

ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

УДК 553.94; 550.8.04: 550.832

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.1.7>EDN: [BLSTPQ](#)**Статистическая физико-геологическая модель Солнцевского угольного месторождения (о. Сахалин) по данным геофизических исследований скважин**С.В. Снопков^{1,2}, Н.М. Максимов¹, С.С. Токарева¹¹*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*²*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. Геофизические исследования скважин являются основным методом выделения угольных пластов при изучении геологического разреза. На примере Солнцевского угольного месторождения показана эффективность использования статистического анализа при интерпретации данных ГИС. Проведенная статистическая обработка данных позволила более корректно выделить петрофизические комплексы, представленные в геологическом разрезе. Сформированная статистическая физико-геологическая модель геологического разреза месторождения позволила рекомендовать дополнительные способы интерпретации геофизических данных.

Ключевые слова: угольные месторождения, геофизические исследования скважин, статистический анализ, петрофизический комплекс, физико-геологическая модель, статистические методы интерпретации геофизических данных

Statistical Physico-geological Model of the Solntsevo Coal Deposit (Island Sakhalin) According to the Data of Geophysical Well SurveysS.V. Snopkov^{1,2}, N.M. Maksimov¹, S.S. Tokareva¹¹*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*²*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. Geophysical studies of wells are the main method of extracting coal seams when studying a geological section. Using the example of the Solntsevsky coal deposit, the effectiveness of using statistical analysis in interpreting geophysical data is shown. The statistical processing of the data made it possible to more correctly identify the petrophysical complexes represented in the geological section. The formed statistical physico-geological model of the geological section of the deposit allowed us to recommend additional ways of interpreting the geophysical data.

Keywords: coal deposits, geophysical studies of wells, statistical analysis, petrophysical complex, physico-geological model, statistical methods of interpretation of geophysical data

Статья получена: 23.01.2025; исправлена: 12.02.2025; принята: 14.02.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Снопков С.В., Максимов Н.М., Токарева С.С. Статистическая физико-геологическая модель Солнцевского угольного месторождения (о. Сахалин) по данным геофизических исследований скважин // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 7–22. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.7. EDN: [BLSTPQ](#)

Article received: 23.01.2025; corrected: 12.02.2025; accepted: 14.02.2025.

FOR CITATION: Snopkov S.V., Maksimov N.M., Tokareva S.S. Statistical physico-geological model of the Solntsevo coal deposit (Island Sakhalin) according to the data of geophysical well surveys // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 7–22. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.7. EDN: [BLSTPQ](#)

пласты угля; 20 – фаунистические остатки. Структуры: СА – Соболевская антиклиналь; УС – Углегорская синклиналь; ЗС – Западная синклиналь (Угольные..., 1999).

Fig. 1. Schematic geological map of the Solntsevo deposit. (1) – the Central section; (2) – the second stage of the Southern section; (3) – the first stage of the Southern section. Deposits: 1 – modern (Q_{VI}); 2 – Kurasi formation (N_{1kr}); 3 – Verkhneduy formation (N_{1vd}); 4 – Kholm formation (N_{1hl}); 5 – Arakai formation (P_{2ag}); 6 – deposit boundary; 7 – site boundary; 8 – formation boundaries; 9 – axes anticlines; 10 – axes of synclines; 11 – discontinuous faults. Stratigraphic column: 12 – sandstones; 13 – siltstones; 14 – mudstones; 15 – buttock-shaped siltstones; 16 – tuffites; 17 – tuffogenic sandstones; 18 – tuffogenic siltstones; 19 – coal beds; 20 – faunal remains. Structures: СА – Sobolevskaya anticline; УС – Uglegorsk syncline; ЗС – Western syncline (Coal..., 1999).

Несмотря на то, что существуют типовые комплексы методов ГИС для изучения различных типов полезных ископаемых, а также стандартизированные подходы к интерпретации результатов, каждый геологический объект имеет свои особенности и, следовательно, требует корректировки методики геологической интерпретации данных ГИС.

Месторождение приурочено к Углегорской синклинали, осложненной складками второго порядка — Восточной и Западной

синклиналями, разделенными Центральным антиклинальным поднятием. Антиклинальное поднятие разделяет участки «Центральный» и «Южный». Восточная синклиналь в пределах участка «Южный» имеет длину около 6 км, ширину от 1.2 до 3 км. Западное крыло складки залегает относительно полого ($20-40^\circ$), восточное крыло — круто ($70-80^\circ$). Днище складки пологое и осложнено разрывными нарушениями (рис. 2).

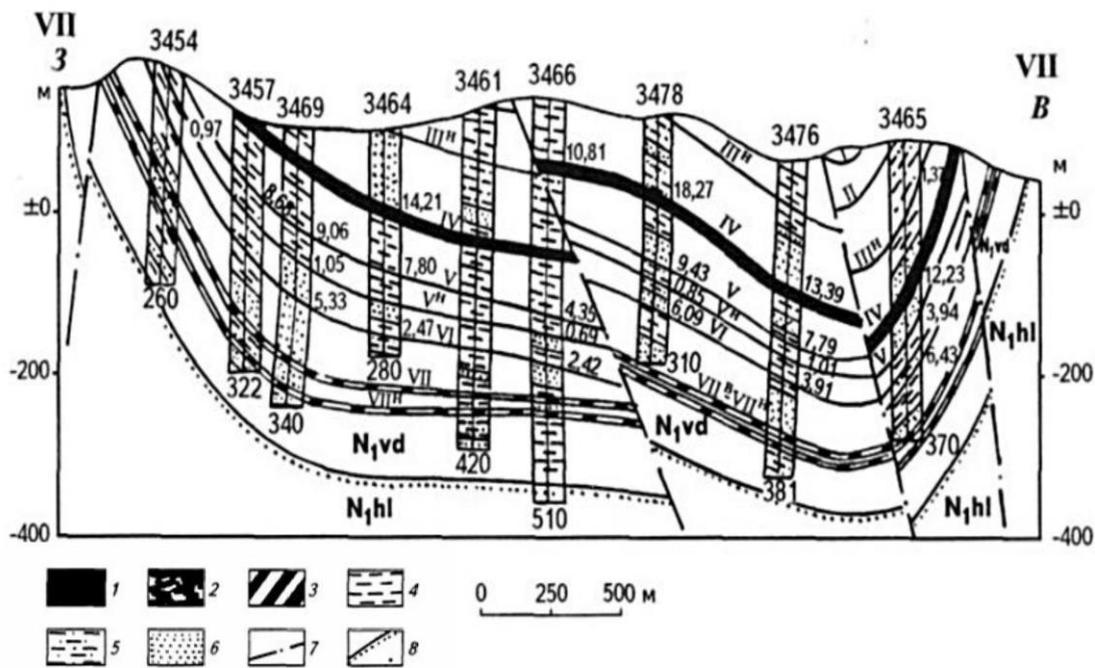


Рис. 2. Схематический геологический разрез Восточной синклинальной складки по линии VII–VII (участок Южный II Солнцевского месторождения). 1 – угли; 2 – зольные угли; 3 – углистые аргиллиты; 4 – аргиллиты; 5 – алевролиты; 6 – песчаники; 7 – тектонические разрывы; 8 – стратиграфические контакты. Положение линии разреза показано на рис. 1 (Угольные..., 1999).

