ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.333:550.8:519.2
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-36-42

ORIGINAL ARTICLE
UDC 622.333:550.8:519.2

Определение параметров сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта

Е. А. Тагаев✉
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация
✉ *tagaev.egor@mail.ru*

Резюме. Предложен методический подход к определению параметров сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта на основе моделирования качественных показателей. Актуальность работы связана с тем, что среднепластовая оценка качества не позволяет надежно прогнозировать локальные интервалы ухудшения качества добываемой массы при сложном строении пласта. Подход апробирован на материале пласта Н16 Северо-Западного участка Эльгинского месторождения с выделением 3-й минерализованной пачки как самостоятельного геолого-технологического объекта. В расчетную выборку включено 115 скважин, для которых рассчитан показатель A_d100%, учитывающий полное засорение внутрипластовыми породными прослоями. По выборке A_d100% изменяется от 23,0 до 60,2 %, среднее значение составляет 35,0 %, коэффициент вариации – 17,5 %. Выполнены: статистический анализ, построение экспериментальной вариограммы, сопоставление сферической, гауссовой, экспоненциальной и линейной моделей, а также обыкновенный кригинг и анализ карты дисперсии кригинга. Установлено, что пространственная корреляция A_d100% слабая и нестабильная: уже на первом лаге вариограмма практически достигает порога, после чего колеблется вблизи *sill*. Карты изолиний A_d100% и дисперсии кригинга показали, что оценка достаточности сети должна базироваться не только на среднем расстоянии между скважинами, но и на конфигурации сети, локальной неоднородности качества и плотности наблюдений. Предложенный подход может использоваться для сопоставления рабочих сетей 14 × 14 и 20 × 20 м и для выделения участков локального сгущения опережающего опробования.

Ключевые слова: опережающее опробование, сложноструктурный пласт, зольность, A_d100%, ситово-фракционный анализ, вариограмма, кригинг, дисперсия кригинга, сеть опробования

Для цитирования: Тагаев Е.А. Определение параметров сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 36-42. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-36-42.

Determination of advance sampling grid parameters for coal quality control in a complex-structure seam

E. A. Tagaev✉
National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation
✉ *tagaev.egor@mail.ru*

Abstract. The paper proposes a methodological approach to determining the parameters of an advance coal sampling grid for a complex-structured seam based on quality indicator modelling. The approach is motivated by the fact that seam-average quality estimates do not reliably predict local intervals that deteriorate the quality of mined coal in seams of complex structure. The methodology was tested for seam H16 of the Northwestern block of the Elga deposit, where the 3rd mineralized pack was treated as an independent geological-technological object. The calculation sample included 115 boreholes, and the A_d100% index accounting for full contamination by intra-seam rock partings was calculated for each borehole. A_d100% ranges from 23.0 to 60.2 %, with an average of 35.0 % and a coefficient of variation of 17.5 %. The procedure included statistical analysis, construction of the experimental variogram, comparison of spherical, Gaussian, exponential and linear models, ordinary kriging, and analysis of the kriging variance map. It was found that the spatial correlation of A_d100% is weak and unstable: the variogram nearly reaches the sill already at the first lag and then fluctuates around it. The kriged contour map of A_d100% and the kriging variance map show that the adequacy of the advance sampling grid should be assessed not only by mean spacing, but also by the grid configuration, local quality heterogeneity and observation density. The proposed approach can be used to compare 14 × 14 m and 20 × 20 m operational grids and to delineate areas where local densification of advance sampling is required.

© Тагаев Е. А., 2026

Keywords: advance sampling, complex-structured seam, ash content, A_d100%, sieve-float analysis, variogram, kriging, kriging variance, sampling grid

For citation: Tagaev E.A. Determination of advance sampling grid parameters for coal quality control in a complex-structure seam. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 36-42. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-36-42.

Введение

Достоверный прогноз качества угля перед добычей является одной из основных задач геолого-маркшейдерского обеспечения открытых горных работ. Для угольных месторождений сложного строения качество не может рассматриваться только как лабораторная характеристика отдельной пробы. Оно является пространственно распределенным свойством геологического тела и одновременно производственным параметром, влияющим на направление угольной массы, шихтование, складирование и режим последующего обогащения. В условиях сложноструктурного пласта основную неопределенность формируют не только изменения мощности пласта, но и различия между угольными пачками, мощность и зольность породных прослоев, распределение минеральной части по крупности и плотностным фракциям, а также неоднородность технологических свойств угля.

