

# Isoliner - грид и изолинии

## Содержание

<b>Введение</b>	<b>2</b>
Установка и расположение . . . . .	2
Обновление . . . . .	3
Вызов справки . . . . .	3
<b>Общая логика работы</b>	<b>3</b>
<b>Инструмент «2D Kriging (точки → растр)»</b>	<b>4</b>
Автоматические значения . . . . .	5
Обрезка по контуру скважин . . . . .	5
<b>Вариограмма и наггет</b>	<b>5</b>
Наггет C0 . . . . .	5
Структуры, радиус и анизотропия . . . . .	9
<b>Отсев ураганных проб</b>	<b>11</b>
<b>Стандартная ошибка кригинга</b>	<b>13</b>
<b>Инструмент «Изолинии из растра»</b>	<b>14</b>
<b>Сглаживание изолиний</b>	<b>15</b>
<b>Контурные полигоны (пояса)</b>	<b>16</b>
<b>Оформление слоёв</b>	<b>16</b>
<b>Инструмент «Вариограмма (экспериментальная)»</b>	<b>16</b>
Зачем нужен предпросмотр . . . . .	16
Краткая теория . . . . .	16
Параметры . . . . .	17
Поле группировки и разноплотностная разведка . . . . .	17
Три типичные геологические ситуации . . . . .	17
Максимальное расстояние и выход на плато . . . . .	20
Рабочий цикл с кросс-валидацией . . . . .	20
<b>Инструмент «Кросс-валидация вариограммы»</b>	<b>21</b>
<b>Инструмент «Создать пример скважин (демо)»</b>	<b>26</b>
<b>Типичные ситуации и решения</b>	<b>27</b>
<b>Лицензия и поддержка</b>	<b>27</b>

## Введение

Isoliner - провайдер инструментов Processing для интерполяции точечных данных и построения изолиний. Это порт инструмента Isoliner (ArcGIS) в QGIS. Ядро кригинга - алгоритм KB2D из GSLIB. Группа «Грид и изолинии» содержит четыре инструмента.

«2D Kriging (точки → растр)» - ординарный или простой кригинг по точечному слою.

«Изолинии из растра» - изолинии (линии) и контурные полигоны (пояса между изолиниями), границы которых совпадают с линиями.

«Кросс-валидация вариограммы» - скользящий контроль (leave-one-out) для проверки и подбора параметров кригинга по ошибке, а не визуально.

«Создать пример скважин (демо)» - генерация учебного точечного слоя с пространственной структурой (кровля, мощность, содержание компонента) для обучения и проверки без реальных данных.

Подходит для отметок пласта, мощностей, ФМС, химии и любых числовых атрибутов скважин.

Несколько терминов, которые встречаются далее. Вариограмма описывает, насколько сильнее различаются значения с ростом расстояния между точками. Силл - уровень, на который она выходит (близок к дисперсии данных). Наггет (от англ. nugget, «эффект самородка») - скачок вариограммы у нуля, то есть разброс на сколь угодно малых расстояниях, вызванный измерительным шумом и микроизменчивостью. Далее по тексту - просто «наггет».

## Установка и расположение

Основной способ - из официального репозитория QGIS. Откройте Модули → Управление и установка модулей → вкладка «Все», в поиске наберите «Isoliner», выберите плагин и нажмите «Установить». При установке из репозитория QGIS сам сообщает о выходе новых версий и обновляет плагин по кнопке.

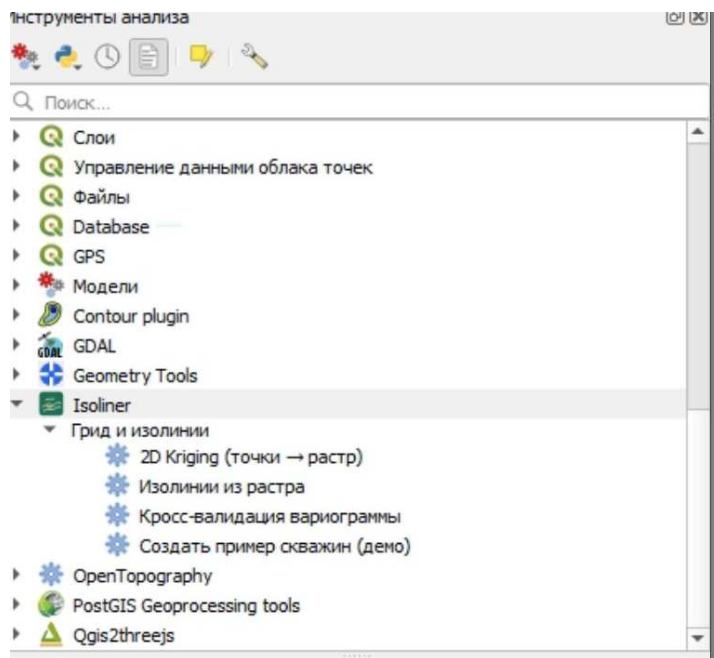


Рис. 1: Инструменты модуля в панели «Обработка»: группа Isoliner → «Грид и изолинии» с четырьмя инструментами.

Альтернативный способ - из ZIP-файла. Модули → Управление и установка модулей → Установить из ZIP. Это удобно для офлайн-установки и предрелизных сборок.

После установки инструменты появляются в панели «Обработка» (Processing), провайдер «Isoliner», группа «Грид и изолинии». Требования: QGIS 3.16+. Внешних зависимостей нет - используются NumPy, GDAL и штатные алгоритмы Processing из состава QGIS.

## Обновление

При установке из репозитория QGIS показывает уведомление о доступной новой версии - значок в строке состояния и список во вкладке «Обновляемые» менеджера модулей. Обновление выполняется одной кнопкой. При установке из ZIP новая версия ставится тем же путём, поверх старой.

Плагин корректно перезагружается «на лету», перезапуск QGIS не требуется. Для быстрой перезагрузки кода при разработке удобен модуль Plugin Reloader (кнопка «Reload a plugin...»). Выберите «Isoliner» - провайдер и все инструменты перерегистрируются сразу.

## Вызов справки

В диалоге каждого инструмента есть кнопка «Справка», открывающая это руководство (PDF в комплекте плагина). Правая панель диалога дополнительно показывает краткую подсказку по инструменту.

## Общая логика работы

Типовой сценарий состоит из двух шагов:

2D Kriging: по точечному слою и числовому полю Z строится растр (регулярная сетка значений).

Изолинии из растра: по полученному растру строятся изолинии и, при необходимости, залитые контурные полигоны.

Шаги независимы: «Изолинии из растра» работают с любым растром, не только с результатом кригинга.

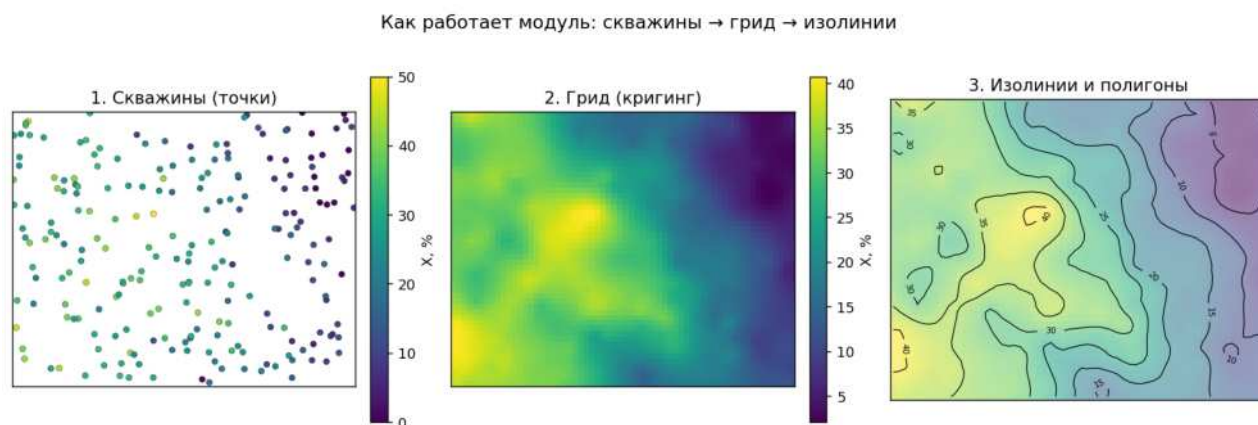


Рис. 2: Весь процесс на сгенерированном примере: скважины с измерениями (слева) превращаются в сплошной грид кригингом (в центре), по которому строятся изолинии и контурные полигоны (справа).

## Инструмент «2D Kriging (точки → растр)»

Ординарный (OK) или простой (SK) кригинг по точечному слою. Совпадающие точки (один и тот же XY) усредняются по Z. В узлах сетки значения исходных точек воспроизводятся точно (при нулевом наггете).