Fig. 2. Schematic geological section of the Eastern synclinal fold along line VII–VII (Yuzhny II site of the Solntsevo deposit). 1 – coals; 2 – ash coals; 3 – carbonaceous mudstones; 4 – mudstones; 5 – siltstones; 6 – sandstones; 7 – tectonic faults; 8 – stratigraphic contacts. The position of the cut line is shown in Fig. 1 (Coal..., 1999).

Залежи бурых углей были открыты в 30-е годы XX столетия японскими геологами во

время крупномасштабных геологических съемок. Впервые площадь месторождения

оконтурена в результате специализированной съемки в 1949 г., начиная с 1975 года на месторождении велись целенаправленные поисковые и разведочные работы. По результатам этих работ были детально изучены и расчленены палеогеновые и неогеновые отложения района.

В геологическом строении месторождения участвуют осадочные и вулканогенно-осадочные отложения палеогенового, неогенового и четвертичного возрастов. Угли залегают в верхнедуйской свите миоцена (N_{1vd}), которая представлена пресноводно-континентальными отложениями, сменяющимися вверх по разрезу прибрежно-морскими. Угленосная свита сложена песчаниками, алевролитами и аргиллитами; содержит 12 пластов угля, 8 из которых имеют промышленное значение. Мощность пластов изменяется от 1.60 до 17.90 м (Угольные..., 1999).

Ископаемые угли Солнцевского месторождения относятся к группе гумолитов, образовавшихся из продуктов преобразования отмерших высших растений в условиях автохтонного их накопления. Угли всех угольных пластов полублестящие, блестящие, полуматовые. Угли бурые, переходные к каменным; характеризуются следующими показателями качества: зольность – 3.5–30.5 %, плотность – от 1.42 до 1.63 г/см³, влага аналитическая – 1.4–15.4%, выход летучих веществ – 40.1–56.6 %, содержание серы – 0.12–1.84 %, теплотворная способность – 6027–7442 ккал/кг (Угольные..., 1999).

Запасы угля на месторождении превышают 300 млн т. На Центральном участке отработка угля велась шахтным способом с 1928 по 1948 гг. С 1982 г., начата добыча угля карьерным способом разрезом «Никольский» ЗАО «Углегорскуголь». С ноября 1997 г. отработка угля на месторождении производится Солнцевским углеразрезом АО «Угольная корпорация Сахалина». Месторождение имеет большие перспективы для эксплуатации как шахтным, так и карьерным способом (Угольные..., 1999).

В настоящее время идет активная разведка месторождения. Бурение скважин сопровождается комплексными каротажными исследованиями.

Комплекс ГИС, применяемый на месторождении

Геофизические исследования скважин решают следующие геологические задачи: 1) литологическое расчленение разреза; 2) выявление интервалов углей и углистых пород; 3) оценка зольности углей.

Типовой комплекс ГИС включает: каротаж сопротивлений (КС), с применением последовательного градиент-зонда (А 1.0 М 0.1 N); боковой токовый каротаж (БТК); каротаж потенциала собственной поляризации (ПС), с применением градиент-зонда (М 0.1 N); гамма-каротаж (ГК); гамма-гамма каротаж плотностной (ГГКп); гамма-гамма каротаж селективный (ГГКс).

Электрический каротаж выполняется с помощью регистратора «ВУЛКАН V3», который позволяет измерять и преобразовывать в цифровую форму сигналы, принимаемые от скважинной геофизической аппаратуры и наземных датчиков контроля спускоподъемных операций. Радиоактивный каротаж выполняется с помощью аппаратуры «Кура 2М».

Метод КС не применяется для исследований в «сухих» скважинах, но поскольку на Солнцевском месторождении уровень подземных вод высокий, то метод, в комплексе с БТК, используется для определения удельного электрического сопротивления горных пород (УЭС). Бурые угли выделяются более высокими значениями УЭС по сравнению с глинами, глинистыми породами и песками, насыщенными водой.

Боковой токовый каротаж специально разработан для углеразведочных скважин, как для сухих, так и заполненных буровым раствором либо водой. Зонд БТК состоит из центрального измерительного электрода A_0 (длиной 2 см), и 2-х экранных электродов $A_{э1}$ и $A_{э2}$, (длиной 75 см каждый). Все электроды разделены изоляционными промежутками, шириной 2 см. Регистрирующий прибор измеряет силу тока, протекающего через измерительный электрод A_0 . Так как все электроды соединены последовательно, то их электрический потенциал одинаков и ток с электрода A_0 вынужден растекаться перпендикулярно оси скважины. Диаграммы БТК расчленяют разрез скважин по величине УЭС

и позволяют выделять угольные слои мощностью от 3–5 см и более. Определение УЭС в методе КС отличается от БТК тем, что в первом случае ток течёт поперек пласта (параллельно оси скважины), во-втором – вдоль (перпендикулярно оси скважины). Совместная интерпретация КС и БТК позволяет более уверенно дифференцировать разрез по УЭС.

Метод ПС основан на изучении естественных электрических полей, возникающих на границе горных пород и бурового раствора. Возникновение естественных электрических полей в скважине, связано либо с процессами фильтрации и диффузии флюидов по поровому пространству горных пород, либо с окислительно-восстановительными реакциями, протекающими в электронных проводниках. Аномалии ПС напротив угольных пластов вызваны окислительно-восстановительными реакциями. Пористые водонасыщенные породы создают фильтрационно-диффузионные потенциалы, выражающиеся в виде слабых знакопеременных аномалий.

Гамма-каротаж измеряет естественную радиоактивность исследуемых горных пород. В геологическом разрезе Солнцевского месторождения наиболее высокими значениями интенсивности гамма-квантов (J_γ) обладают глинистые породы (аргиллиты). Угли имеют самые низкие значения J_γ и достаточно уверенно выделяются в разрезе по ГК.

Плотностной гамма-гамма-каротаж основан на изучении комптоновского рассеяния γ -квантов в горных породах и позволяет определять плотность горных пород. Так как уголь обладает гораздо более низкой плотностью по сравнению с вмещающими породами, то ГГКп может рассматриваться как прямой метод выделения угольных интервалов. Плотность углей составляет 1.15–1.75 г/см³, что значительно ниже плотности песчано-глинистых вмещающих пород – 2.5–2.7 г/см³. Интенсивность потока вторичных гамма-квантов ($J_{\gamma\gamma}$) обратно пропорциональна плотности, поэтому менее плотные породы выделяются повышением значений $J_{\gamma\gamma}$.

Селективный гамма-гамма-каротаж основан на изучении эффекта фотопоглощения γ -квантов в горных породах. На угольных

месторождениях ГГКс применяется для определения зольности углей. Чистый уголь имеет $Z_{эф} \approx 6$ ($Z_{эф}$ – эффективный порядковый номер). Негорючий остаток углей (зола) состоит, в основном, из кремнезема и глинозема с примесью окислов железа, и имеет $Z_{эф}$ равный 12–13 единиц.