В существующих исследованиях подробно рассмотрены вопросы представительности проб качества углей [1], влияния тонких породных прослоев на зольность и управления качеством при разработке сложноструктурных месторождений [2–4]. Отдельное направление составляют работы по оптимизации разведочных и опробовательских сетей, оценке влияния расстояний между точками наблюдений и использованию геостатистических критериев при классификации ресурсов и оценке качества [5–9]. Вариограммный анализ и кригинг применяются для моделирования показателей качества углей, построения прогнозных поверхностей и оценки неопределенности [10–16]. Вместе с тем в большинстве работ геостатистическое моделирование выполняется по пласту или по усредненному показателю, тогда как внутренняя пачечная дифференциация сложноструктурного пласта учитывается недостаточно полно [17–19].

Для практики опережающего опробования такой подход ограничен. Сеть, достаточная для общей характеристики пласта, может быть недостаточной для выделения локальной высокозольной пачки, которая при выемке формирует отдельный поток угольной массы с неблагоприятными технологическими свойствами. Напротив, чрезмерное сгущение сети на всей площади приводит к росту затрат на бурение и лабораторные исследования без гарантированного прироста информативности. Следовательно, параметры сети должны быть связаны с фактической пространственной изменчивостью именно того геолого-технологического интервала, который определяет риск ухудшения качества.

Цель статьи: разработка методического подхода к определению параметров сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта на основе моделирования качественных показателей.

В качестве исходной идеи принят переход от валовой оценки пласта к выделению целевой минерализованной пачки, расчету ее производственно значимого показателя зольности A_d100 %, вариограммному анализу, обыкновенному кригингу и технологической интерпретации результатов с использованием данных ситово-фракционного анализа (СФА).

Материал и методы исследования

Методический подход сформирован применительно к условиям пласта Н16 Северо-Западного участка Эльгинского месторождения. Пласт Н16 характеризуется сложным строением, значительной мощностью и наличием внутрипластовых породных прослоев. Для целей моделирования качества выделяется целевой геолого-технологический объект – 3-я минерализованная пачка. Такое выделение обусловлено ее повышенной зольностью, изменчивой мощностью, наличием породных прослоев и производственной значимостью при прогнозе качества добываемой угольной массы.

Исходная база методики включает структурные колонки скважин, координатную базу, таблицу интервалов по пачкам, результаты определения зольности и материалы ситово-фракционного анализа. Структурные колонки используются для выделения кровли и почвы пласта, разбиения разреза на пачки и фиксации внутрипластовых породных прослоев. Координатная база обеспечивает возможность построения вариограмм и карт качества. Таблица интервалов по пачкам необходима для исключения смешения разных геолого-технологических объектов в одной расчетной выборке. Материалы СФА используются как технологическое дополнение к пространственной модели, поскольку они позволяют интерпретировать природу повышенной зольности, долю тяжелых фракций и различия обогатимости.

Ключевым этапом подготовки данных является проверка сопоставимости одноименных пачек между скважинами. Если по отдельной скважине 3-я пачка не выделяется или принадлежность интервала к целевому объекту не подтверждена, то такая скважина не включается в расчетную выборку по A_d100%. Это правило предотвращает формирование неоднородной базы, в которой вариограмма отражала бы не природную пространственную изменчивость качества, а ошибки стратиграфической корреляции. Контроль исходных данных также включает проверку кровли и почвы интервала, мощности угольной части, мощности породных прослоев, арифметической согласованности мощности с учетом засорения и корректности координатной привязки.

Расчетным показателем качества принят A_d100% – зольность целевой пачки с учетом полного попадания внутрипластовых породных прослоев в добываемую массу. Такой показатель соответствует условиям валовой или частично селективной выемки и позволяет привести скважины к единой производственно значимой основе.

В общем виде расчет выполняется по средневзвешенной схеме

$$Ad_{100} = \frac{Ad_{\text{чуп}} m_{\text{чуп}} + \sum_{j=1}^{p} Ad_{\text{пр},j} m_{\text{пр},j}}{m_{\text{чуп}} + \sum_{j=1}^{p} m_{\text{пр},j}} \quad (1)$$

где $Ad_{\text{чуп}}$ – зольность чистой угольной части пачки, %; $m_{\text{чуп}}$ – мощность чистой угольной части пачки, м; $Ad_{\text{пр}, j}$ – зольность j-го породного прослоя, %; $m_{\text{пр}, j}$ – мощность j-го породного прослоя, м.

Если зольность отдельного прослоя не определена лабораторно, расчет должен выполняться по единому принятому правилу базы данных, одинаковому для всех скважин.