Рис. 3: Кригинг оценивает значение в узле как взвешенное среднее ближайших скважин: чем ближе скважина, тем больше её вес. Веса подбираются по вариограмме.

Основные параметры:

Параметр	Что задаёт	По умолчанию / совет
Точечный слой	Исходные точки (скважины) для интерполяции.	-
Только выделенные объекты	Считать лишь по выделенным точкам слоя.	выкл.
Поле значения (Z)	Числовой атрибут, который интерполируется: отметка пласта, мощность, ФМС, химия и т. п.	запоминается между запусками
Тип кригинга	Ординарный (OK) - локально оценивает среднее сам. Простой (SK) - использует заданное «Среднее».	OK
Радиус поиска	Радиус окна поиска соседних точек вокруг узла. 0 = вся выборка.	0 (вся выборка)
Мин. число точек	Если в окне меньше точек - узел остаётся пустым (nodata).	1

Параметр	Что задаёт	По умолчанию / совет
Макс. число точек	Сколько ближайших точек включается в систему кригинга.	24
Размер ячейки	Шаг грида. 0 = авто = $\min(\text{охват})/50$ .	мельче = плавнее, но дольше
Охват растра	Прямоугольник расчёта. По умолчанию - по слою.	по слою
Обрезать по контуру скважин	Растр обрезается выпуклой оболочкой всех точек - убирает экстраполяцию в пустых углах.	рекомендуется вкл.
Буфер оболочки	Расширить оболочку на N единиц карты наружу.	0
Маска обрезки	Свой полигон вместо оболочки (приоритетнее) - удобно для вогнутых участков.	-

## Автоматические значения

Размер ячейки =  $\min(\text{ширина, высота охвата}) / 50$ .

Радиус корреляции вариограммы =  $\max(\text{ширина, высота охвата}) / 3$ .

Радиус поиска (при 0) = диагональ охвата, то есть берётся вся выборка.

## Обрезка по контуру скважин

Кригинг считает весь прямоугольный охват, поэтому вне области данных значения являются экстраполяцией и дают артефакты (длинные «веерные» изолинии в пустых углах). Опция «Обрезать по контуру скважин» строит выпуклую оболочку всех точек (с необязательным буфером) и обрезает по ней растр. Экстраполяция исчезает. Если фактическая граница участка вогнутая, задайте свой полигон в «Маске обрезки» - он приоритетнее оболочки.

## Вариограмма и наггет

Кригинг опирается на модель вариограммы - она описывает, насколько сильно различаются значения Z в двух точках в зависимости от расстояния между ними. По этой модели каждой соседней скважине назначается вес. Модель задаётся в разделе «Дополнительные параметры».

Модель вариограммы: наггет C0, силл (C0 + C) и радиус корреляции a.

### Наггет C0

Наггет - это значение, к которому стремится кривая вариограммы при расстоянии, стремящемся к нулю. Теоретически, на нулевом расстоянии расхождение должно быть нулевым (точка сравнивается сама с собой), но на практике остаётся ступенька. Она отражает то, что данные на очень малых расстояниях всё равно не совпадают: погрешность измерения и оцифровки, микроизменчивость на масштабе меньше расстояния между скважинами, расхождение дублей в одной точке.

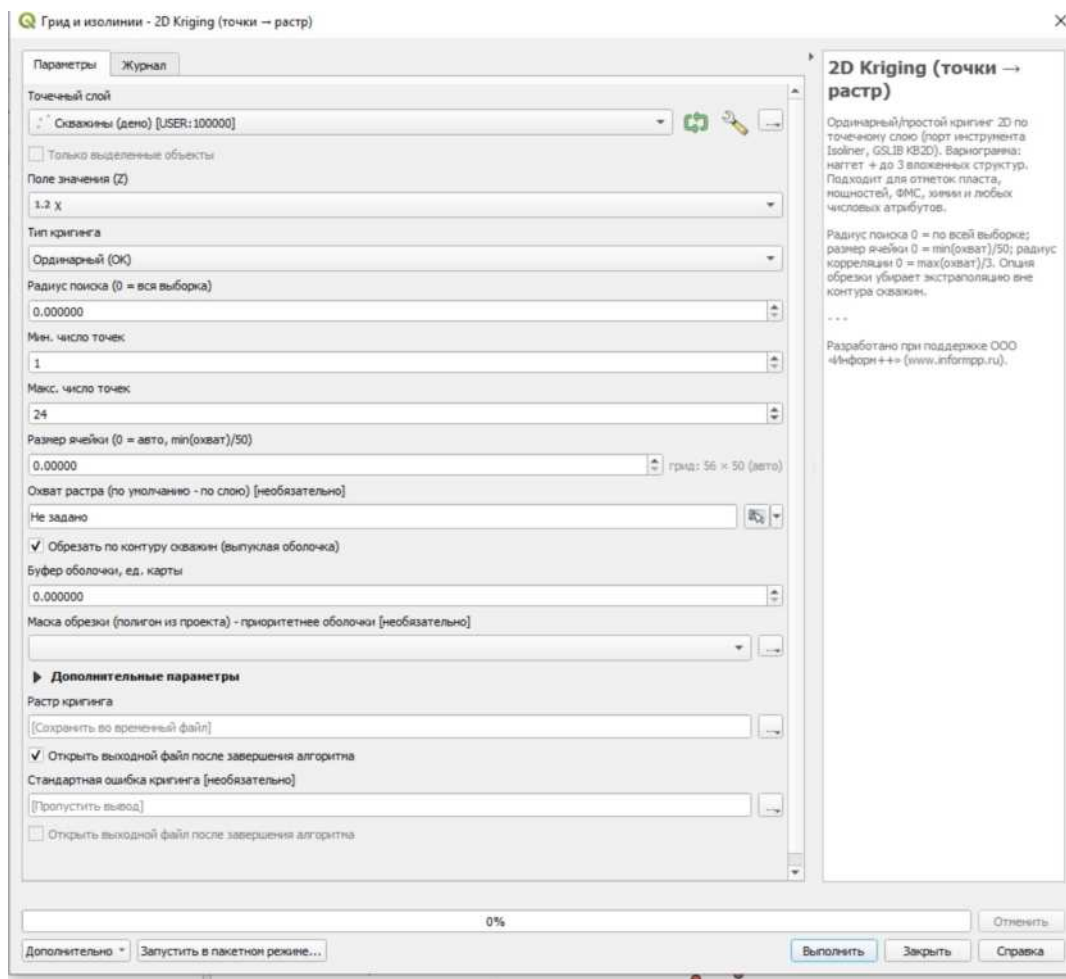


Рис. 4: Окно инструмента «2D Kriging»: основные параметры. Справа - краткая встроенная справка.

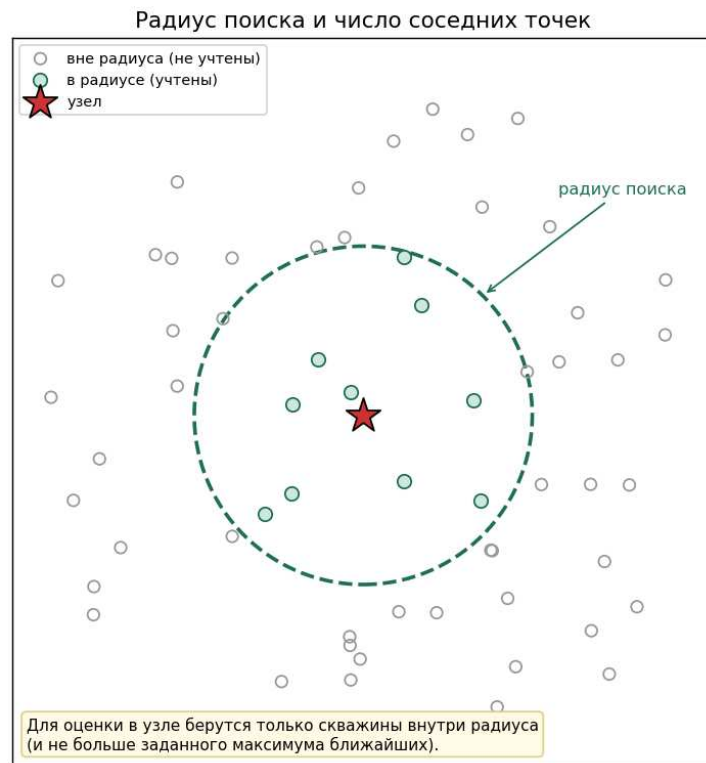


Рис. 5: Для каждого узла берутся только скважины внутри радиуса поиска и не более заданного числа ближайших. Точки за радиусом не участвуют.