Пример каротажной диаграммы комплекса методов ГИС и геологической интерпретации каротажных данных показан на рис. 3.

Важным элементом для определения последовательности и характера интерпретационных процедур является построение физико-геологической модели (ФГМ) объекта геофизических исследований. Методология построения ФГМ была предложена Г.С. Вахромеевым и развита в трудах А.Ю. Давыденко (Вахромеев и др., 1987; Вахромеев и др., 1989).

На рис. 3, фактически, показана ФГМ геологического разреза. Интервалы углей и углистых пород выделяют по понижению значений ГК и повышению значений ГГКп и ГГКс. Угли отличаются от углистых пород повышенными значениями УЭС и понижением регистрируемого тока по КС и БТК, соответственно. На диаграммах ПС (градиент-зонд) угольные и углистые пласты выделяются знакопеременной аномалией, экстремумы которой находятся в районе границ толщи. На диаграммах КС (градиент-зонд) более четко определяются границы угольного пласта по экстремумам аномалии УЭС. Литологическое расчленение вмещающих пород – разделение толщ аргиллитов и алевролитов – производится, в основном, по ГК. Оценка зольности углей осуществляется по данным ГГКс.

Статистическая геологическая геологического разреза

физико- модель

Одним из способов представления объекта исследования являются статистические ФГМ, которые используются в том случае, когда горные породы слабо дифференцируются по физическим свойствам или в физических полях. Последовательность процедур при формировании статистической ФГМ включает: 1) разделение геологического

пространства на ряд геологических объектов; 2) выбор эталонных участков (интервалов скважины) для каждого из выделенных объектов; 3) расчет статистических характеристик физических полей по выбранным

эталонным участкам для каждого геологического объекта; 4) анализ полученных статистических характеристик и формирование ФГМ (Вахромеев и др., 1989, с. 38–39).

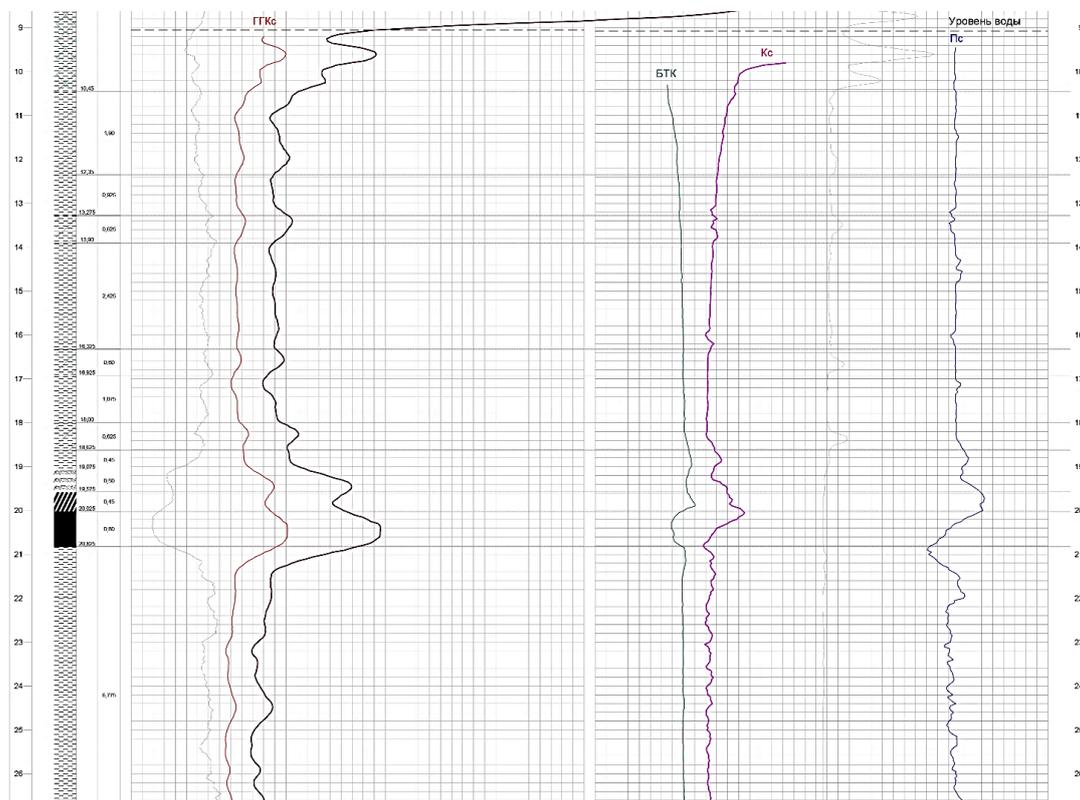


Рис. 3. Фрагмент диаграммы геофизических исследований и геологической интерпретации данных по скв. 25–37 (участок Южный II, Солнцевское месторождение). Масштаб 1:200. Каротажные кривые слева направо: ГК; ГГКс; ГГКп; БТК; Кс; Пс.

Fig. 3. Fragment of the diagram of geophysical studies and geological interpretation of data for sq. 25–37 (Yuzhny II site, Solntsevskoye field). Scale 1:200. Logging curves from left to right: GL; GGLs; GGLd; SCL; LR; SEP.

Как показано выше, в рамках детерминированной ФГМ геологического разреза Солнцевского месторождения, по данным ГИС уверенно выделяются только угли, а вот дифференциация углистых, глинистых и песчаных пород происходит неоднозначно. Чтобы повысить эффективность решения геологических задач с помощью комплекса ГИС авторами был проведен статистический анализ каротажных данных и сформирована статистическая ФГМ геологического разреза.

Для анализа были использованы результаты ГИС по двум скважинам: № 25–37 (диаметр – 89 мм, глубина 41 м) и № 25–79 (диаметр – 89 мм, глубина 50 м). Каротажные работы были выполнены в марте 2024 года.

Данные были собраны во время производственной практики магистрантом ИГУ Максимовым Н.М.

Этапы построения статистической ФГМ включали:

- определение литологических типов, встречающихся в разрезе месторождения;
- выделение интервалов скважин, представленных каждым литологическим типом;
- выбор значений геофизических параметров для интервалов, представленных определенным типом горных пород;
- оценка характера распределения геофизических параметров и выявление петрофизических таксонов (ПФТ) по выборкам для каждого литологического типа (ПФТ –

совокупность горных пород одного литологического типа, имеющая квазиоднородные физические свойства);

- выделение групп горных пород квазиоднородных по физическим свойствам – петрофизических комплексов (ПФК), и расчет статистических характеристик геофизических параметров для них; (Вахромеев Г.С. и Давыденко А.Ю. предложили подобные совокупности пород называть структурно-вещественными комплексами (СВК) (Вахромеев и др., 1989, с. 16), однако, по мнению авторов, название «петрофизический комплекс» более корректно отражает смысл этих совокупностей);
- построение ФГМ и определение последовательности интерпретационных процедур.