Статистический блок методики включает расчет числа наблюдений, минимального и максимального значений, среднего арифметического, медианы, дисперсии, стандартного отклонения и коэффициента вариации $A_d100\%$. Эти характеристики позволяют оценить общий уровень неоднородности и выявить резко отличающиеся значения. Такие значения не исключаются автоматически, а проверяются по исходным интервалам, мощности породных прослоев и принадлежности скважины к 3-й минерализованной пачке. Если значение подтверждается исходной геологической информацией, оно сохраняется как проявление природной или технологически значимой изменчивости качества.

Пространственная изменчивость $A_d100\%$ оценивается с помощью экспериментальной и нормированной вариограммы. Экспериментальная вариограмма показывает, как средняя величина различий между значениями показателя изменяется при увеличении расстояния между скважинами.

Нормированная вариограмма позволяет сопоставлять значения с уровнем дисперсии и интерпретировать расстояние, на котором пространственная связь существенно ослабляется:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [A(x_i) - A(x_i + h)]^2, \qquad (2)$$

где γ(h) – значение вариограммы на расстоянии *h*; *N(h)* – число пар наблюдений в данном лаге; $A(x_i)$ и $A(x_i + h)$ – значения показателя A_d100 % в точках, удаленных друг от друга на расстояние *h*.

Для задач опережающего опробования основное значение имеет не только форма вариограммы, но и число пар наблюдений по лагам, устойчивость первых лагов и расстояние практического приближения к порогу. Если вариограмма уже на первом лаге близка к уровню дисперсии, это указывает на малый масштаб пространственной связанности и необходимость плотного контроля качества.

На следующем этапе выполняется подбор теоретической модели вариограммы. В качестве сопоставляемых моделей могут использоваться сферическая, экспоненциальная, гауссова и линейная модели. Выбор модели должен определяться не только минимальной ошибкой аппроксимации, но и устойчивостью кригинговой поверхности, отсутствием резких артефактов, интерпретируемостью порога и практического радиуса, а также соответствием модели геологическому представлению о характере изменчивости целевой пачки.

Обыкновенный кригинг используется для перехода от точечных значений $A_d100\%$ к прогнозной поверхности качества. Его преимуществом является учет вариограммной модели и возможность получения не только карты изолиний, но и карты дисперсии кригинга. Последняя характеризует расчетную неопределенность прогноза и в большей степени зависит от конфигурации сети наблюдений и удаленности расчетного узла от скважин. Поэтому карта дисперсии используется как инструмент выделения зон недостаточной обеспеченности данными, а не как самостоятельное доказательство геологической неоднородности.

Данные ситово-фракционного анализа включаются в методику как технологический источник интерпретации. СФА раскрывает распределение угольной массы по классам крупности и плотностным фракциям, показывает долю тяжелого высокозольного материала и позволяет оценить, связана ли повышенная зольность с породными прослоями, тяжелыми фракциями или тонкодисперсной минерализацией угольного вещества [20–22]. Результаты СФА не всегда имеют точную координатную привязку, поэтому они не используются как самостоятельная основа для вариограммного анализа и кригинга.

Исходные данные и их роль в методике приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Исходные данные и их роль в методике / Source data and their role in the methodology

Группа данных	Содержание	Методическая роль
Структурные колонки	Кровля, почва, угольные пачки, породные прослои	Выделение целевой 3-й минерализованной пачки
Координаты скважин	*X, Y,* разведочные линии, положение точек наблюдений	Построение вариограмм и карт качества
Интервалы по пачкам	Разбиение H16 на 1, 2, 3-ю и 4-ю пачки	Проверка сопоставимости и формирование выборки
Зольность и мощность	*Ad* угольной части, мощность угля и прослоев	Расчет Ad100%
СФА	Классы крупности, плотностные фракции, зольность фракций	Технологическая интерпретация повышенной зольности

Результаты

Предлагаемый методический подход представляет собой последовательность операций, связывающих подготовку геологической базы, расчет показателя качества, геостатистическое моделирование и производственную оценку достаточности сети опережающего опробования. Логика подхода заключается в том, что параметры сети не назначаются только по типовой производственной схеме, а проверяются по масштабу пространственной изменчивости $A_d100\%$ целевой пачки.

Первый результат методики состоит в формировании целевой расчетной выборки. В нее включаются только те скважины, в которых 3-я минерализованная пачка уверенно выделена и сопоставима с одноименным интервалом в соседних скважинах. Для каждой точки фиксируются координаты *X, Y,* глубины кровли и почвы пачки, мощность чистой угольной части, суммарная мощность породных прослоев, зольность угольной части, принятая или определенная зольность прослоев и расчетное значение $A_d100\%$. Такой состав данных обеспечивает воспроизводимость последующих статистических и геостатистических операций.