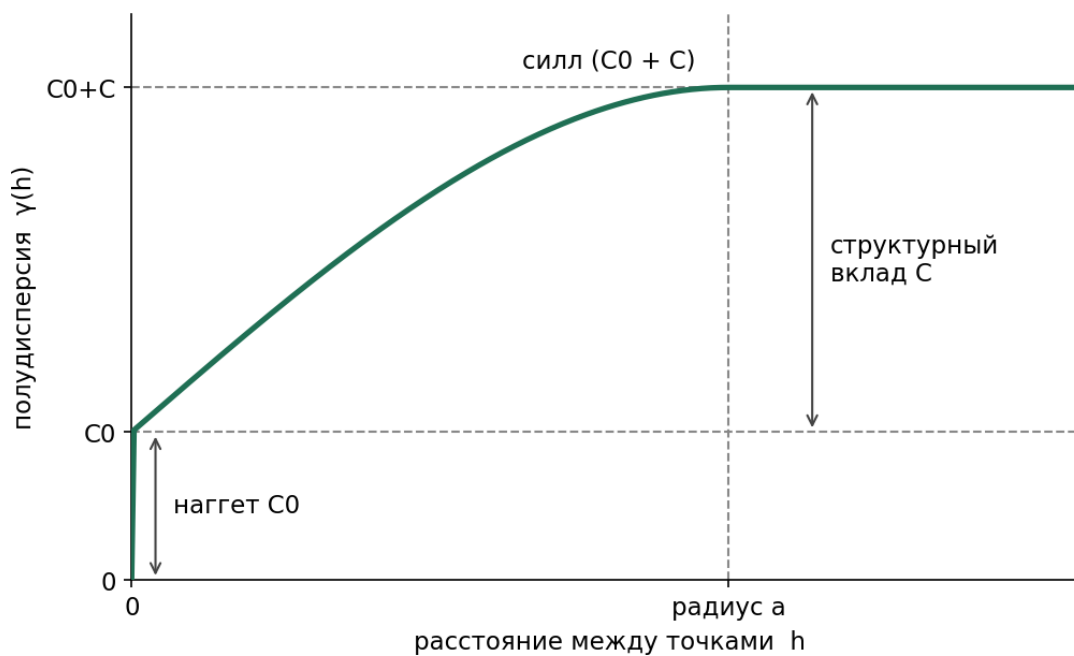


Рис. 6: Схема вариограммы: наггет  $C_0$ , структурный вклад  $C$ , силл ( $C_0 + C$ ) и радиус корреляции  $a$ .

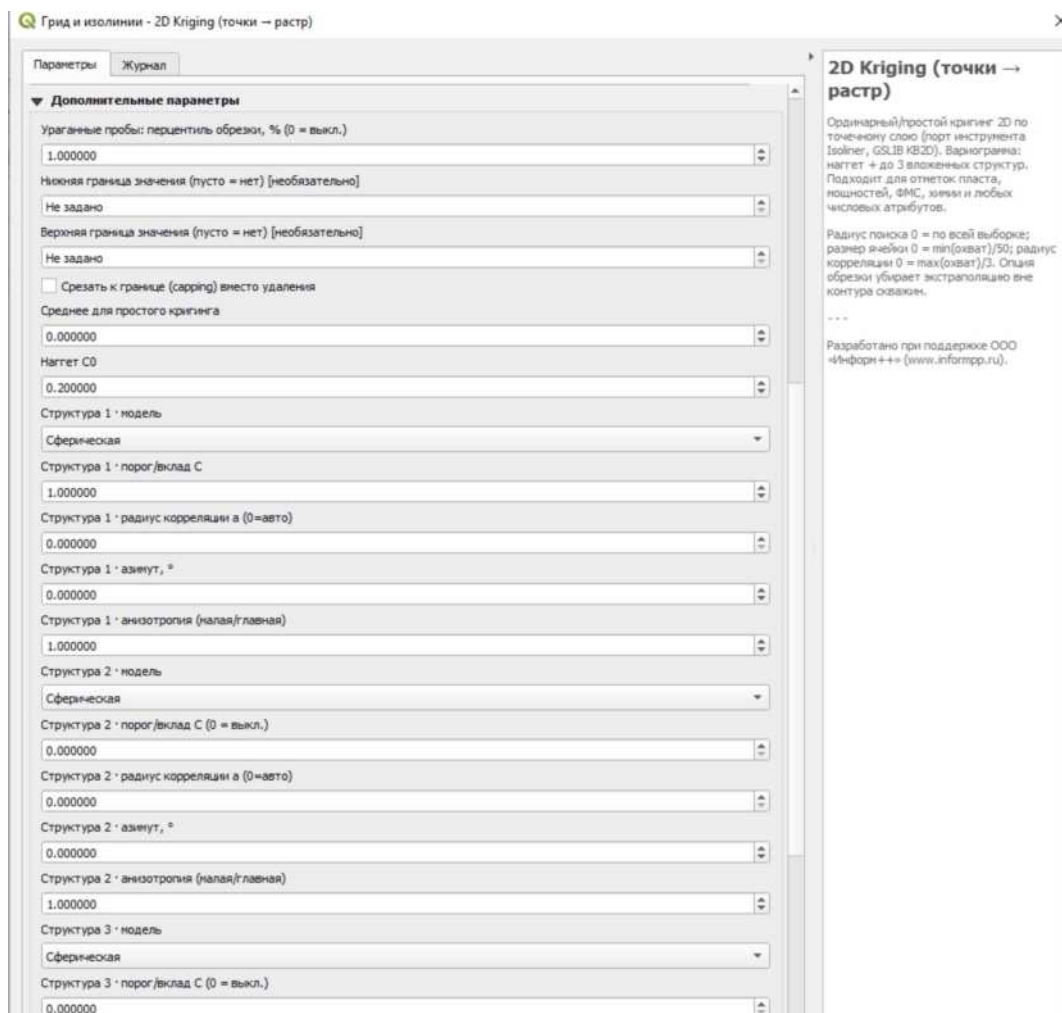


Рис. 7: Раздел «Дополнительные параметры» окна «2D Kriging»: отсев ураганных проб, наггет C0 и до трёх структур вариограммы.



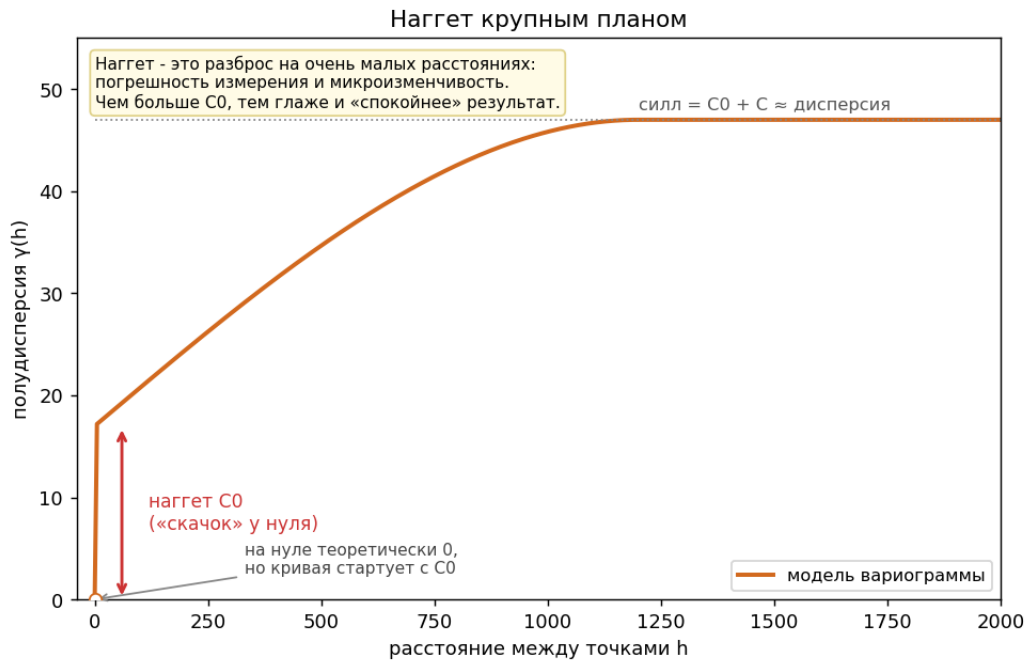


Рис. 8: Наггет крупным планом: модель стартует у нуля не с 0, а со «скачка»  $C_0$ . Это разброс на сверхмалых расстояниях (погрешность измерения, микроизменчивость). Полка  $C_0+C \approx$  дисперсии данных.

Как наггет влияет на результат:

$C_0 = 0$  (по умолчанию) - кригинг является точным интерполятором: поверхность обязана пройти ровно через каждую скважину. Изолированная скважина с выбросом по  $Z$  превращается в конус («бычий глаз»).

$C_0 > 0$  - кригинг перестаёт точно восстанавливать значение в точке измерений и становится сглаживателем: вблизи скважины оценка подтягивается к локальному среднему. Чем больше доля наггета  $C_0 / (C_0 + C)$ , тем сильнее сглаживание.

$C_0 =$  весь силл (чистый наггет) - пространственная связь теряется, поверхность вырождается в простое среднее. Это перебор.