Формирование выборок данных по комплексу ГИС для различных типов горных пород

По геологическому описанию разрез представлен пятью типами горных пород: алевролиты, аргиллиты, углистые аргиллиты, уголь зольный, уголь. По документации скважин 25–37 и 25–79 были выбраны интервалы глубин, которые по описанию керна соответствуют перечисленным типам горных пород.

Для каждого типа горных пород по интервалам были выбраны значения геофизических параметров. Из всего комплекса ГИС (ГК, ГГКп, ГГКс, КС, БТК, ПС) для анализа были использованы только 3 метода: ГК, ГГКп и БТК. Данные ГГКс были исключены, так как кривые этого метода полностью дублируют кривые ГГКп – коэффициент корреляции равен 1(!). Также не использовались данные КС и ПС, поскольку измерения в этих методах выполнялись градиент-зондами, которые более контрастно выделяют участки резкого изменения физических свойств разреза. Аномалии КС и ПС градиент-зондами

для пластов дают знакопеременные аномалии, что не позволяет четко определять характерные значения физических параметров для определенного литологического типа.

Выборки значений физических параметров методов ГК, ГГКп и БТК составляли от 30 до 370 значений (аргиллиты – 370, алевролиты – 163, углистые аргиллиты – 30, зольные угли – 35, угли – 41). Разный размер выборок связан с неравномерностью присутствия в разрезе разных типов горных пород. Наименьший размер имеет выборка значений по углям и углистым породам.

Выявление петрофизических таксонов

Для корректного расчета статистических характеристик необходимо оценить характер распределения данных в выборке. Характер распределения значений физических параметров, полученных по ГИС, оценивался путем построения гистограмм (Дэвис Дж., 1977). Диапазон изменения физического параметра брался совокупно для всех типов горных пород и разбивался на одинаковые интервалы. Затем подсчитывалась частота попаданий значений в каждый интервал.

На рис. 4, 5, 6 показаны гистограммы геофизических параметров по ГК, ГГКп и БТК (соответственно) отдельно для различных литологических типов и суммарно для всех.

Оценка соответствия выборки геофизического параметра нормальному распределению была выполнена с помощью метода Е.И. Пустыльника, который заключается в расчете показателей асимметрии (A) и эксцесса (E) для каждой выборки, и сравнении их с критическими значениями. Если модуль эмпирических величин A и E не превышает критического значения, то выборка не противоречит нормальному распределению значений параметра (Пустыльник, 1968, с. 152–155).

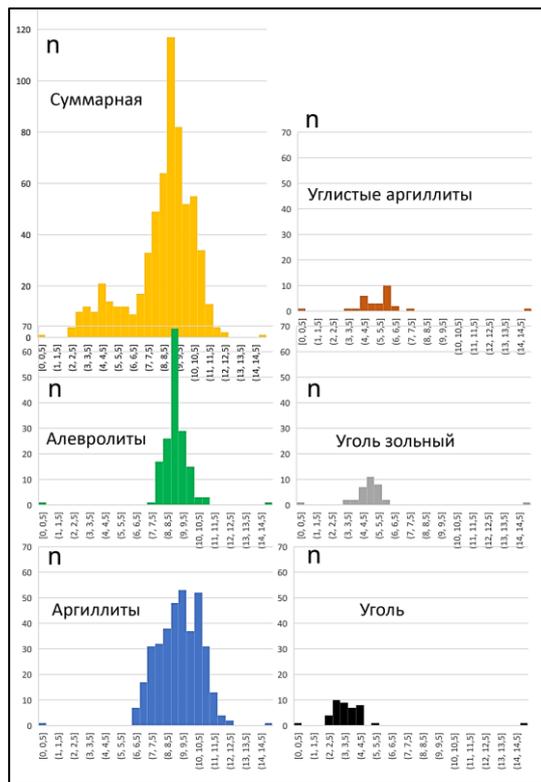


Рис. 4. Гистограммы интегральной радиоактивности (ГК) для различных литотипов.

Fig. 4. Histograms of integral radioactivity (GL) for various lithotypes.

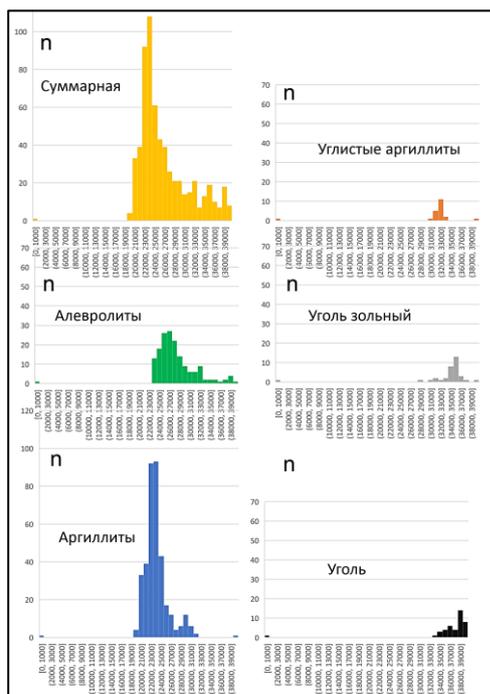


Рис. 5. Гистограммы интенсивности вторичных гамма-квантов (ГГКп) для различных литотипов.

Fig. 5. Histograms of integral radioactivity (GGLd) for various lithotypes.

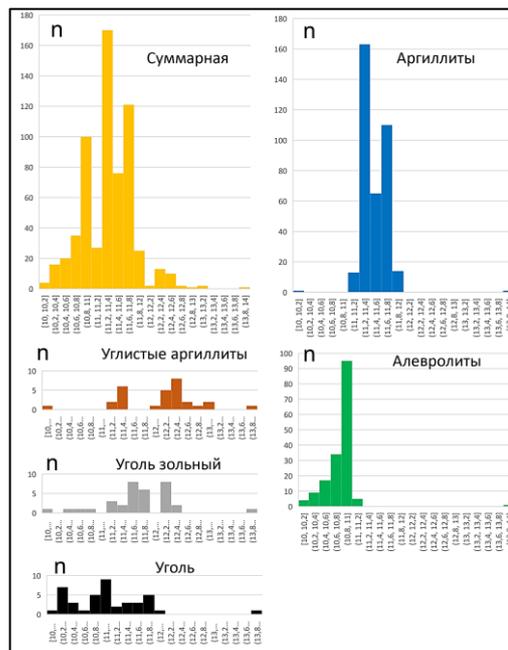


Рис. 6. Гистограммы силы тока (БТК) для различных литотипов.

Fig. 6. Histograms of integral radioactivity (SCL) for various lithotypes.