Второй результат состоит в переходе от описания средней зольности пласта к показателю, непосредственно связанному с производственной задачей. Среднепластовая зольность может сглаживать вклад высокозольной пачки за счет более низкозольных интервалов. В отличие от нее показатель $A_d100\%$ характеризует качество целевого интервала с учетом внутрипластового засорения. Поэтому он более пригоден для обоснования плотности опережающего опробования в условиях, когда именно минерализованная пачка формирует риск ухудшения качества.

Третий результат связан с вариограммным анализом. Экспериментальная вариограмма A_d100% позволяет определить, сохраняется ли пространственная связанность качества между соседними скважинами и на каком расстоянии различия между значениями становятся близкими к общей дисперсии показателя. При слабой вариограммной структуре и быстром приближении к порогу уже на малых лагах сеть опережающего опробования должна рассматриваться как инструмент локального контроля, а не как формальное повторение разведочной сети.

Четвертый результат формируется при построении кригинговой поверхности и карты дисперсии. Карта изолиний A_d100% показывает вероятное положение зон повышенной и пониженной зольности в пределах целевой пачки. Карта дисперсии кригинга показывает участки, где прогноз менее обеспечен исходными данными. Совместный анализ этих карт позволяет разделить зоны повышенной зольности и зоны повышенной неопределенности. Это важно, поскольку решение о сгущении сети может быть вызвано как фактическим риском качества, так и недостаточной плотностью исходных наблюдений.

Методическая последовательность определения параметров сети опережающего опробования приведена на рисунке 1.

Пятый результат состоит в сопоставлении полученной пространственной модели с производственными вариантами сети. Для условий опережающего опробования могут использоваться сети 14 × 14 и 20 × 20 м. Их достаточность должна оцениваться по нескольким критериям: геологической сопоставимости целевой пачки, статистической изменчивости A_d100%, форме вариограммы, числу пар по лагам, устойчивости кригинговой поверхности, распределению дисперсии кригинга и технологической интерпретации СФА. Если при шаге 20 × 20 м сохраняется высокий риск пропуска локальных зон повышенной зольности или значительные зоны неопределенности, методика предусматривает переход к более плотной сети или локальное сгущение в пределах зон риска. Если пространственная структура и дисперсия прогноза допускают менее плотный контроль, шаг 20 × 20 м может рассматриваться как достаточный для соответствующего участка.

Критерии оценки достаточности сети опережающего опробования представлены в таблице 2.

Важным элементом подхода является разделение геологического, статистического, геостатистического и технологического критериев. Геологический критерий отвечает за корректность выделения пачки и исключение смешения неоднородных интервалов. Статистический критерий оценивает общий диапазон изменчивости и относительный разброс A_d100%. Вариографический критерий характеризует масштаб пространственной связанности качества. Кригинговый критерий показывает устойчивость прогнозной поверхности и зоны повышенной дисперсии. Технологический критерий на основе СФА подтверждает или уточняет природу повышенной зольности, выявленной по координатно привязанным данным.

Критерии оценки достаточности сети опережающего опробования показаны на рисунке 2.

Таблица 2 / Table 2

Критерии оценки достаточности сети опережающего опробования / Criteria for assessing the sufficiency of the advance sampling grid

Критерий	Показатель оценки	Интерпретация
Геологический	Сопоставимость пачки, мощность, наличие прослоев	Определяет корректность выделения целевого объекта
Статистический	Диапазон Ad100%, коэффициент вариации, число точек	Характеризует общую неоднородность качества
Вариографический	Форма γ(h), число пар, практический радиус	Показывает масштаб пространственной связанности
Кригинговый	Изолинии Ad100%, дисперсия кригинга	Выделяет зоны повышенной зольности и неопределенности
Технологический	СФА, доля тяжелых фракций, обогатимость	Уточняет причины повышенной зольности



Рис. 2. **Критерии оценки достаточности сети опережающего опробования / *Fig. 2.* Criteria for assessing the sufficiency of the advance sampling grid**

На выборке из 115 скважин 3-й минерализованной пачки показатель A_d100% изменяется от 23,0 до 60,2 %. Среднее значение составляет 35,0 %, медиана – 34,9 %, стандартное отклонение – 6,10 %, коэффициент вариации – 17,46 %. Умеренный коэффициент вариации указывает на заметную, но не экстремальную неоднородность качества, при этом локальные отклонения оказываются существенными для практики оперативного контроля. Поэтому для дальнейшего обоснования параметров сети необходимо перейти от общей ста-



Рис. 1. **Методическая последовательность определения параметров сети опережающего опробования / *Fig. 1.* Methodological sequence for determining advance sampling grid parameters**

тистической оценки к анализу пространственной структуры показателя.