**Важно - единицы.** Наггет  $C_0$  и силл задаются в **абсолютных единицах дисперсии данных** (квадрат единиц  $Z$ ), а не в долях 0-1. Значение «1» у силла по умолчанию - это условное значение, которое почти всегда нужно изменить: задайте суммарный силл ( $C_0 +$  вклады структур  $C$ ) **близким к дисперсии данных**. Уровень сглаживания определяет не абсолютная величина наггета, а его **доля в силле**  $C_0 / (C_0 + C)$ . Практический порядок: возьмите суммарный силл  $\approx$  дисперсии, затем наггет = 0.2-0.4 от него (то есть 0.2-0.4  $\times$  дисперсии - абсолютное число, а не 0.2-0.4 как таковое). Чем меньше наггет, тем больше деталей, но и больше локальных пиков. Чем больше, тем поверхность ровнее, но возможно сглаживание реальной структуры. Дисперсию данных инструмент печатает в Журнал при запуске - это и есть ваш ориентир для выбора силла.

## Структуры, радиус и анизотропия

Силл (полка) это уровень, на который выходит вариограмма. Он складывается из наггета  $C_0$  и вкладов структур  $C$ . Доступно до трёх вложенных структур (модели: сферическая, экспоненциальная, гауссова, степенная). Структуры 2 и 3 включаются ненулевым порогом  $C$ .

**Силл: смысл и порядок величины.** Силл - это верхний предел различий между точками: насколько в среднем отличаются далёкие друг от друга скважины. Он практически равен обычной дисперсии данных. Пример по KCl: среднее  $\approx 25\%$ , дисперсия  $\approx 47.6 (\%^2)$ , то есть  $\sigma \approx 6.9\%$ . Значит, суммарный силл задаём  $\approx 47.6$ . Если наггет  $C0 \approx 17$  (примерно 0.35 силла), то структурный вклад первой структуры  $C \approx 47.6 - 17 \approx 30$ . На сам грид абсолютный масштаб не влияет - для оценок важно только отношение  $C0 : C$ . Но он нужен, чтобы карта стандартной ошибки и MSDR в кросс-валидации были в реальном масштабе (суммарный силл  $\approx$  дисперсии  $\rightarrow$  MSDR  $\approx 1$ ). Поэтому: не оставляйте силл = 1 по умолчанию, поднимите его до дисперсии данных.

Радиус корреляции  $a$  - расстояние, на котором вариограмма выходит на полку. Дальше этого расстояния точки практически не влияют друг на друга. При 0 берётся автоматическое значение  $\max(\text{охват})/3$ .

Анизотропия задаётся азимутом главной оси и отношением радиусов (малая/главная). Значение 1 - изотропно (влияние одинаково во всех направлениях). Значение меньше 1 укорачивает корреляцию поперёк главной оси - полезно для вытянутых геологических структур.

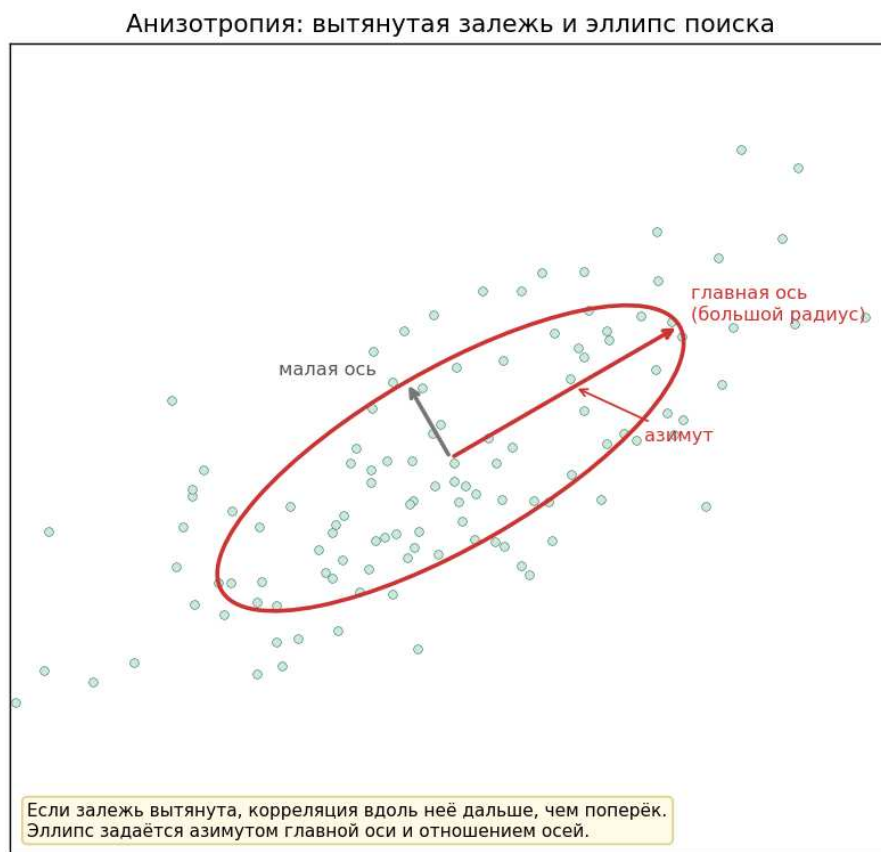


Рис. 9: Анизотропия: если залежь вытянута, корреляция вдоль неё дальше, чем поперёк. Эллипс поиска задаётся азимутом главной оси и отношением осей (малая/главная).

Параметр	Что задаёт	По умолчанию / совет
Среднее для простого кригинга	Используется только при типе SK.	0

Параметр	Что задаёт	По умолчанию / совет
Наггет C0	«Шум»/скачок вариограммы у нуля. Подавляет локальные пики. В абсолютных единицах дисперсии.	0. Для сглаживания 0.2-0.4 от силла
Структура i · модель	Форма вариограммы: сферическая, экспоненциальная, гауссова, степенная.	сферическая
Структура i · порог/вклад C	Вклад структуры в силл (абс. единицы дисперсии). Сумма C0+C ≈ дисперсии данных. Для структур 2 и 3: 0 = выкл.	стр. 1 = 1 (замените на ≈ дисперсию)
Структура i · радиус корреляции a	Дистанция выхода на полку. 0 = авто = max(охват)/3.	0 (авто)
Структура i · азимут, °	Направление главной оси анизотропии.	0
Структура i · анизотропия (малая/главная)	Отношение радиусов поперёк/вдоль оси. 1 = изотропно.	1

Так схема выглядит на реальных данных. Вариограмму строят по скважинам: для пар точек считают полудисперсию и усредняют по расстояниям - получается облако (зелёные точки), под которое подбирают модель (кривая). По нему и задают параметры кригинга: высота «скачка» у нуля - наггет C0, полка - силл (обычно близок к дисперсии данных), расстояние выхода на полку - радиус a. Если на больших расстояниях точки уходят выше силла, как здесь, - это региональный тренд (нестационарность). Его либо учитывают отдельно, либо ограничивают радиус поиска.

## Отсев ураганных проб

Ураганные пробы - аномально высокие (или ошибочные) значения, которые искажают оценку: несколько «бонанц» по содержанию могут перетянуть на себя всю карту грейда, а явные ошибки (например, отрицательная мощность) портят поверхность. Инструмент «2D Kriging» позволяет ограничить такие пробы прямо при расчёте, без правки исходных данных. Параметры - в разделе «Дополнительно».

**Два режима.** «Удалить» - пробы вне допустимого диапазона выбрасываются (для явно битых записей). «Срезать (capping)» - значения вне диапазона прижимаются к границе, а сама точка остаётся в расчёте. Срезка - классический приём для ураганных проб по содержанию: положение точки не теряется, но её влияние ограничивается. Режим переключается флажком «Срезать к границе (capping) вместо удаления».

**Границы по абсолютю.** «Нижняя граница» и «Верхняя граница» задают пороги в единицах Z напрямую. Пустое поле - граница не задана. Они приоритетнее перцентилей. Пример: для мощности поставьте нижнюю границу 0 - уйдут отрицательные значения, верхнюю, скажем, 30 - уйдёт явный выброс в 122 м.