Характер гистограмм (рис. 4) показал, что для всех литотипов характерно распределения величин не противоречит нормальному только у ГК. Для ГГКп наблюдается более сложный характер распределения: у аргиллитов двухмодальное распределение; у алевролитов, аргиллитов, углистых аргиллитов и зольных углей выборки не соответствуют нормальному распределению. По данным БТК также имеет место более сложное распределение изучаемого параметра (чем разделение на 5 литотипов). Аргиллиты, углистые аргиллиты, зольный уголь имеют двухмодальное распределение, а угли – трехмодальное.

Анализ гистограмм (по модальным интервалам) позволяет выделить 5 ПФТ по ГК; 6 по ГГКп; 10 по БТК. Это свидетельствует о том, что разрез представлен большим количеством петрофизических таксонов, по сравнению с числом выделенных литотипов. То есть, в рамках одного типа горных пород могут выделяться 2–3 петрофизических таксона. При этом таксоны, выделяемые по

одному геофизическому параметру, могут не соответствовать ПФТ по другому каротажному методу. Также нельзя исключать того, что сложность распределения геофизических данных предопределена неточностью описания керна и его привязки по глубине. В этом случае, горные породы с физическими свойствами, характерными для одного ПФТ, могут попасть в выборку другого таксона.

Таким образом, проведенный анализ показал, что первоначально сформированные по литологическим признакам группы пород не соответствуют совокупностям, выделенным по геофизическим данным. При этом, в случае двух- (и более) модальных распределений разделить выборку на отдельные ПФТ достаточно проблематично.

Таблица 1

Эмпирические значения асимметрии (A) и эксцесса (E) для выборок различных литотипов по ГК, ГГКп и БТК

Table 1

Empirical values of asymmetry (A) and kurtosis (E) for samples of various lithotypes according to GL, GGLd and SCL

Статистики	Алевриты	Аргиллиты	Углистые аргиллиты	Зольный уголь	Уголь	Все горные породы
ГК						
Кол-во значений (n)	163	370	30	35	41	639
Асимметрия (A)	0.40	-0.08	0.06	-0.58	0.37	0.61
Эксцесс (E)	0.26	-0.78	-0.05	-0.23	-0.57	-1.05
ГГКп						
Кол-во значений (n)	163	370	30	35	41	639
Асимметрия (A)	1.24	2.06	1.55	-1.47	-0.83	1.09
Эксцесс (E)	1.32	1.33	1.46	2.28	-0.12	0.18
БТК						
Кол-во значений (n)	163	370	30	35	41	639
Асимметрия (A)	-1.35	0.26	-0.38	-0.92	0.11	0.21
Эксцесс (E)	1.38	-1.29	-1.07	0.94	-1.04	0.85

* Желтым фоном выделены значения, превышающие критические.

Выделение петрофизических комплексов

Для выделения ПФК был проведен анализ распределения геофизических параметров каротажных методов по парно (рис. 7, 8, 9).

По ГК и ГГКп все горные породы образуют три ПФК: угли, углистые аргиллиты и вмещающие породы (аргиллиты и алевриты) (рис. 7). На диаграмме видна зависимость радиоактивности от плотности – чем выше плотность горных пород (ниже поток вторичных гамма-квантов), тем выше

радиоактивность. По диаграмме ГГКп – БТК достаточно уверенно выделяется шесть петрофизических комплексов: ПФК-1 – угли; ПФК-2 – «зольные» угли; ПФК-3 – углистые породы; ПФК-4 – аргиллиты; ПФК-5 – алевритистые аргиллиты; ПФК-6 – алевриты (рис. 8). Диаграмма БТК – ГК в целом дублирует распределение литотипов на диаграмме ГГКп – БТК (рис. 9) – также выделяется шесть ПФК.

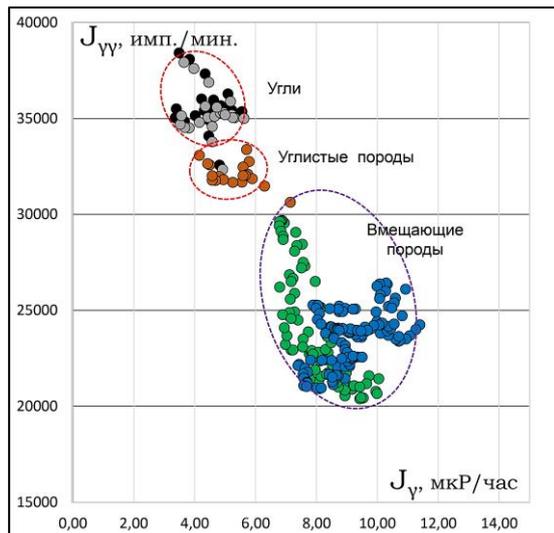


Рис. 7. Диаграмма значений интенсивности потока вторичных гамма-квантов ($J_{\gamma\gamma}$) по ГГКп и интегральной интенсивности гамма-квантов (J_{γ}) по ГК для горных пород эталонных выборок. Цвет точек: черный – угли, серый – зольные угли, оранжевый – углистые аргиллиты, синий – аргиллиты, зеленый – алевролиты. Области, выделенные пунктирными линиями, показывают петрофизические комплексы.

Fig. 7. Diagram of the values of the intensity of the flux of secondary gamma rays ($J_{\gamma\gamma}$) according to GGLd and the integral intensity of gamma rays (J_{γ}) according to GL for rocks of reference samples. The color of the dots: black – coals, gray – ash coals, orange – carbonaceous mudstones, blue – mudstones, green – siltstones. The areas highlighted by dotted lines show petro-physical complexes.

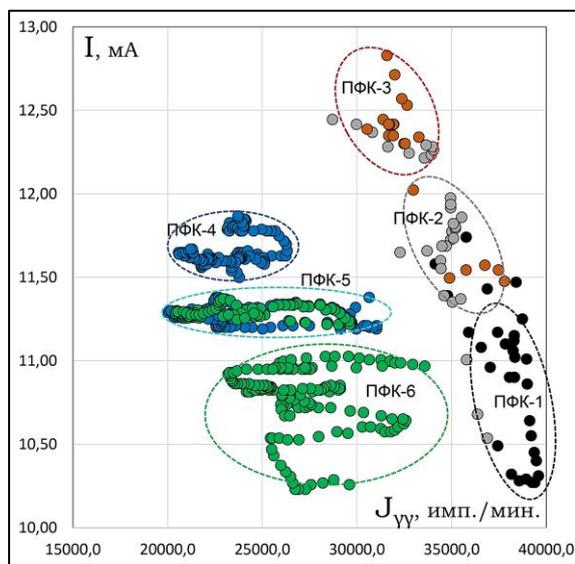


Рис. 8. Диаграмма значений силы тока (I) по БТК и интенсивности потока вторичных гамма-квантов ($J_{\gamma\gamma}$) по ГГКп для горных

пород эталонных выборок. Обозначения те же, что на рис. 7.

Fig. 8. Diagram of the values of the current strength (I) according to SCL and the intensity of the flux of secondary gamma rays ($J_{\gamma\gamma}$) according to GGLd for rocks of reference samples. The designations are the same as in Fig. 7.

