

УДК 550.8314

Геофизические и петрофизические исследования по определению компонентного состава каменного угля Пермского края

Ю.К. Груздева, С.Г. Филиппева, А.В. ШумиловПермский государственный национальный исследовательский университет
614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

E-mail: jg.gruzdeva@gmail.com; shumilovav@psu.ru

(Статья поступила в редакцию 01.08.2025)

Для повышения точности оценки качества, газоносности и промышленной значимости угольных пластов исследование фокусируется на анализе и сравнении методов определения их компонентного состава. Ключевые этапы включают: характеристику геологического строения района, оценку угленосности и качества пластов, адаптационный анализ китайского опыта (бассейн Циньшуй) для условий Пермского края, определение петрофизических параметров углей. Практическая часть предполагает отбор проб угля с отвалов Гремячинского месторождения, лабораторные исследования их характеристик (зольность, плотность, пористость, радиоактивность) и статистическую обработку (корреляционный анализ) полученных данных.

Ключевые слова: геофизика, петрофизика, угольные пласты, метан угольных пластов, геофизические исследования в скважинах, компоненты экспресс-анализа, Кизеловский угольный бассейн (КУБ), корреляционный анализ.

DOI: 10.17072/psu.geol. 24.3.219

Введение

Современные вызовы требуют новых подходов к устойчивому развитию, включая природоподобные технологии, имитирующие естественные процессы для гармонизации техносферы и биосферы. Одним из примеров является управляемая скважинная добыча метана из угольных пластов (МУП) – контролируемый аналог природного выделения газа (Груздева и др., 2024). Угольные пласты во многих странах рассматриваются как источник ценного метана, а именно экологичная альтернатива углю, хотя его эффективная добыча остается актуальной задачей (Максимович и др., 2018). Наличие таких пластов в Пермском крае создает предпосылки для геофизических и петрофизических исследований потенциала добычи метана как наиболее экологичного и экономичного способа использования месторождений (Груздева и др., 2025).

Стратиграфическое положение угленосной формации на территории Пермского края

В исследовании рассматривается визейская угленосная формация, наиболее изученная в Кизеловском прогибе (мощность до 250–270 м на востоке). Практически все нефтяные скважины края вскрывают угленосный бобриковский горизонт (C_1V_2bb), содержащий до восьми пластов угля (с 11 по 23 по шкале Васильева П.В.), включая основные рабочие пласты КУБа (11-й и 13-й). Его мощность варьирует от 40–50 м на поднятиях до 90–100 м в опусканиях. В Пермском Приуралье горизонт распространен повсеместно, кроме северо-запада, сложен кварцевыми песчаниками с прослоями алевролитов, угля и железняков, его мощность на платформе составляет 0–56 м (Пахомов и др., 1980).

© Груздева Ю.К., Филиппева С.Г., Шумилов А.В. 2025



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Характеристика угленосности и качества угольных пластов

Угленосные отложения Кизеловского бассейна на платформе Пермского края залегают на глубинах 1300–3300 м (в Предуральском прогибе), в Удмуртии и Татарстане – 1000–1200 м. Данные об угленосности получены в основном нефтеразведкой, но низкий процент выхода керна уменьшает достоверность. Идентификация пластов и определение мощности часто возможны только по геофизическим исследованиям скважин (ГИС), несмотря на риск ошибок из-за углестых аргиллитов и высокозольных углей. Угли отличаются повышенной зольностью (12–45 %), обусловленной привнесением материала в торфяники, неравномерным распределением примесей и петрографическим составом (матовые угли зольнее). Комбинированный пласт 11+13 Гремячинского и Восточно-Гремячинского месторождений имеет среднюю зольность, повышенную серу, высокий выход летучих (до 43 %). Это газовые угли (на границе с длиннопламенными) средней обогатимости, непригодные для самостоятельного коксования, но высококалорийные, применяемые в энергетике и как химсырье (Максимович и др., 2018; Пахомов и др., 1980).