Статистические характеристики A_d100% 3-й минерализованной пачки пласта H16 приведены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Статистические характеристики A_d100% 3-й минерализованной пачки пласта H16 / Statistical characteristics of A_d100% for the 3rd mineralized pack of seam H16

n, шт.	Минимум, %	Максимум, %	Среднее, %	Медиана, %	σ, %	*V*, %
115	23,0	60,2	35,0	34,9	6,10	17,46

Экспериментальная нормированная вариограмма A_d100% построена по пяти лагам. На первом лаге при среднем расстоянии между парами 279,8 м значение γ(h) составляет 1,02 и практически достигает уровня порога. На последующих лагах γ(h) изменяется от 0,76 до 1,22, оставаясь вблизи *sill*. Такая конфигурация указывает на слабую и нестабильную пространственную связанность показателя: различия между близкими скважинами велики уже на малых расстояниях, а радиус практической корреляции невелик. Сопоставление теоретических моделей показало, что сферическая, гауссова и экспоненциальная аппроксимации дают близкие ошибки, тогда как линейная модель заметно уступает им (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

Сопоставление моделей вариограммы для A_d100 % / Comparison of variogram models for A_d100 %

Модель	RMSE	MAE	*Sill*, норм.	Параметр диапазона / *slope*
Сферическая	0,15843	0,13519	0,997	162,2 м
Гауссова	0,15843	0,13519	0,997	108,9 м
Экспоненциальная	0,15844	0,13526	0,997	108,9 м
Линейная	0,41133	0,30140	-	0,000685

Для картографического представления в статье принята экспоненциальная модель как наиболее устойчивая при построении поверхности кригинга (рис. 3).

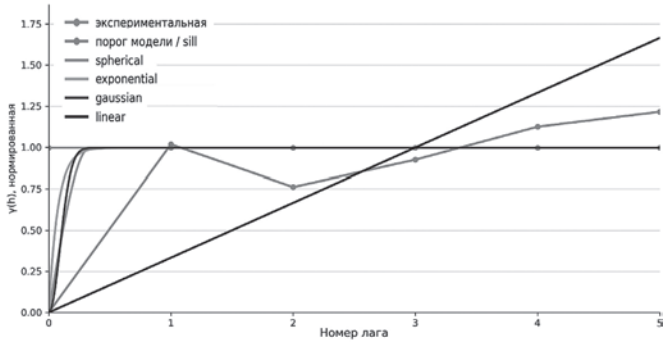


Рис. 3. **Экспериментальная нормированная вариограмма A_d100% 3-й минерализованной пачки пласта H16 и сопоставление теоретических моделей / *Fig. 3.* Experimental normalized variogram of A_d100% for the 3rd mineralized pack of seam H16 and comparison of theoretical models**

Карта изолиний A_d100%, построенная методом *ordinary kriging* по экспоненциальной модели, показывает, что большая часть исследуемой площади характеризуется фоновыми значениями порядка 33–39 %. На этом фоне выделяются локальные зоны повышенной зольности, приуроченные к отдельным скважинам и их ближайшему окружению, а также участки относительного понижения A_d100%. Таким образом, пространственная картина качества оказывается мозаичной, без крупных устойчивых областей одинаковой зольности. Для практики опережающего опробования это означает, что решение о параметрах сети должно учитывать не только средний интервал между скважинами, но и возможность пропуска локальных высокозольных аномалий.

Карта изолиний A_d100% 3-й минерализованной пачки пласта H16, построенная методом *ordinary kriging* (экспоненциальная модель) приведена на рисунке 4.