**Границы по перцентилю.** p-й перцентиль - это значение, ниже которого лежит p% всех проб. Например, 5-й перцентиль - порог, ниже которого только 5% самых малых значений. 95-й - порог, выше которого 5% самых больших. Параметр «перцентиль обрезки, %» задаёт число p, и границы берутся симметрично: от p-го до (100-p)-го перцентилей. То есть p = 2

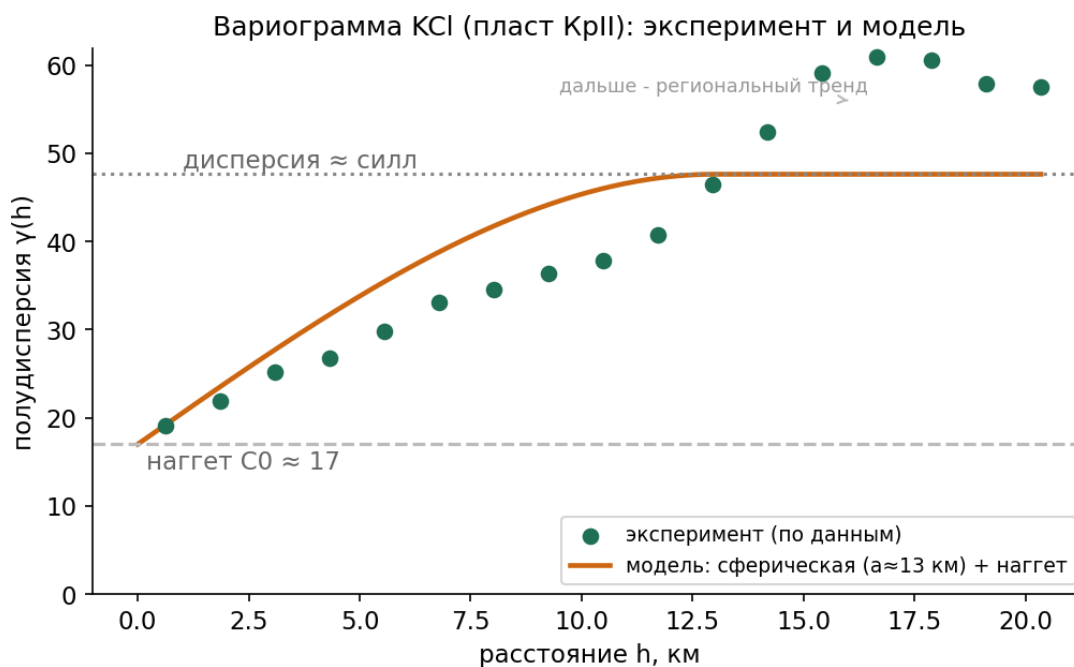


Рис. 10: Экспериментальная вариограмма KCl по пласту КрII и подобранная модель: наггет  $C_0 \approx 17$ , силл совпал с дисперсией данных, радиус  $\approx 13$  км. Точки дальше силла - региональный тренд.

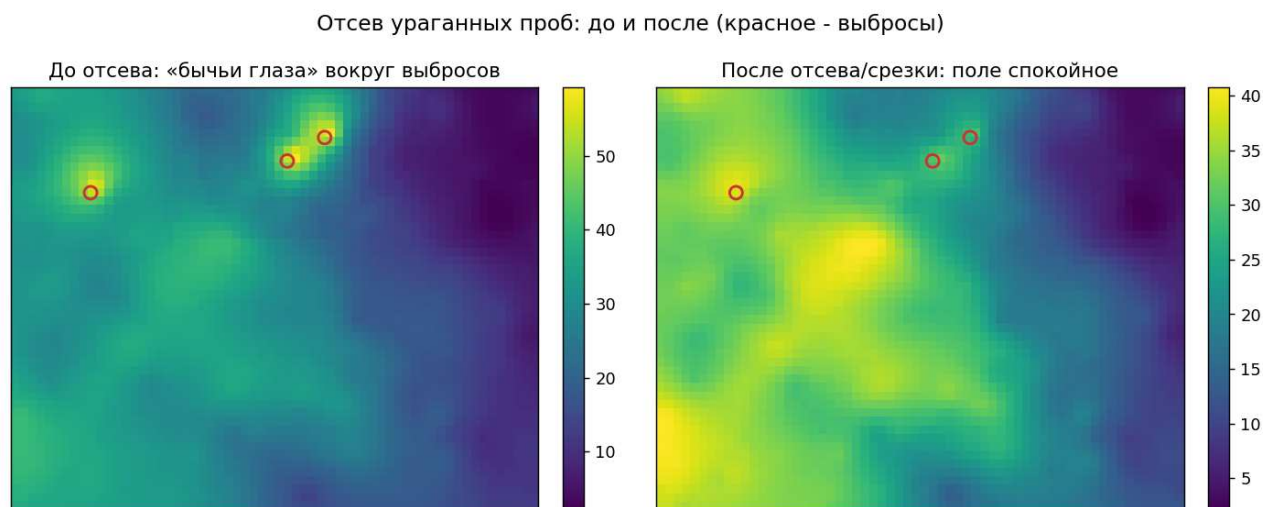


Рис. 11: Отсев ураганных проб на примере: слева три выброса дают «бычьи глаза» (горячие пятна), справа после срезки к верхней границе поле спокойное.

означает «считать ураганными 2% самых низких и 2% самых высоких проб»: всё ниже 2-го и выше 98-го перцентиля либо удаляется, либо срезается. Чем больше  $p$ , тем агрессивнее обрезка.  $P = 0$  включает перцентильный режим. Удобство в том, что абсолютные пороги знать не нужно - они вычисляются по самим данным и подходят к любому распределению и масштабу.

**Двусторонность - важно для химии.** Перцентильный режим режет оба хвоста - и верхний, и нижний. Для содержаний это опасно:  $KCl = 0$  в зонах замещения - реальная геология, и обрезка нижнего хвоста ошибочно поднимет «пустые» участки. Поэтому для грейда отсекайте только сверху: оставьте «Нижнюю границу» пустой и задайте «Верхнюю» абсолютном (или применяйте перцентиль, понимая, что низ тоже будет затронут). Для отметок и мощностей двусторонняя обрезка обычно уместна.

**Порядок и журнал.** Фильтр применяется до усреднения совпадающих точек. В Журнал инструмента выводится, сколько проб удалено или срезано и в каких границах - это удобно для контроля.

## Стандартная ошибка кригинга

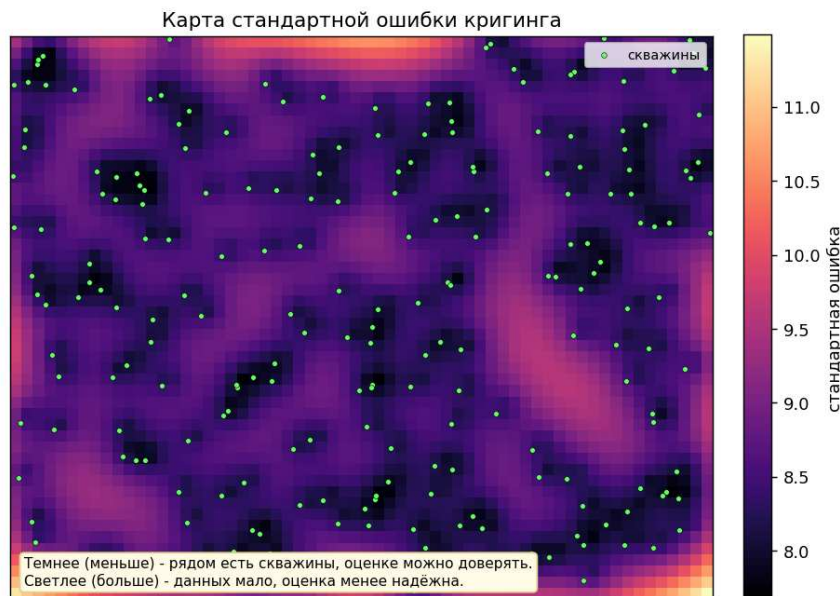


Рис. 12: Карта стандартной ошибки: тёмное у скважин (зелёные точки) - оценке можно доверять, светлое в пустых углах - данных мало.

Кроме самой оценки, кригинг даёт в каждом узле дисперсию ошибки - меру неопределённости. Её корень, стандартная ошибка, выводится необязательным вторым растром (параметр «Стандартная ошибка кригинга» инструмента «2D Kriging»). Единицы - те же, что у интерполируемой величины  $Z$ .

Ключевое свойство: стандартная ошибка зависит от геометрии расположения скважин и модели вариограммы, но не от самих значений  $Z$ . Поэтому это карта надёжности сети наблюдений, а не разброса данных. В точке скважины (при нулевом наггете) ошибка равна нулю - там значение известно точно. По мере удаления от скважин она растёт, а в областях без данных достигает максимума (примерно корень из силла).

**Как читать.** Тёмные (малые) значения - оценке можно доверять: рядом достаточно скважин. Светлые (большие) - оценка держится на далёких точках, фактически экстраполяция. Это первые кандидаты на доразведку. Сравнить удобнее относительно (где больше, где

меньше), потому что абсолютная величина зависит от масштаба вариограммы (силла S1\_SILL).

**Важно.** Это модельная оценка: она верна настолько, насколько верна заданная вариограмма (наггет, радиус, анизотропия). При наггете больше нуля ошибка у скважин не нулевая - наггет задаёт нижний «пол» неопределённости. Строгим доверительным интервалом стандартная ошибка не является, но как относительная карта неопределённости очень полезна.