Комплекс геофизических исследований в скважинах для оценки метаноносности каменноугольных пластов

Традиционные методы ГИС в нефтегазовой отрасли измеряют ключевые свойства угольных пластов: интервальное время акустического сигнала (АС), естественное гамма-излучение (GR), плотность (DEN), данные нейтронного каротажа (CNL), удельное электрическое сопротивление (R), потенциал самопроизвольной поляризации (SP) и кавернометрию (CAL). Комплекс DEN, GR, CNL, АС, R идентифицирует резервуары метана угольных пластов (МУП), анализирует литологию и оценивает проницаемость. Сочетание DEN, АС, CNL позволяет вычислять упругие параметры (Хоу Цзе и др., 2016). Без керна весь комплекс ГИС служит для оценки метаноносности углей с минимизацией затрат.

Резервуары МУП, образованные из растительных остатков, отличаются от обычных коллекторов самовозгораемостью, высокой хрупкостью и низкой плотностью, что отражается в каротажных аномалиях. Для них типичны (Груздева и др., 2024; Хоу Цзе и др., 2016; Шумилов и др., 2015; Шумилов и др., 2015):

- повышенные АС (350–450 мкс/м), CNL-пористость (30–50 %), R и CAL;
- пониженные DEN (<1800 кг/м³), SP, GR (20–100 API (2–10 Бк/кг)).

Эти признаки могут быть использованы для идентификации и классификации резервуаров МУП. Опыт китайских геофизиков подтверждает успешное применение аналогичных методов ГИС для идентификации резервуаров МУП (Груздева и др., 2024; Хоу Цзе и др., 2016; Шумилов и др., 2023).

Интерпретация данных ГИС в скважинах, расположенных в районе Кизеловского угольного бассейна

При нефтеразведке вблизи северной и южной частей Кизеловского бассейна скважины вскрыли угольные пласты. Их отличаются характерные физические свойства для идентификации по данным ГИС: пониженная плотность, низкий фотоэффект (P_e), повышенное содержание водорода по нейтрон-нейтронному каротажу (ННК), высокие значения скорости продольной волны (DTP) по акустическому каротажу (АК) и широкий диапазон удельного сопротивления.

В скважине П-кой площади (рис. 1) стандартный комплекс ГИС выявил угольные пласты в бобриковском горизонте на глубинах 2584,2–2586,8, 2600,6–2601,2 и 2617,0–2618,3 м по снижению плотности (гамма-гамма каротаж плотностной (ГГК-П)). Скважина пробурена с углом до 61° в этих интервалах. Общая мощность угольных пропластков составила 4,5 м (Груздева и др., 2024).

Расчет компонентов экспресс-анализа

Компоненты экспресс-анализа угля (влажность M_{ad} , зольность A_{ad} , выход летучих V_{daf} и содержание связанного углерода FC_{ad}) являются основой оценки его качества, типа и газосодержания.