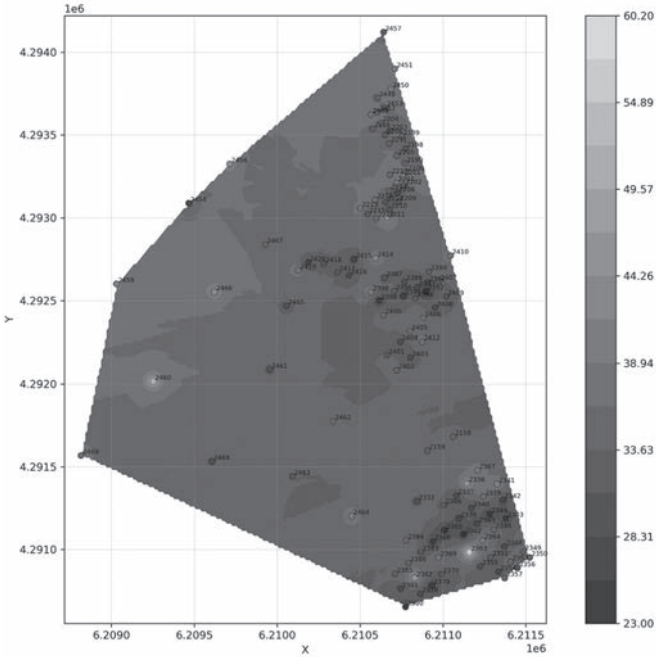


Рис. 4. **Карта изолиний A_d100% 3-й минерализованной пачки пласта H16, построенная методом ordinary kriging (экспоненциальная модель) / *Fig. 4.* A_d100% contour map for the 3rd mineralized pack of seam H16 obtained by ordinary kriging (exponential model)**

Карта дисперсии *ordinary kriging* (рис. 5) дополняет интерпретацию качества оценкой надежности пространственного прогноза. По экспоненциальной модели нормированная дисперсия изменяется от 0,07 до 1,06 при среднем значении 1,00. Минимальные значения приурочены к сгущениям сети скважин, тогда как максимальные – к межскважинным пространствам и периферийным частям области интерполяции. Следовательно, карта дисперсии в первую очередь отражает плотность и конфигурацию сети, а не только природную изменчивость зольности. Именно это делает ее удобным инструментом для оценки достаточности рабочих сетей 14 × 14 и 20 × 20 м и для выделения участков, где требуется локальное сгущение опережающего опробования.

Практическое применение подхода заключается в разделении участков на зоны базового контроля, зоны уплотненного контроля и зоны локального сгущения. Ограничением исследования является то, что часть технологических данных СФА не имеет плановой координатной привязки; поэ-

тому они используются для интерпретации обогатимости и природы повышенной зольности, но не как самостоятельные точки кригинга.

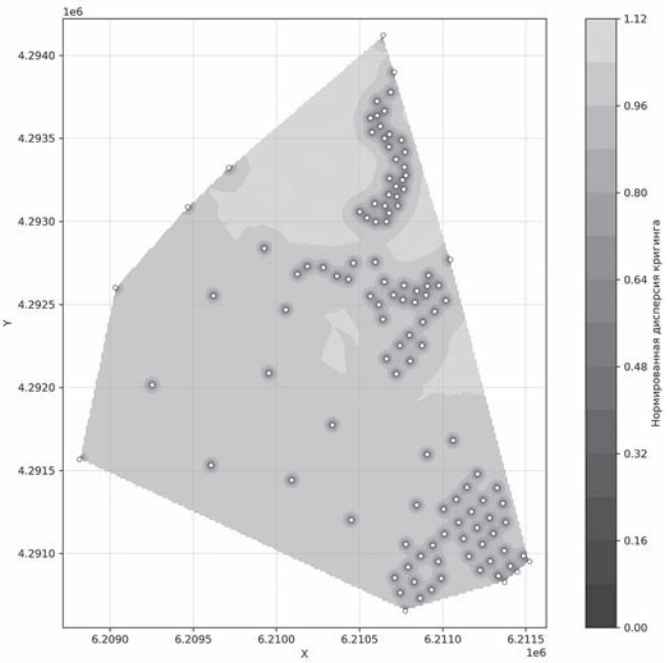


Рис. 5. **Карта дисперсии ordinary kriging для 3-й минерализованной пачки пласта Н16 (экспоненциальная модель) /**
Fig. 5. **Kriging variance map for the 3rd mineralized pack of seam H16 (ordinary kriging, exponential model)**

Полученные результаты показывают, что для сложноструктурного пласта параметры сети опережающего опробования должны определяться с учетом целевого интервала, а не только по среднепластовым значениям качества. Для 3-й минерализованной пачки Н16 сочетание повышенной расчетной зольности, слабой вариограммной структуры и неравномерной обеспеченности данными указывает на необходимость дифференцированного подхода к выбору шага сети.

Заключение

На основании изложенных в статье материалов можно сформулировать следующие выводы:

1. Разработан методический подход к определению параметров сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта на основе моделирования качественных показателей. Его основное отличие состоит в том, что параметры сети определяются не по пласту в целом, а по целевому геолого-технологическому объекту – 3-й минерализованной пачке.

2. В качестве основного расчетного показателя предложено использовать A_d100%, характеризующий зольность целевой пачки при полном учете внутрипластовых породных прослоев. Этот показатель обеспечивает сопоставимость скважин и позволяет связать геологическое строение пачки с производственной задачей прогноза качества перед выемкой.