**Оформление.** Задайте слою градуированную символику по значению (например, от тёмного к красному) - и сразу видно, где карта надёжна, а где нет.

## Инструмент «Изолинии из растра»

Строит изолинии (линии) и, по умолчанию, контурные полигоны. Уровни задаются равномерным шагом или явным списком. Параметры:

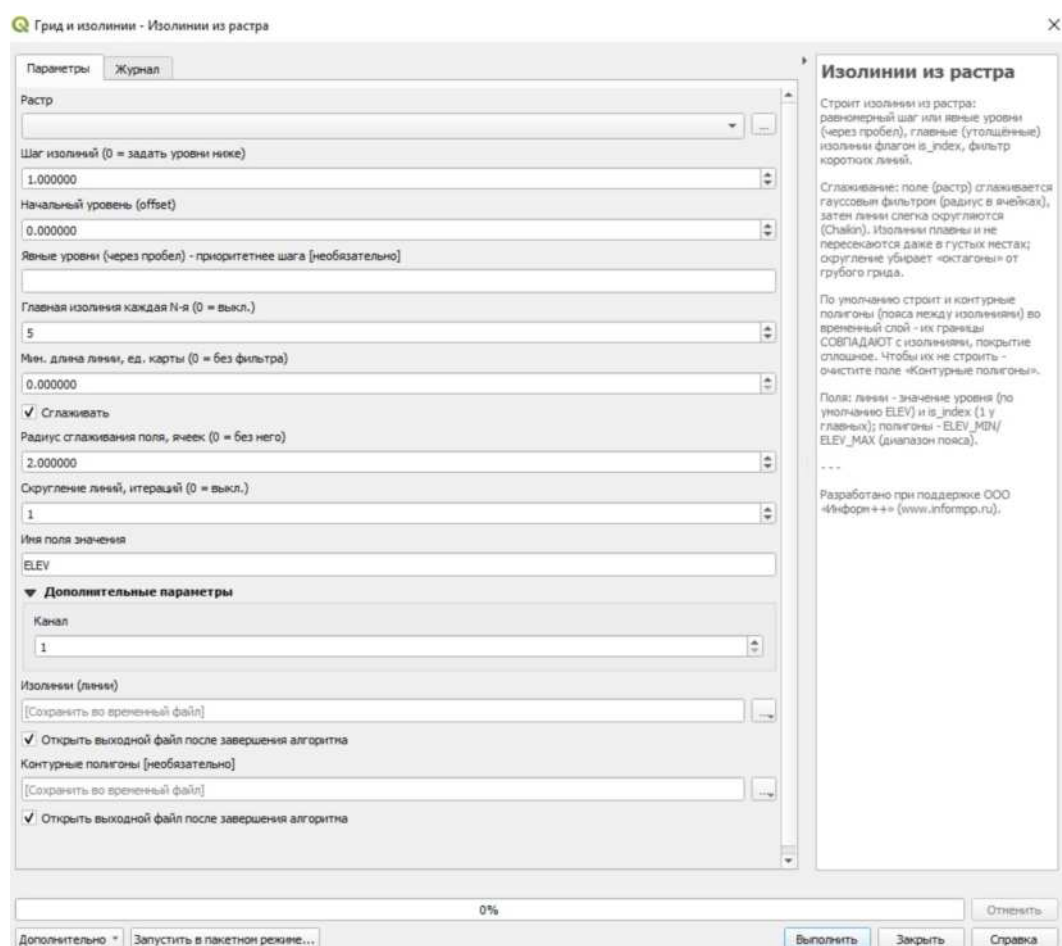


Рис. 13: Окно инструмента «Изолинии из растра».

Параметр	Что задаёт	По умолчанию / совет
Растр	Входной растр (например, результат кригинга).	-
Шаг изолиний	Равномерный шаг по Z. 0 = задать «Явные уровни».	-

Параметр	Что задаёт	По умолчанию / совет
Начальный уровень (offset)	Привязка сетки уровней (уровни кратны шагу от offset).	0
Явные уровни	Список уровней через пробел. Приоритетнее шага. Десятичный разделитель - запятая или точка.	-
Главная изолиния каждая N-я	Каждая N-я линия помечается is_index = 1 (для утолщения). 0 = выкл.	5
Мин. длина линии	Отбрасывать линии короче порога (ед. карты). 0 = без фильтра.	-
Сглаживать	Главный выключатель сглаживания (поле + скругление линий).	вкл.
Радиус сглаживания поля, ячеек	Гауссово сглаживание раstra ДО контуринга. 0 = без него.	1-2.5
Скругление линий, итераций	Лёгкое скругление линий (Chaikin) поверх гладкого поля. Убирает «октагоны». 0 = выкл.	2 (3 на грубом гриде)
Имя поля значения	Имя атрибута уровня в выходных линиях.	ELEV
Канал (доп.)	Номер канала входного раstra.	1
Изолинии / Контурные полигоны	Выходные слои. Полигоны строятся по умолчанию во временный слой.	-

Выходные поля: у линий - значение уровня (по умолчанию ELEV) и is\_index (1 у главных изолиний). У полигонов - ELEV\_MIN и ELEV\_MAX (диапазон пояса).

## Сглаживание изолиний

Сглаживание выполняется в два приёма, и оба включаются галочкой «Сглаживать»:

Сглаживание поля. Перед построением изолиний растр сглаживается гауссовым фильтром (радиус в ячейках). Изолинии строятся уже по сглаженному полю, поэтому они плавные и принципиально не пересекаются даже в густых местах. Сам растр кригинга при этом не меняется - сглаживается лишь временная копия.

Скругление линий. Поверх этого линии слегка скругляются (алгоритм Chaikin, число итераций). На грубом гриде изолинии иначе выглядят «октагонами», так как вершины ставятся по краям ячеек. Поскольку поле уже гладкое, скругление не создаёт пересечений.

Если углы всё ещё резковаты - увеличьте число итераций скругления (до 3) или уменьшите размер ячейки в кригинге. Если линии заметно «уезжают» от исходной поверхности - уменьшите радиус сглаживания поля или снимите галочку.

## Контурные полигоны (пояса)

Контурные полигоны - это залитые пояса между соседними изолиниями. Они строятся не классификацией «ступенек» раstra, а полигонизацией самих сглаженных изолиний вместе с контуром валидной области раstra: концы линий притягиваются к контуру, сеть нодируется и полигонизуется. Диапазон уровней каждого пояса определяется выборкой раstra в репрезентативной точке полигона.

Благодаря этому границы полигонов совпадают с изолиниями, а покрытие сплошное (без дыр). Полигоны несут поля `ELEV_MIN` и `ELEV_MAX`. По умолчанию они строятся во временный слой. Чтобы их не строить, очистите поле «Контурные полигоны».

## Оформление слоёв

Линии: задайте символику по правилу на основе `is_index` - главным изолиниям (`is_index = 1`) дайте бóльшую толщину. Подпись - по полю уровня (`ELEV`).

Полигоны создаются с одним символом. Для заливки по диапазонам задайте градуированную символику по `ELEV_MIN` (или `ELEV_MAX`).

Слой изолиний автоматически помещается над слоем полигонов, чтобы линии были видны поверх заливки.

## Инструмент «Вариограмма (экспериментальная)»

Инструмент строит по точкам экспериментальную полувариограмму, при необходимости подбирает по ней модель и выдаёт HTML-отчёт с графиком. Он не считает грид и не входит в расчётную цепочку кригинга напрямую. Его задача диагностическая: показать структуру пространственной изменчивости данных и помочь задать параметры вариограммы осознанно, по виду облака, а не на глаз.

### Зачем нужен предпросмотр

Кригинг опирается на модель вариограммы: наггет, порог и радиус. От них зависят веса при интерполяции и карта стандартной ошибки. Соблазнительно поручить подбор этих чисел автоматике и не думать о них. На кластеризованной разведочной сети это опасно. Скопления близких скважин дают огромное число пар на коротких расстояниях и придавливают ближнюю часть вариограммы, поэтому автоподбор по такому облаку легко выдаёт уверенно неправильный наггет. Предпросмотр снимает эту проблему: геолог видит само облако пар, понимает, где данных много, а где мало, и подгоняет модель с пониманием того, что под ней лежит.

Поэтому подбор модели в инструменте дан как рекомендация, а не как готовый результат. Числа, которые он предлагает, разумно сверить с видом графика и только потом переносить в кригинг.

### Краткая теория

Полувариограмма описывает, насколько в среднем различаются значения параметра на заданном расстоянии. Для пары точек, разнесённых на расстояние  $h$ , берётся половина квадрата разности их значений. Эти величины усредняются по интервалам расстояния (лагам), и получается кривая  $\gamma(h)$ .