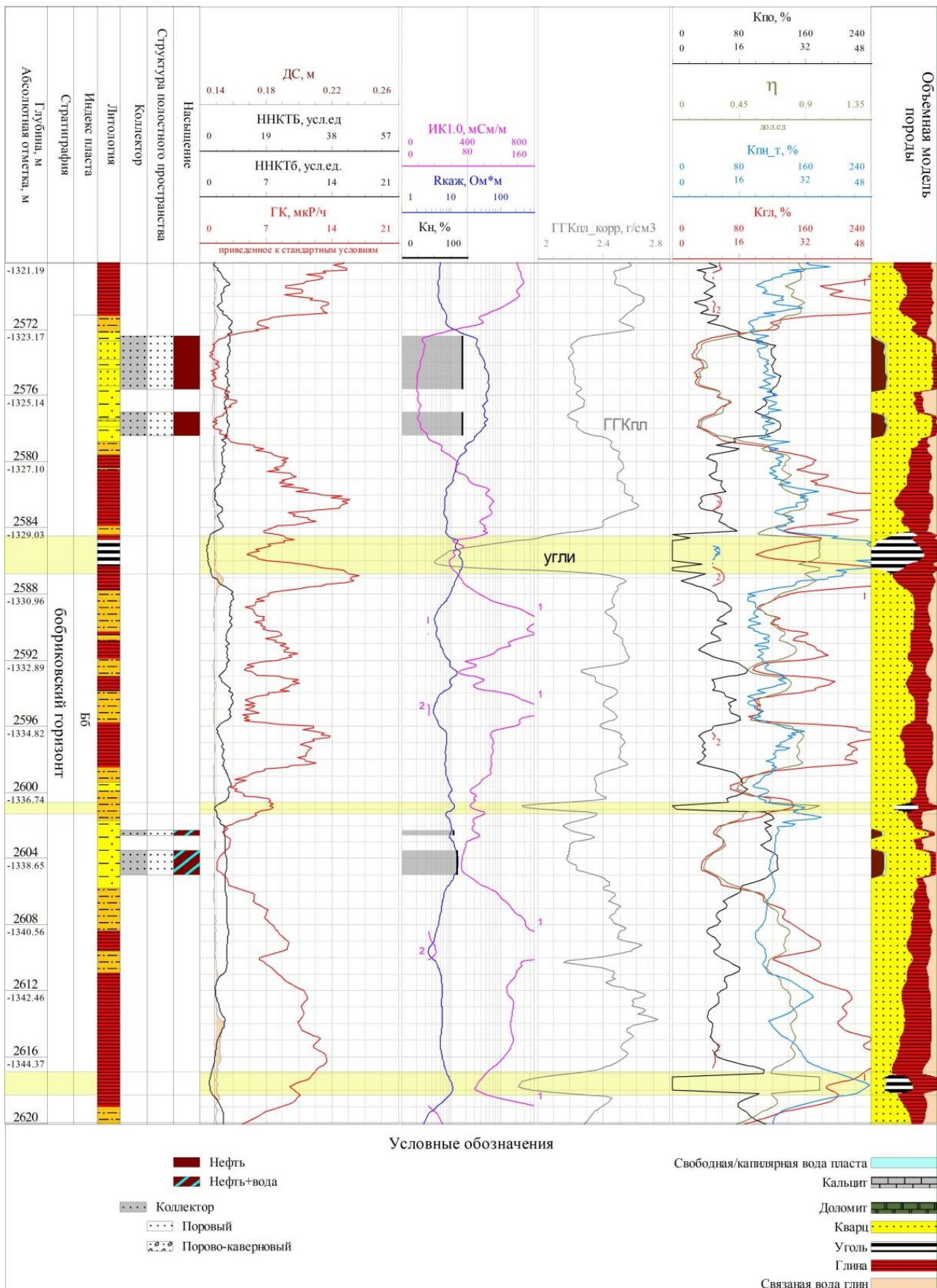


Рис. 1. Выделение угольных пластов по данным ГИС в скв. П-кой пл. (Груздева и др., 2024)

Для оценки компонентов применяют объемную модель ($M_{ad} + A_{ad} + V_{daf} + FC_{ad} = 1$) с использованием данных трех методов каротажа пористости и регрессионный анализ на основе петрофизических исследований проб и данных ГИС (Шумилов и др., 2015; Хоу Цзе и др., 2016).

Определение некоторых петрофизических параметров каменного угля

Для наработки методики оценки метаносности угольных пластов выполнены петрофизические лабораторные исследования 95 образцов угля из отвалов Гремячинского месторождения и 4 образцов керна из нефтяных скважин. Необходимо отметить, что начальный этап исследований первых 45 образцов угля из упомянутых отвалов был описан ранее в работе (Груздева и др., 2025).