3. Обоснована последовательность операций, включающая выделение целевой пачки, контроль исходных данных, расчет A_d100%, статистический анализ, построение экспериментальной и нормированной вариограммы, выбор теоретической модели, обыкновенный кригинг, анализ дисперсии кригинга и сопоставление результатов с производственными сетями опережающего опробования.

4. Показано, что данные СФА целесообразно использовать как технологический источник интерпретации, а не как самостоятельную координатную базу для кригинга. Они позволяют уточнить природу повышенной зольности, оценить вклад тяжелых фракций и подтвердить необходимость пачечного подхода к контролю качества.

5. Методика может применяться для оценки достаточности рабочих сетей 14 × 14 и 20 × 20 м и для выделения участков, где требуется локальное сгущение опережающего опробования. Дальнейшее развитие подхода связано с накоплением данных оперативного опробования, уточнением параметров вариограммной модели и сопоставлением расчетных зон качества с фактическими результатами добычи и обогащения.

6. Апробация подхода на пласте Н16 показала, что расчетная выборка из 115 скважин характеризуется изменением A_d100% от 23,0 до 60,2 % при среднем значении 35,0 %. Экспериментальная вариограмма уже на первом лаге практически достигает порога и далее колеблется около *sill*, что указывает на слабую и нестабильную пространственную корреляцию. Карта *ordinary kriging* позволяет выделить локальные зоны повышенной зольности, а карта дисперсии – участки недостаточной обеспеченности наблюдениями. Это подтверждает целесообразность применения предложенного подхода для обоснования рабочих сетей 14 × 14 и 20 × 20 м и их локального уточнения в пределах неоднородных зон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кузнецов П.Ю., Гриб Н.Н., Качаев А.В. Анализ репрезентативности данных о качестве угля для создания базы данных по результатам детальной геологической разведки. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016; 6-5 (48): 137-140. https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.081.
   Kuznetsov P.Yu., Grib N.N., Kachaev A.V. Analysis of representativeness of coal quality data for creation of a database based on detailed geological exploration. *International Research Journal.* 2016; 6-5 (48): 137-140. (In Russ.). https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.081.
2. Батугин С.А., Гаврилов В.Л., Хоютанов Е.А. Оценка влияния тонких породных прослоев на зольность угля Эльгинского месторождения. *Науковедение*. 2015; 7 (4). https://doi.org/10.15862/136TVN415.
   Batugin S.A., Gavrilov V.L., Khoyutanov E.A. Assessment of the influence of thin rock partings on ash content of coal at the Elga deposit. *Naukovedenie.* 2015; 7 (4). (In Russ.). https://doi.org/10.15862/136TVN415.
3. Хоютанов Е.А., Гаврилов В.Л. Метод оценки природной и технологической составляющих зольности добываемого угля. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018; 5: 88-100. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180509.
   Khoyutanov E.A., Gavrilov V.L. Method for estimating natural and technological components of ash content in mined coal. *Journal of Mining Science.* 2018; 5: 88-100. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180509.
4. Хоютанов Е.А., Гаврилов В.Л. Управление качеством добываемого угля при разработке сложноструктурных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019; 3: 62-71. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190308.