У типичной кривой три характеристики. «Наггет»  $C_0$  это значение, к которому стремится  $\gamma$  при стремлении расстояния к нулю. Он отражает изменчивость на масштабе мельче, чем шаг сети, плюс ошибку измерения. «Порог» это уровень, на который кривая выходит на



больших расстояниях. Полный порог равен сумме наггета и структурных вкладов и в идеале близок к дисперсии данных. Радиус это расстояние, на котором кривая выходит на порог. Дальше этого расстояния точки практически не связаны.

Наггет и вклады в инструменте заданы в абсолютных единицах дисперсии параметра, а не долями от единицы. Ориентир для полного порога это дисперсия данных, которая выводится в сводке отчёта.

## Параметры

В поле **Точки со значениями** подаётся слой скважин, в **Поле значения Z** выбирается интерполируемый параметр. **Число лагов** задаёт, на сколько интервалов разбивается диапазон расстояний. **Максимальное расстояние** ограничивает дальний край вариограммы и задаётся в единицах слоя (для метровых координат это метры). Значение 0 означает половину диагонали охвата.

Флаг **Подобрать модель (рекомендация)** включает автоматический подбор, а **Модель для подбора** позволяет зафиксировать тип модели или оставить автоматический выбор лучшей. **Устойчивая оценка (Кресси-Хокинса)** снижает влияние редких аномальных пар. **Показать облако пар** добавляет на график исходные пары до усреднения.

Группа **Ураганные пробы** убирает выбросы: перцентиль обрезки, нижняя и верхняя границы значения, режим срезания к границе вместо удаления. **Наложить заданную модель вариограммы** рисует поверх облака модель с указанными вручную наггетом, порогом и радиусом, что удобно для сравнения своей модели с данными.

На выходе формируются **Таблица вариограммы** со столбцами лаг,  $\gamma$  и число пар, и **Отчёт (HTML)** с графиком, подобранной кривой и линией дисперсии данных.

## Поле группировки и разноплотностная разведка

Необязательное **Поле группировки** строит отдельную вариограмму для каждого значения поля и накладывает их на один график. Это нужно, когда выборка собрана сетями разной природы и плотности, например поверхностной и подземной разведкой. Подав в группировку вид разведки, можно увидеть, общая ли у этих совокупностей структура или у каждой своя.

Смешение разноплотностных сетей не создаёт артефактов само по себе, но искажает общую вариограмму. Плотная сеть даёт много пар на коротких лагах и формирует ближнюю часть кривой, редкая сеть работает на дальних. Одна модель, натянутая на такое облако, оказывается смесью двух структур и не описывает корректно ни одну. Группировка эту смесь показывает, и решение, законно ли объединять совокупности, остаётся за геологом. Декластеризация к облаку пар при этом не применяется. Её веса предназначены для исправления гистограммы и среднего, а не для пар вариограммы, где каждая пара полноправна независимо от плотности сети.

## Три типичные геологические ситуации

Отметки залегания, мощности и содержания полезного компонента имеют разные геостатистические характеристики, и полезно видеть их рядом. На иллюстрации показаны вариограммы трёх параметров одного промышленного пласта, рассчитанные в едином окне расстояний.

Отметка кровли это гладкая поверхность. Наггет почти нулевой, радиус большой, модель близка к гауссовой, качество подбора очень высокое. Соседние скважины дают почти одинаковую отметку, изменчивость крупномасштабная. Кригинг работает уверенно. Здесь есть тонкость: гауссова модель с почти нулевым наггетом численно неустойчива и даёт на карте характерные «бычьи глаза». Небольшой наггет стоит задать вручную.

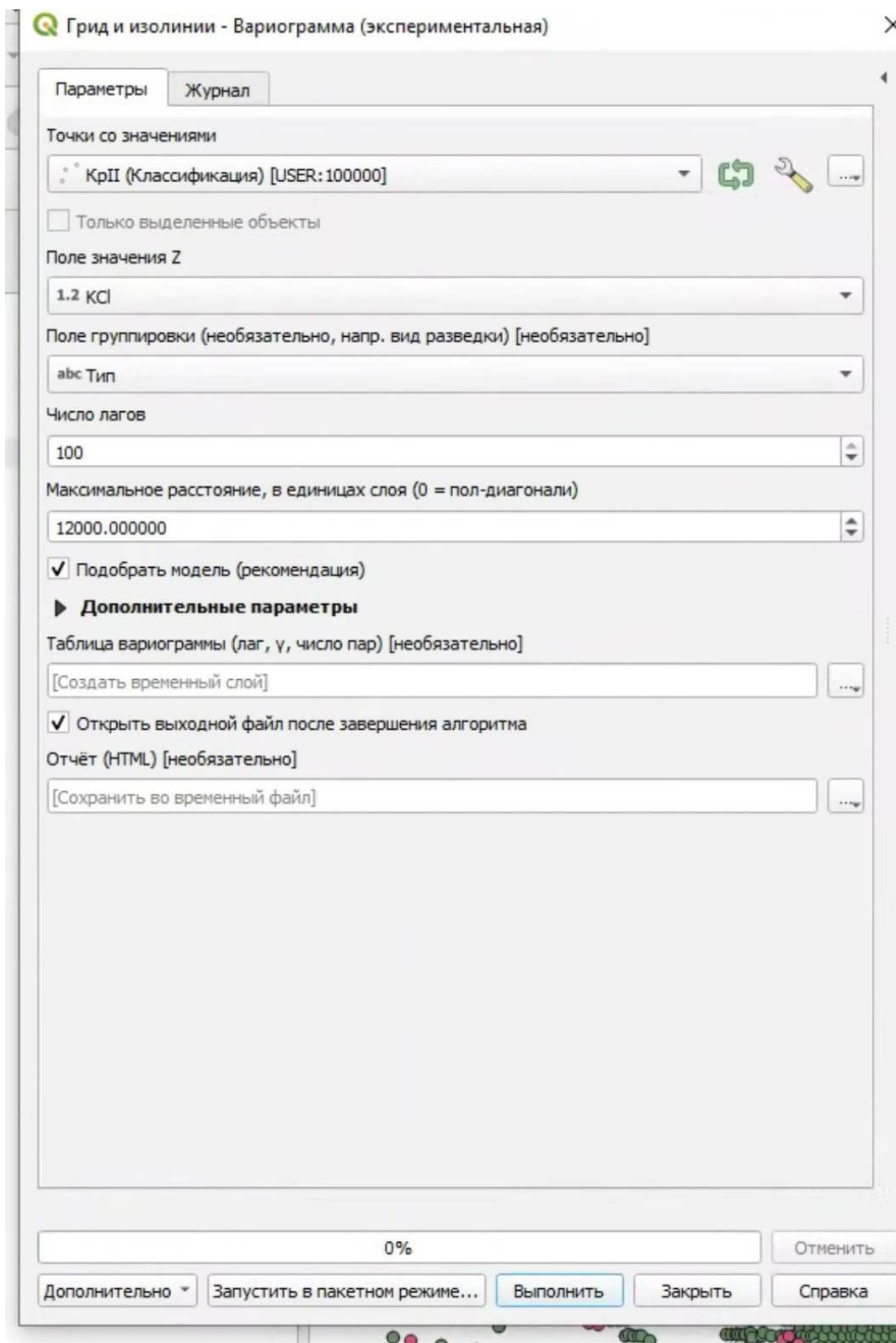


Рис. 14: Окно инструмента «Вариограмма (экспериментальная)»: точки, поле Z, поле группировки, число лагов и максимальное расстояние. Подбор модели и наложение своей - в разделе «Дополнительные параметры».

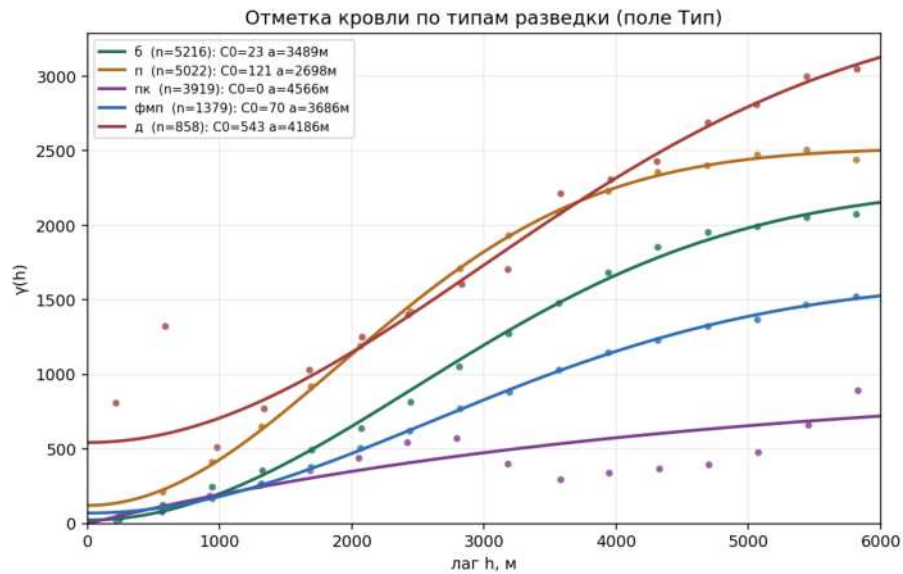


Рис. 15: Отметка кровли по пласту КрII, сгруппированная по виду разведки: подземная сеть лежит заметно ниже (область однороднее), детальная разведка даёт высокий наггет. Разные совокупности видно сразу.