Определялись: открытая пористость ($K_{по}$), плотность, зольность, концентрация радия (Ra), тория (Th), калия (K) и удельная массовая активность (J). Отбор проб в зоне естественных выходов обеспечил репрезентативность материала. Процесс исследования проб осуществлялся следующими методами: гравиметрическим анализом (зольность), определением коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением (открытая пористость), определением плотности грунта методом взвешивания в воде (объемная плотность), определением плотности частиц грунта пикнометрическим методом (минералогическая плотность), методом гамма-спектрометрии (концентрация радиоактивных элементов).

В результате исследований были получены следующие выводы.

Содержание золы колеблется от 4,51 до 39,35 %. Плотностные показатели демонстрируют следующие диапазоны значений: объемная плотность – 1,24–1,94 г/см³, минералогическая плотность – 1,11–1,68 г/см³. Открытая пористость изменяется от 0,94

до 16,92 %. Радиоактивные элементы распределены неравномерно: содержание радия составляет $0-13,52 \times 10^{-4}$ %, тория – $0-11,83 \times 10^{-4}$ %, калия – 0–2,02 %. Удельная массовая активность образцов варьирует от 8,32 до 207,46 Бк/кг, что отражает существенные различия в радиоактивных свойствах исследуемых углей.

Угольные пласты, выделенные по ГИС на П-ом и М-ом месторождениях, были подтверждены керном, исследованном нами в лаборатории на те же ключевые петрофизические параметры, что и образцы угля из отвала Гремячинского месторождения (табл. 1, 2).

Совместное использование данных ГИС и лабораторных исследований керна позволяет достоверно выделять угольные пласты и определять их характеристики. Результаты подтверждают надежность метода и служат основой для дальнейшего изучения угленосных отложений, в том числе оценки их метаносного потенциала.

Корреляционный анализ полученных данных

Корреляционный анализ образцов угля выявил значимые связи между физическими свойствами угольных пластов. Наиболее сильная зависимость между зольностью и плотностью: коэффициент корреляции 0,51 с объемной плотностью и 0,66 с минералогической (рис. 2–3). Это позволяет использовать плотность для прогноза зольности.

Связь плотности с пористостью слабая (коэффициенты 0,04 для объемной и 0,01 для минералогической).

Радиоактивные характеристики слабо коррелируют с плотностью (коэффициенты 0,06–0,18), наибольшие значения – для минералогической плотности с Th (0,18) и Ra (0,14).

Зависимость радиоактивных элементов от зольности также слабая (Ra-0,06, Th-0,03, K-0,15).

Таблица 1. Литологическая характеристика и зольность образцов керн по данным гравиметрического анализа

№ пп	Номер образца	Литологическая характеристика	Масса навески, г	Массовая доля золы угля, %	±Δ
2	Керн 1, обр. 2	Уголь каменный	1,052	15,96	0,64
3	Керн 1, обр. 3	Уголь каменный	1,104	11,29	0,45

Таблица 2. Открытая пористость, объемная плотность, минералогическая плотность, концентрации радиоактивных элементов и величина удельной массовой активности образцов керн

№ пп	Номер образца	Открытая пористость, %	Объемная плотность, г/см ³	Минералогическая плотность, г/см ³	С Ra, 10 ⁻⁴ %	С Th, 10 ⁻⁴ %	С К, %	Ј, Бк/кг
2	Керн 1, обр. 2	10,06	1,34	1,49	2,73	0,00	0,00	33,92
3	Керн 1, обр. 3	2,22	1,31	1,35	6,73	5,63	0,23	119,41