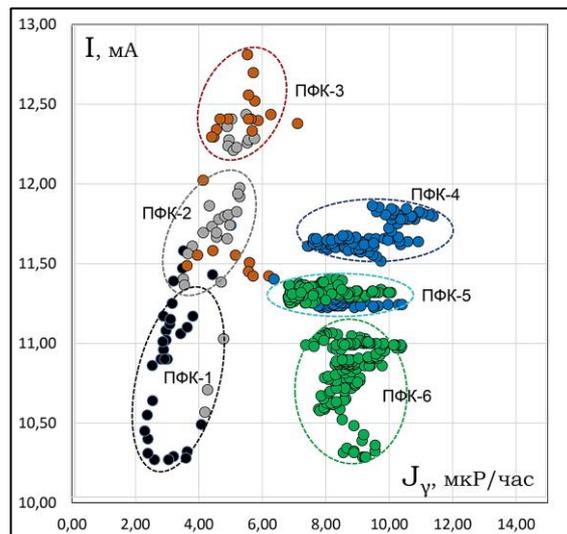


Рис. 9. Диаграмма значений силы тока (I) по БТК и интегральной интенсивности гамма-квантов (J_{γ}) по ГК для горных пород эталонных выборок. Обозначения те же, что на рис. 7.

Fig. 9. Diagram of the values of the current strength (I) according to SCL and the integral intensity of gamma rays (J_{γ}) according to GL for rocks of reference samples. The designations are the same as in Fig. 7.

Из анализа диаграмм можно сделать следующие выводы о петрофизической характеристике геологического разреза:

1. Угли, зольные угли, углистые породы образуют единую последовательность, у которой в зависимости от количества углистого материала меняются физические свойства – с увеличением углистости происходит плавное повышение УЭС, уменьшение плотности и радиоактивности. Кроме того, на диаграмме видно, что ряд интервалов скважин, которые были отнесены к определенным типам углей и углистых пород, по геофизическим данным не подтверждаются. Так, например, горные породы, определяемые как углистые аргиллиты и зольные угли, попадают в один петрофизический комплекс (ПФК-3), при этом в другом комплексе (ПФК-2), также

включающем углистые аргиллиты и зольные угли, попадают интервалы углей.

Разделение на ПФК этих пород относительно условно. Вся совокупность углей и углистых пород, как видно на рис. 8, была разделена на три ПФК: угли; «зольные» угли (чтобы не путать с литотипом название ПФК взято в кавычки); углистые породы (по своим свойствам значимо отличающиеся от аргиллитов).

2. Для вмещающих пород наблюдается уменьшение плотности и увеличение УЭС от аргиллитов к алевролитам. По радиоактивности значимого различия между этими горными породами, вопреки ожидаемому, не наблюдается. На диаграмме БТК – ГГКп (рис. 8) видно, что вмещающие породы разделяются на три ПФК. Кроме аргиллитов и алевролитов, выделяется ещё один промежуточный комплекс – алевритистые аргиллиты.

Последний литотип геологи не выделяют при описании керна – относя эти породы то к алевролитам, то к аргиллитам. Однако, по электрическому сопротивлению этот комплекс определяется достаточно четко.

Статистическая физико-геологическая модель

После анализа данных и выделения ПФК, были заново сформированы выборки значений, соответствующих этим комплексам. При этом были исключены участки контактов разных типов горных пород, так как для них характерны переходные значения геофизических параметров, которые некорректно отражают свойства горных пород. В таблице 2 представлена статистическая ФГМ геологического разреза Солнцевского угольного месторождения в числовом виде.

Таблица 2

Статистическая ФГМ геологического разреза

Table 2

Statistical PGM of the geological section

Статистические показатели	ПФК					
	ПФК-1 уголь	ПФК-2 «зольный» уголь	ПФК-3 углистая порода	ПФК-4 аргиллит	ПФК-5 алеврити- стый аргил- лит	ПФК-6 алевролит
Число значений в выборке	28	38	29	120	201	150
J_{γ}, мкР/час (ГК)						
Среднее значение (χ)	3.14	4.28	5.21	8.86	8.18	9.29
Стандартное отклонение (S)	0.62	0.64	0.66	0.61	0.96	1.02
Медиана (Me)	2.99	4.32	5.17	8.79	8.16	9.16
Минимальное значение (X_{min})	2.3	3.16	4.02	7.73	6.29	7.42
Максимальное значение (X_{max})	4.7	5.56	7.15	10.55	10.58	11.61
Асимметрия (A)	0.76	0.04	0.64	0.53	0.32	0.19
Экссесс (E)	0.01	-0.91	1.26	0.28	-0.73	-0.79
$J_{\gamma\gamma}$, имп./мин. (ГГКп)						
Среднее значение (χ)	38208	35767	32409	23425	24065	27024
Стандартное отклонение (S)	1015	1314	1271	1464	3242	2492
Медиана (Me)	38313	35526	32231	23725	22892	26547
Минимальное значение (X_{min})	35905	32569	28807	20618	20059	23000
Максимальное значение (X_{max})	39589	38739	34445	26367	31131	32875
Асимметрия (A)	-0.64	0.34	-0.60	-0.14	0.68	0.61
Экссесс (E)	-0.37	0.64	1.19	-0.71	-0.83	-0.26
I, мА (БТК)						

Среднее значение (χ)	10.74	11.68	12.46	11.66	11.28	10.76
Стандартное отклонение (S)	0.33	0.21	0.23	0.09	0.05	0.2
Медиана (Me)	10.88	11.69	12.42	11.63	11.28	10.82
Минимальное значение (X_{min})	10.27	11.25	12.04	11.50	11.19	10.19
Максимальное значение (X_{max})	11.17	12.16	13.05	11.87	11.38	11.02
Асимметрия (A)	-0.21	-0.04	1.34	0.98	0.05	-1.25
Экссесс (E)	-1.62	-0.63	2.05	-0.28	-0.5	1.13
Коэффициенты корреляции						
$R_{ГК-ГКп}$	-0.64	-0.25	-0.11	0.51	-0.61	-0.55
$R_{ГК-БТК}$	0.12	0.48	0.19	0.64	-0.17	0.15
$R_{БТК-ГКп}$	-0.54	-0.33	-0.33	0.23	-0.22	-0.17
$R_{крит. (95\%)}$	0.38	0.33	0.38	0.19	0.19	0.19

* Желтым фоном выделены значения, превышающие критические.

На рис. 10, 11, 12, 13 статистическая ФГМ представлена в графическом виде.

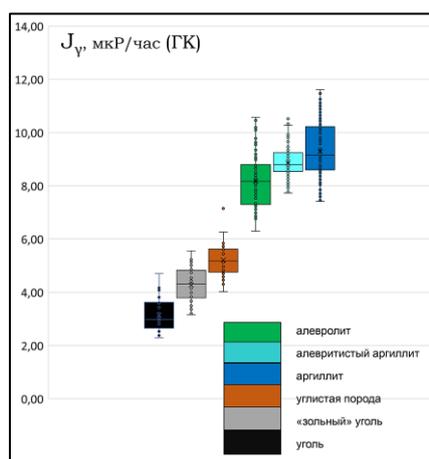


Рис. 10. Статистическая ФГМ по ГК. Обозначения: горизонтальная линия – медиана; наклонный крестик – среднее значение; вертикальная линия – диапазон изменения значений в выборке; закрашенный прямоугольник – область, в которую попадают 50 % значений выборки.

