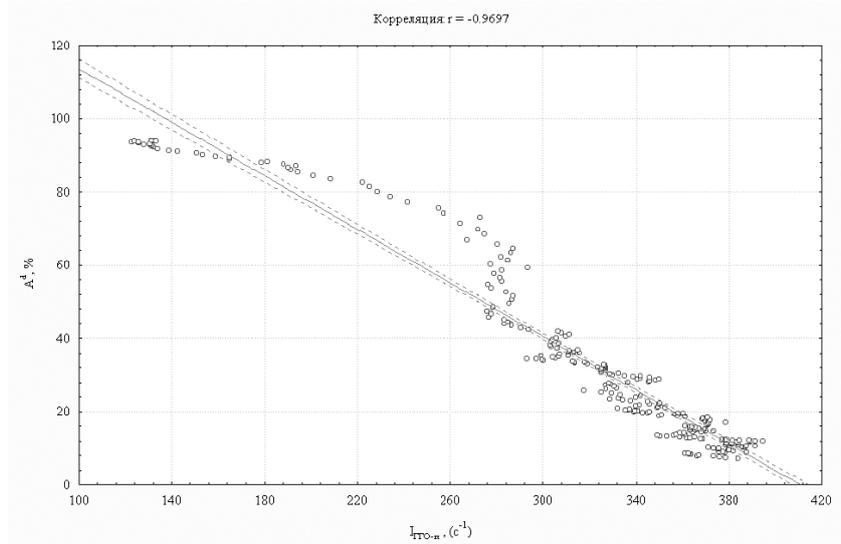


Рис. 12. Вычисление коэффициента корреляции зольности углей и интенсивности счета ГГО-п

Выбор данных для получения уравнения регрессии был случаен, так же случаен был выбор скважин для оценки результатов сопоставления. Подобный подход позволяет максимально достоверно оценить возможность определения зольности углей по данным ГГО-п. Пересчет данных ГГО-п в зольность производился по уже апробированной на обработке данных ГГО-с методике – с помощью специально написанных макросов. В табл. 10 приведены данные оценки погрешности определения среднепластовой зольности по данным ГГО-п. Очевидно, что даже полная выборка дала вполне удовлетворительные результаты – абсолютная погрешность определения зольности составила 6,51% в среднем по

всем заверочным скважинам. Рассмотрение погрешностей по отдельным скважинам позволило отбраковать данные по скважине 64/к2 – скважина вскрыла пласт сложного строения и разрешающая способность ГГО-п не позволяет получить удовлетворительные результаты в подобном разрезе – и по скважине 80/к – сопоставление данных ГГО-с, ГГО-п и кернового опробования позволяет усомниться в достоверности данных – имеет место существенное занижение зольности по данным кернового опробования. Отбраковка этих скважин приводит к величине абсолютной ошибки определения зольности равной четырем процентам – вполне удовлетворительной для энергетических углей [5].

Таблица 10. Погрешности определения зольности по данным ГГО-п

Скв.	$A^d_{\text{ГО}}$	$A^d_{\text{ГГО-п}}$	Δ	Скв.	$A^d_{\text{ГО}}$	$A^d_{\text{ГГО-п}}$	Δ
55/к	61	69	-8	55/к	61	69	-8
52/к	15,68	17,14	-1,46	52/к	15,68	17,14	-1,46
57/к	22,4	25,72	-3,32	57/к	22,4	25,72	-3,32
64/к2	38,32	48,14	-9,82	115/к	34,28	41,99	-7,71
115/к	34,28	41,99	-7,71	154/к	23,18	22,64	0,54
154/к	23,18	22,64	0,54				
80/к	10,64	26,41	-15,77				
Средняя ошибка			-6,5057	Средняя ошибка			-3,99

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Арцыбашев, В.А.* Ядерно-геофизическая разведка. – М., Атоммаш, 1972. 400 с.
2. *Варварин, Г.Б.* Плотностной гамма-гамма-метод в геофизике / Г.Б. Варварин, Е.М. Филлипов. – Новосибирск, Наука, 1972. 231 с.
3. *Гриб, Н.Н.* Изучение зольности угольных пластов геофизическими методами исследований скважин в Южно-Якутском каменноугольном бассейне / Автореф. дис.к.г.-м.н. – М., РТП ВНИИГеофизика, 1994. 19 с.
4. Гриб, Н.Н. Метод микро-гамма-гамма-каротажа и опыт его применения в Южно-Якутском угольном бассейне: учебное пособие / Н.Н. Гриб, М.И. Логинов, А.В. Самохин. – Якутск, изд.ЯГУ, 1999. 100 с.
5. Инструкция «Технические требования угольной промышленности к геологоразведочным работам и исходным геологическим материалам, представляемым для проектирования шахт и разрезов». – М.: Мингео СССР, 1986. 78 с.
6. *Макаров, А.Н.* Возможности детального изучения угольных пластов методом мГТК в Южно-Якутском бассейне / А.Н. Макаров, М.И. Логинов // Вестник ЛГУ. 1977. № 24. С. 6.
7. Оценка достоверности данных ядерно-геофизических методов опробования, на месторождениях твердых полезных ископаемых (методические рекомендации МУ-41-06-027-83). – М.: ВНИИЯГ, 1983. 34 с.
8. *Рыжков, П.А.* Применение математической статистики при разведке недр / П.А. Рыжков, В.М. Гудков. – М.: Недра, 1992. 276 с.
9. Самохвалова, Л.Д. Отчет о результатах предварительной разведки угольных пластов К4 и К12 на Сыллахском месторождении и детализации участка первой очереди отработки за 1997-2001 гг. в 7-ми книгах / Л.Д. Самохвалова и др. – Чульман, 2002, книга 1. 280 с.
10. *Уткин, В.И.* Селективный гамма-гамма-картаж на угольных месторождениях. – М., Наука, 1975. 128 с.
11. *Уткин, В.И.* Спектр рассеянного гамма-излучения на малых расстояниях от источника // Атомная энергия. 1970. Т. 29, вып. 1. С. 38.
12. *Сясько, А.А.* Технология геолого-геофизического изучения выходов угольных пластов в криолитозоне / Автореферат дис. к.т.н. – Владивосток, 2003. 18 с.

**APPLICATION OF NUCLEAR-PHYSICAL APPROBATION
FOR STUDYING THE ASH CONTENT IN COAL LAYERS**

© 2011 A.A. Syasko, N.N. Grib, A.V. Kachaev

Technical Institute (branch) of Northeast Federal University, Neryungri

The technique of nuclear-physical approbation (NPA) for studying the ash content in coal layers in natural occurrence is considered, realization the technique on concrete coal-field is shown, statistical estimation of an offered technique is resulted.

Key words: *nuclear-physical approbation, probe, approbation, hole, coal, ash content*

Andrey Syasko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Mathematics and Computer Science. E-mail: siasko@rambler.ru

Nikolay Grib, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director on Scientific Work. E-mail: grib@nfygu.ru.

Andrey Kachaev, Chief of the Physics of Frozen Rocks Laboratory. E-mail: Kachaev67@gmail.com