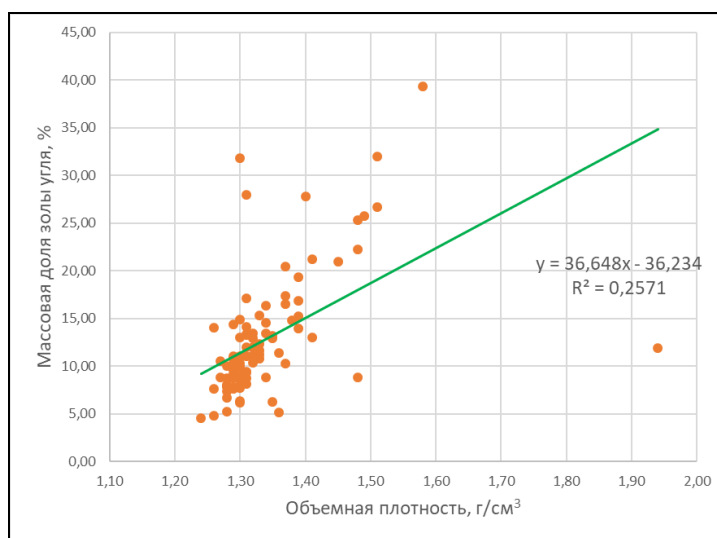


Рис. 2. График зависимости между объемной плотностью и зольностью

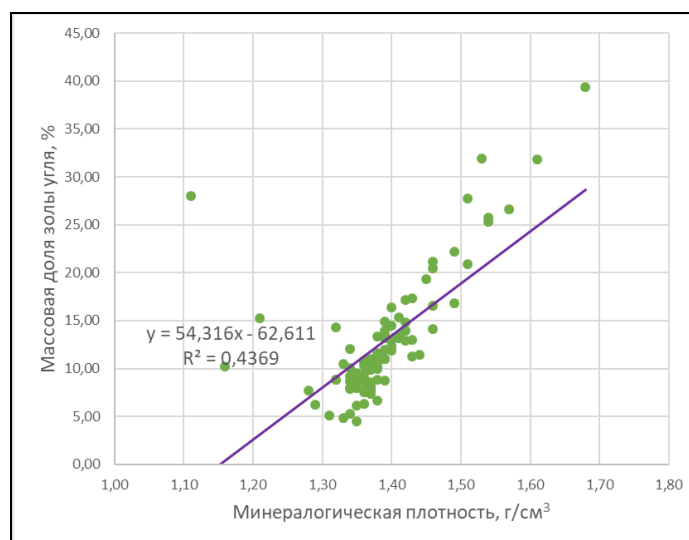


Рис. 3. График зависимости между минералогической плотностью и зольностью

Заключение

Проведенные исследования включали изучение геологии региона, оценку угленосности и качества пластов. Особое внимание уделено адаптации китайского опыта оценки метаноносности (бассейн Циньшуй) к условиям Пермского края. Проведены лабораторные исследования образцов угля с Гремячинского месторождения (зольность, плотность, пористость, радиоактивность) с последующим корреляционным анализом.

Устойчивые корреляции между геофизическими характеристиками угля и его фильтрационно-емкостными свойствами подтверждают возможность использования каротажных данных для прогнозирования метаноносности.

Результаты демонстрируют перспективность комплексного подхода, повышающего достоверность прогноза газоносности. Они могут быть использованы для оптимизации поисково-разведочных работ на метан угольных пластов в Пермском крае и снижения рисков газодинамических явлений. Исследование создает основу для совершенствования методов оценки угольных пластов.

Исследование выполнено при поддержке Пермского края, соглашение № С-26/1872

Библиографический список

Груздева Ю.К., Бадьянова И.В., Савинов И.В., Огородова И.В., Шумилов А.В. Определение петрофизических параметров каменного угля и регрессионный анализ полученных данных // НТВ

«Каротажник». 2025. Вып. 3 (335). С. 29–40. EDN: OXWZRF

Груздева Ю.К., Шумилов А.В., Сальникова О.Л. Выделение угольных пластов для оценки их метаноносности по данным геофизических исследований в скважинах // НТВ «Каротажник». 2024. Вып. 5 (331). С. 44–55. EDN: VYOVNO

Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения: монография. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2018. 288 с. ISBN: 978-5-7944-3181-0 EDN: JSJQPX

Пахомов В.И., Пахомов И.В. Визейская угленосная формация западного склона Среднего Урала и Приуралья. М.: Недра, 1980. 152 с.