Khoyutanov E.A., Gavrilov V.L. Quality control of mined coal in development of complex-structured deposits. *Journal of Mining Science.* 2019; 3: 62-71. (In Russ.). https://doi.org/10.15372/FTPRPI20190308.
5. Kuznetsov P.Yu., Grib N.N., Zhelyabina A.G. Exploration Testing Network Optimization at the Operational Stage of Coal Mining. *IOP Conference. Series*: *Earth and Environmental Science*. 2019; 272: 022034. https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022034.
6. Fisonga M., Wang F., Mutambo V. The estimation of sampling density in improving geostatistical prediction for geotechnical characterization. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2021; 15 (6): 724-731. https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1526484.
7. Hernandez Guerra H., Alberdi E., Goti A. Influence of the sampling density in the coestimation error of a regionalized locally stationary variable. *Minerals*. 2020; 10 (2): 90. https://doi.org/10.3390/min10020090.
8. Amri N.A., Wulandari S., Cahyadi T.A., et al. Distance of Drill-Hole Determination based on Global Estimation Variance of Coal Resources Classification. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2023; 33 (1): 267-274. https://doi.org/10.37934/araset.33.1.267274.
9. Purba M.J., Wicaksono E. Optimization of Information Point Distances in the Estimation and Classification of Coal Resources Using Geostatistical Methods Compared to SNI 5015:2019 for Moderate Geological Conditions. *Mining Technology Journal*. 2023; 1 (1). https://doi.org/10.31315/mtj.v1i1.6826.
10. Ertunç G., Tercan A.E., Hindistan M.A, et al. Geostatistical estimation of coal quality variables by using covariance matching constrained kriging. *International Journal of Coal Geology*. 2013; 112: 14-25. https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.11.014.
11. Pardo-Igúzquiza E., Dowd P.A., Baltuille J.M., et al. Geostatistical modelling of a coal seam for resource risk assessment. *International Journal of Coal Geology*. 2013; 112: 134-140. https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.11.004.
12. Jeuken R., Xu C., Dowd P. Improving Coal Quality Estimations with Geostatistics *and Geophysical Logs Natural Resources Research*. 2020; 29 (4): 2529-2546. https://doi.org/10.1007/s11053-019-09609-y.
13. Sideri D., Roumpos C., Pavloudakis F., et al. Multivariate Geostatistical Modeling of Lower Calorific Value in Multi-Seam Coal Deposits. *Applied Sciences*. 2020; 10 (18): 6208. https://doi.org/10.3390/app10186208.
14. Gül Y., Küçükkarasu O. Resource estimation for Alpagut-Dodurga coal field and determination of spatial distribution of coal quality parameters. *Turkish Journal of Earth Sciences*. 2020; 29 (3): 521-537. https://doi.org/10.3906/yer-1910-17.
15. Faidatulaila R., Marwanza I., Purwiyono T. T. Variography analysis on the assessment of coal deposit quality using the ordinary kriging method. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2598: 060002. https://doi.org/10.1063/5.0126896.
16. Копытов А.И., Рогова Т.Б., Шаклеин С.В. Оценка ожидаемых погрешностей геометризации угольных месторождений на стадиях разведки и эксплуатации. *Горный журнал*. 2020; 4: 12-16. https://doi.org/10.17580/gzh.2020.04.01.
Kopytov A.I., Rogova T.B., Shaklein S.V. Estimation of expected errors in geometrization of coal deposits at the stages of exploration and mining. *Mining Journal.* 2020; 4: 12-16. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2020.04.01.
17. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Оценка качественных показателей минерального сырья с использованием геоинформационных технологий блочного моделирования. *Геоинформатика*. 2020; 3: 29-37. https://doi.org/10.47148/1609-364X-2020-3-29-37.
Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Assessment of quality indicators of mineral resources using geoinformation technologies of block modeling. *Geoinformatika.* 2020; 3: 29-37. (In Russ.). https://doi.org/10.47148/1609-364X-2020-3-29-37.
18. Сидорова Г.П., Маниковский П.М. Прогнозирование качества угля с использованием блочной модели пласта на примере Кутинского буроугольного месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022; 12: 55-66. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_12_0_55.
Sidorova G.P., Manikovskii P.M. Forecasting coal quality using a seam block model: a case study of the Kutinsky brown coal deposit. *Mining information and analytical bulletin.* 2022; 12: 55-66. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_12_0_55.
19. Noble A., Luttrell G.H. A review of state-of-the-art processing operations in coal preparation. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015; 25 (4): 511-521. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.05.001.
20. Stone D., Campbell Q.P., le Roux M., et al. Assessment of coal washability data obtained via the RhoVol analyser. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.* 2023; 123 (10): 509-512. https://doi.org/10.17159/2411-9717/1047/2023.
21. Sriramoju S.K., Singh R., Sengupta M., et al. Selective screening of coal to improve the washability characteristics at different levels of size reduction. *International Journal of Coal Preparation and Utilization.* 2021. https://doi.org/10.1080/19392699.2021.1932845.
22. Maxwell K., Rajabi M., Esterle J., et al. Spatial modelling and classification of altered coal using random forest-based methods at Moatize Basin, Mozambique. *Journal of African Earth Sciences*. 2024; 105279. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105279.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Егор Андреевич Тагаев –
аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; https://orcid.org/0009-0009-0477-8841; e-mail: tagaev.egor@mail.ru

Вклад автора:
Постановка задачи исследования, написание текста статьи, обобщение изложенного материала, генерация идеи исследования.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 16.06.2026
Поступила после рецензирования: 29.08.2026
Принята к публикации: 09.09.2026

ABOUT THE AUTHORS

Egor A. Tagaev –
postgraduate student, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0009-0009-0477-8841; e-mail: tagaev.egor@mail.ru

Author's contribution:
Formulation of the research problem, drafting the article, synthesizing the material, and generating the research idea.

Article info
Received: 16.06.2026
Revised: 29.08.2026
Accepted: 09.09.2026