Fig. 10. Statistical PGM for GL. Designations: horizontal line – median; slanted cross – average value; vertical line – range of values in the sample; filled rectangle – area where 50 % of the sample values fall.

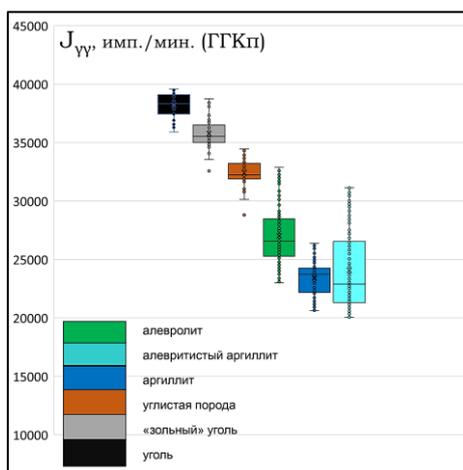


Рис. 11. Статистическая ФГМ по ГКп. Обозначения см. рис. 10.

Fig. 11. Statistical PGM for the GGLd. The designations are shown in Fig. 10.

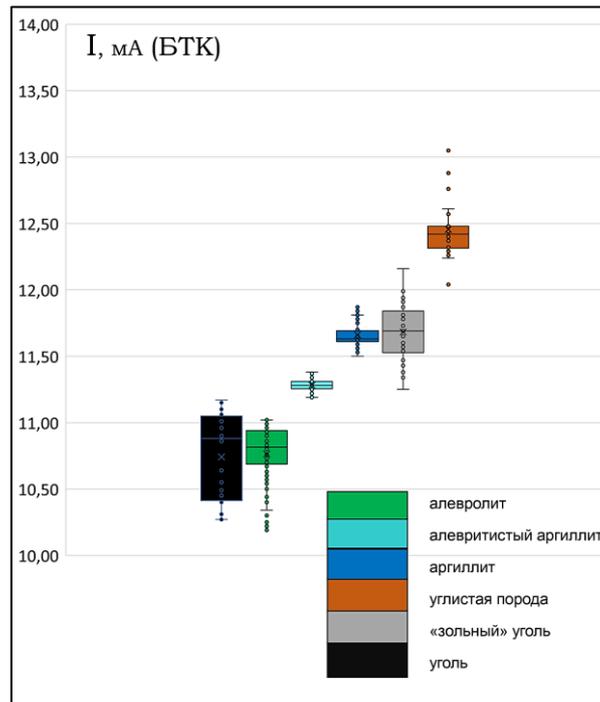


Рис. 12. Статистическая ФГМ по БТК. Обозначения см. рис. 10.

Fig. 12. Statistical PGM for the SCL. The designations are shown in Fig. 10.

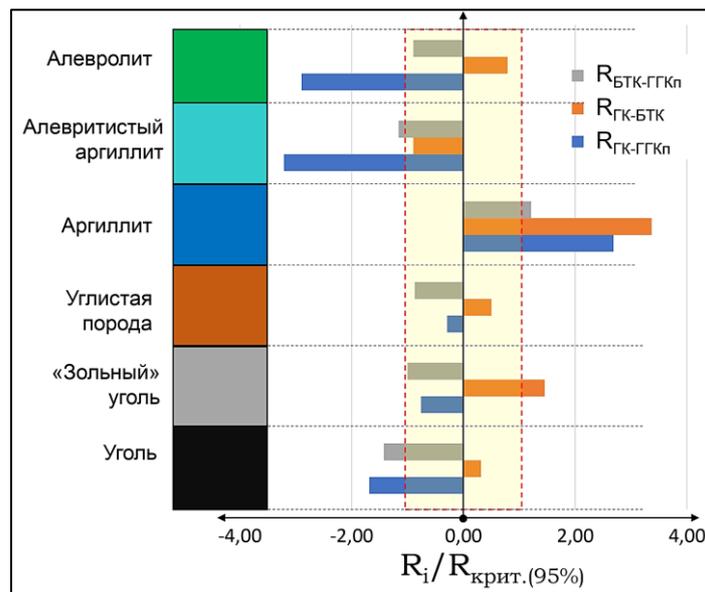


Рис. 13. Статистическая ФГМ, отражающая корреляционные связи между геофизическими параметрами. По горизонтальной оси отложены величины коэффициентов корреляции, нормированные на критическое значение для данной выборки при 95-% вероятности. Желтым цветом выделена область значений R_{XY} , не превышающих $R_{крит}$ (95 %).

Fig. 13. Statistical PGM reflecting correlations between geophysical parameters. The values of the correlation coefficients are plotted along the horizontal axis, normalized to a critical value for a given sample with a 95 % probability. The range of R_{XY} values not exceeding $R_{крит}$ is highlighted in yellow (95 %).

Представленная в числовом и графическом виде комплексная статистическая ФГМ

показывает характер различия геофизических параметров для каждого из выделенных

ПФК. Значения A и E для сформированных ПФК (табл. 2) показывают, что все полученные выборки не противоречат нормальному распределению величин, а значит использование для описания выборок таких статистических характеристик как среднее значение (χ) и стандартное отклонение (S) вполне корректно.

Широкий разброс значений геофизических параметров для выделенных ПФК показывает, что ни один каротажный метод не может однозначно решить задачу по литологическому расчленению разреза. Эта задача может быть решена лишь путем комплексной интерпретации.

Особый интерес заслуживают выявленные корреляционные связи между результатами ГК, ГГКп и БТК. Для разных ПФК они имеют различный характер. Так, например, у углей наблюдается значимая обратная зависимость данных ГГКп от ГК и БТК; у зольных углей – значимая прямая зависимость БТК и ГК; а у углистых пород корреляция геофизических данных отсутствует. Резко различаются корреляционные зависимости алевролитов и аргиллитов: у первых наблюдается значимая прямая зависимость радиоактивности от плотности, у вторых – обратная. Кроме того, аргиллиты имеют прямую корреляцию данных БТК с ГК и ГГКп. Интересно, что алевристые аргиллиты по своей корреляционной характеристике значительно ближе к алевролитам, чем аргиллитам.

Интерпретация данных ГИС на основе статистической ФГМ

По результатам данного исследования можно рекомендовать дополнить методику интерпретации результатов ГИС расчетом и анализом статистических характеристик геофизических данных.

На основе созданной статистической ФГМ интерпретацию данных можно осуществлять следующими способами:

1) сравнивать полученные значения в процессе выполнения ГИС с характеристиками

выделенных ПФК, и определять к какому из них может относиться данный интервал разреза;

2) рассчитывать статистические параметры в «скользящем окне»: χ или (и) Me ; S , R_{xy} ; размер «окна» выбирать исходя из мощности изучаемых пластов геологического разреза; рассчитанные характеристики сравнивать с эталонными выборками для каждого типа ПФК и определять их тождество.