Хоу Цзе, Цзоу Чанчунь, Ян Юйцин, Чжан Гохуа, Шумилов А.В. Оценка резервуаров метана угольных пластов по каротажным диаграммам: пример применения в южной части бассейна Циньшуй, Китай (часть II) // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. М.: Изд. «ВНИИОЭНГ», 2016. № 12. С. 40–45.

Шумилов В.А., Аксельрод С.М., Шумилов А.В. Геофизические исследования скважин при разведке и добыче метана угольных пластов. 2-е изд. доп.: монография. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2015. 148 с.

Шумилов А.В., Геник И.В., Нигматуллин Д.Ф., Сюели Хоу. Геофизические исследования скважин при разведке и добыче метана угольных пластов // НТВ «Каротажник». 2015. Вып. 10 (256). С. 32–43. EDN: UMSFWR

Шумилов А.В., Груздева Ю.К. Сравнительный анализ измеренных и расчетных компонентов для повышения точности определения содержания метана в угольных пластах // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2023. С. 270.

Geophysical and Petrophysical Studies to Determine the Component Composition of Coal in the Perm Region

Yu.K. Gruzdeva, S.G. Filipyeva, A.V. Shumilov

Perm State University

15 Bukireva St., Perm, 614068, Russia

E-mail: jg.gruzdeva@gmail.com; shumilovav@psu.ru

Study focused on the analysis and comparison of methods for determining coal seams component composition to improve the accuracy of assessing their quality, gas content and industrial significance. Key stages included: characterization of the geological structure of the area; assessment of coal-bearing capacity and reservoir quality; adaptation analysis of the Chinese experience (Qinshui basin) for the conditions of the Perm Region; determination of petrophysical parameters of coal. The practical part involves sampling coal from the Gremyachinsk deposit, labora-

tory studies of their characteristics (ash content, density, porosity, radioactivity) and statistical processing (correlation analysis) of the data obtained.

Key words: *Geophysics; petrophysics; coal seams; coalbed methane; geophysical research in wells; components of rapid analysis; Kizelovskiy coal basin; correlation analysis.*

References

Gruzdeva Yu.K., Badyanova I.V., Savinov I.V., Ogorodova I.V., Shumilov A.V. 2025. Determination of petrophysical parameters of coal and regression analysis of the obtained data. *Karotazhnik*. 3(335): 29-40. (in Russian)

Gruzdeva Yu.K., Shumilov A.V., Salnikova O.L. 2024. Isolation of coal seams to assess their methane content according to geophysics studies in wells. *Karotazhnik*. 5(331):44-55. (in Russian)

Maksimovich N.G., Pyankov S.V. 2018. Kizel coal basin: environmental problems and solutions. Perm. State. National Research. University of Technology, Perm, p. 288. (in Russian)

Pakhomov V.I., Pakhomov I.V. 1980. Visean coal-bearing formation of the western slope of the Middle Urals and the Urals. Moscow, Nedra, p. 152. (in Russian)

Hou Jie, Zou Changchun, Yang Yuqing, Zhang Guohua, Shumilov A.V. 2016. Estimation of coalbed methane reserves by mapping diagrams: an example of application in the southern part of the Qinshui basin, China (Part II). In: Construction of oil and gas wells on land and at sea. Moskva, VNIIOENG. 12:40-45. (in Russian)

Shumilov V.A., Axelrod S.M., Shumilov A.V. 2015. Geophysical studies of wells in the exploration and production of coalbed methane. 2nd ed. Perm, Perm State University, p. 148. (in Russian)

Shumilov A.V., Genik I.V., Nigmatulin D.F., Sueli Hou. 2015. Geophysical studies of wells in the exploration and production of coalbed methane. *Karotazhnik*. 10(256):32-43. (in Russian)

Shumilov A.V., Gruzdeva Yu.K. 2023. Comparative analysis of measured and calculated components to improve the accuracy of determination of methane content in coal seams. In: Theory and practice of exploration and field geophysics. Perm, PSU, p. 270. (in Russian)