И тот и другой подход будут более эффективными при комплексном анализе геофизических данных. При таком подходе использование статистической ФГМ позволяет:

1) более надежно разделять «вмещающие» и «углистые» породы путем совместного анализа ГГКп и ГК;

2) выполнять литологическое расчленение «вмещающих» пород на алевролиты, алевристые аргиллиты и аргиллиты преимущественно по данным БТК, при этом совместный анализ БТК с ГГКп и ГК увеличивает эффективность интерпретации.

3) осуществлять разделение углистых пород, «зольных» и низкозольных углей по комплексу методов ГГКп, ГК и БТК, в том числе, с использованием корреляционных зависимостей геофизических данных.

Для более точного разделения углей и углистых пород можно использовать зависимость УЭС (БТК), плотности (ГГКп) и радиоактивности (ГК) от качества углей – чем больше угля в горной породе, тем выше удельное электрическое сопротивление, ниже плотность, соответственно, ниже ток (БТК) и выше поток вторичных гамма-квантов (ГГКп). На рис. 14 приведена взаимозависимость значений ГГКп и БТК ($R_{\text{БТК-ГГКп}} = -0.88$). Фактически, эти два параметра связаны линейной зависимостью. На диаграмме выделены области, относящиеся к различным петрофизическим комплексам. Для любого участка разреза по значениям ГК, ГГКп, БТК можно качественно оценить степень углистости пород.

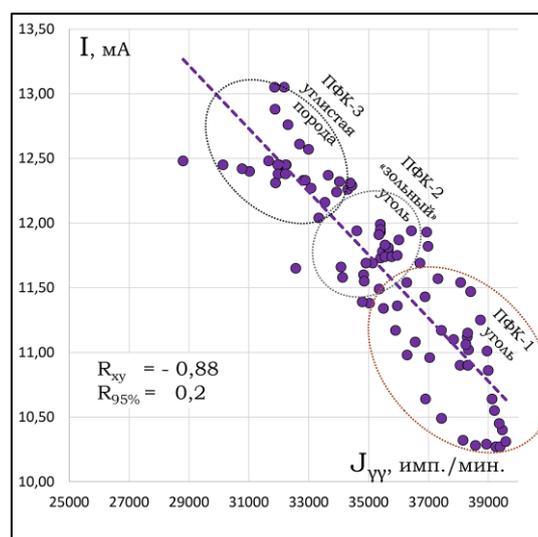


Рис. 14. Диаграмма зависимости силы тока (I) по БТК и интенсивности потока вторичных гамма-квантов ($J_{\gamma\gamma}$) по ГТКп для углей и углистых пород. Области, выделенные пунктирной линией, показывают различные ПФК.

Fig. 14. Diagram of the dependence of the current strength (I) according to SCL and the intensity of the flux of secondary gamma rays ($J_{\gamma\gamma}$) according to GGLd for coals and carbonaceous rocks. The areas highlighted by the dotted line show different PPC.

Заключение

В результате проведенного статистического анализа геологической и каротажной информации было выявлено, что петрофизические группы не совпадают с литологическими типами, определенными по керну, а значит интерпретация данных ГИС не во всех случаях является корректной.

В ходе статистической обработки было выделено 6 петрофизических комплексов, соответствующих алевролитам, алевритистым аргиллитам, аргиллитам, углистым породам, «зольным» и низкозольным углям. Для каждого ПФК были рассчитаны статистические характеристики и определены диапазоны изменения физических параметров, по которым была построена статистическая ФГМ геологического разреза. Широкий разброс значений геофизических параметров для выделенных ПФК показывает, что ни один каротажный метод не может однозначно решать задачу по литологическому расчленению разреза. Это может быть сделано лишь путем комплексной интерпретации данных.

На основе созданной статистической ФГМ была скорректирована методика интерпретации каротажных данных, которая включает последовательные этапы: 1) разделение

вмещающих и углистых пород; 2) литологическое расчленение вмещающих пород; 3) разделение углистых пород по содержанию углистого материала. Причем эти интерпретационные процедуры необходимо выполнять путем анализа данных комплекса ГИС, в том числе, изучения корреляционных связей геофизических параметров.

На месторождении угли залегают на двух глубинных уровнях 20–40 м и 195–200 м. Описанная статистическая ФГМ была построена для поиска малоглубинных пластов. Для глубокозалегающих пластов данная модель требует уточнения, так как на более глубоких горизонтах физические свойства горных пород изменяются.

На примере Солнцевского угольного месторождения показано, что применение статистического анализа каротажных данных повышает эффективность интерпретации при решении геологических задач методами ГИС.

Литература

Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Комплексирование геофизических методов и физико-геологические модели: учеб. пособие. Иркутск: ИПИ, 1989. 88 с.

Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 192 с.

Дэвис Дж. Статистика и анализ геологических данных. М.: Мир, 1977. 572 с.

Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968. 288 с.

Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока России (Республика Саха, Северо-Восток, о. Сахалин, п-ов Камчатка) // Угольная база России. Том V. Книга 2. М.: ООО «Геоинформмарк», 1999. 638 с.

References

Vakhromeev G.S. Integration of geophysical methods and physico-geological models: Training

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,

664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Иркутский государственный университет,

доцент,

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 91, Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

научный сотрудник,

email: snopkov_serg@mail.ru.

Snopkov Sergey Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor,

Karl Marx st., 1, Irkutsk, 664003, Russia,

Irkutsk State University,

Associate Professor,

91 Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia,

Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,

Researcher,

email: snopkov_serg@mail.ru

manual / Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. Irkutsk: IPI, 1989. 88 p.

Vakhromeev G.S. Modeling in exploration geophysics / Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. Moscow: Nedra, 1987. 192 p.

Davis J. Statistics and analysis of geological data. Moscow: Mir Publ., 1977. 572 p.

Pustylnik E.I. Statistical methods of analysis and processing of observations. Pustylnik E.I. Moscow: Nauka Publ., 1968. 288 p.

Coal basins and deposits of the Russian Far East (Republic of Sakha, Northeast, Sakhalin Island, Kamchatka Peninsula) // Coal Base of Russia. Volume V. Book 2. Moscow: Geoinformmark LLC, 1999. 638 p.

Максимов Никита Михайлович,

выпускник магистратуры ИГУ,

664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Иркутский государственный университет,

email: nikitajr01@mail.ru

Maksimov Nikita Mikhailovich,

graduate of the ISU Master's degree program,

Karl Marx st., 1, Irkutsk, 664003, Russia,

Irkutsk State University,

email: nikitajr01@mail.ru

Токарева Светлана Сергеевна,

664003, Россия, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Иркутский государственный университет,

старший преподаватель,

email: tokareva_ss@mail.ru

Tokareva Svetlana Sergeevna,

Karl Marx st., 1, Irkutsk, 664003, Russia,

Irkutsk State University,

Senior lecturer,

email: tokareva_ss@mail.ru