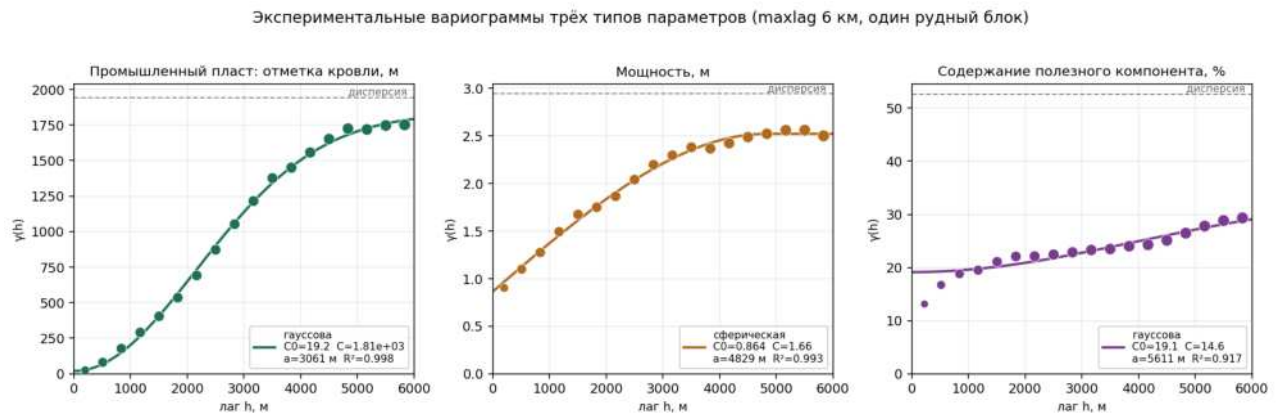


Рис. 16: Три типа параметров одного пласта в едином окне: отметка кровли (почти нулевой наггет, гладкая поверхность), мощность (наггет около трети, сферическая) и содержание (наггет сопоставим со вкладом, шумный параметр).

Мощность это промежуточный случай. Наггет составляет заметную долю порога, радиус средний, модель чаще сферическая. Около половины изменчивости структурная, половина мелкомасштабная. Это типичная рабочая вариограмма.

Содержание полезного компонента самый шумный параметр. Наггет сопоставим со структурным вкладом или превышает его, кривая поднимается медленно, качество подбора ниже, и модель плохо отличается от соседних типов. Основная изменчивость сидит на масштабе мельче сети опробования. Кригинг такой параметр сильно сглаживает, а кросс-валидация показывает большую ошибку. Содержание предсказуемо хуже, чем отметки и мощности, и это нормально.

## Максимальное расстояние и выход на плато

Самая частая ошибка это слишком большое максимальное расстояние. Если оставить автоматическое значение в половину диагонали, на вытянутом месторождении окно растягивается на десятки километров. Лаги начинают связывать точки через безрудные провалы и межблоковые разрывы, вариограмма ловит региональный тренд вместо локальной структуры, а подбор выдаёт радиус больше самого окна и порог в разы выше дисперсии. Признак беды простой: радиус подобранной модели сопоставим с окном или превышает его. Это значит, что кривая не вышла на плато и порог получен экстраполяцией.

Лечится это уменьшением максимального расстояния до локального масштаба и проверкой, что вариограмма успела выйти на полку. На примере содержания одного пласта при окне 6 километров подбор давал радиус около 9 километров и порог ниже дисперсии, то есть кривая ещё не вышла на плато. При окне 12 километров она вышла, дав радиус около 18 километров и полный порог, близкий к дисперсии данных. Реальный радиус корреляции оказался больше, чем виделось в узком окне, и правильный ответ дала именно проверка на выход кривой на плато.

При этом окно не должно перешагивать крупные безрудные зоны. На разведочной сети их видно по падению плотности точек, и вариограмму следует строить в пределах одного рудного блока, иначе локальная геология смешивается с региональной тектоникой.

## Рабочий цикл с кросс-валидацией

Вариограмма даёт стартовую модель, а проверяет её **Кросс-валидация вариограммы**. Порядок такой. Сначала строится экспериментальная вариограмма с максимальным расстоянием, при котором кривая выходит на плато, и снимаются рекомендованные наггет, вклад, радиус и модель. Затем эти числа переносятся в кросс-валидацию и оцениваются метрики скользящего контроля.

Среднее смещение ME должно быть около нуля, это значит, что систематической ошибки нет. Среднеквадратичная ошибка RMSE показывает абсолютную точность. Отдельного внимания заслуживает MSDR, отношение квадрата ошибки к дисперсии кригинга. Если оно заметно больше единицы, кригинг недооценивает неопределённость и карта стандартной ошибки занижена.

Правка MSDR делается точно, а не на глаз. В ординарном кригинге домножение всей вариограммы на постоянный множитель не меняет оценки, поскольку веса зависят только от формы кривой, а не от её масштаба. Меняется лишь дисперсия кригинга. Поэтому достаточно умножить наггет и вклады на текущее значение MSDR, оставив радиус и модель прежними, и повторить кросс-валидацию. Метрики ME, MAE, RMSE и R при этом не сдвигаются, а MSDR приходит к единице, и карта ошибки становится честной.

После масштабирования полный порог может оказаться выше дисперсии данных. На кластеризованной сети это не ошибка. Наивная дисперсия занижена, потому что плотные скопления скважин её перетягивают, а истинная разброска по площади больше. Превышение порога над дисперсией здесь следствие неравномерной сети.

Готовую и проверенную модель остаётся перенести в **2D Kriging** для расчёта грида, а дальше при необходимости в **Изолинии из растра**.

## Инструмент «Кросс-валидация вариограммы»

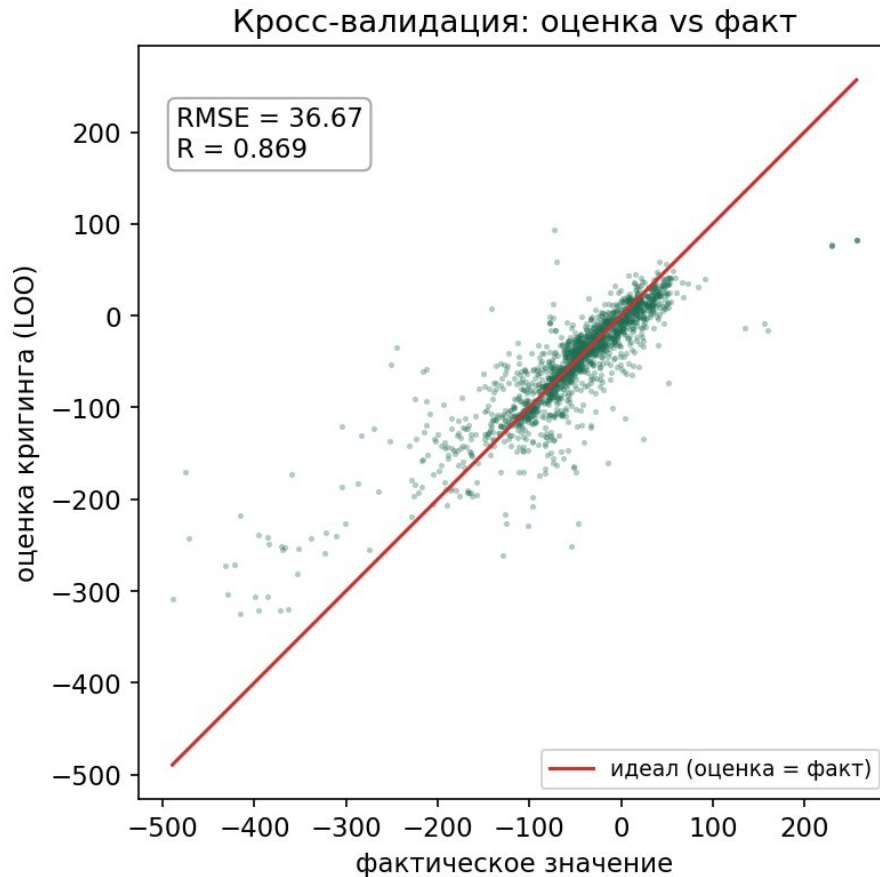


Рис. 17: Идея кросс-валидации: оценку кригинга по остальным точкам (по вертикали) сравнивают с фактом (по горизонтали). Чем теснее облако ложится на диагональ оценка = факт, тем точнее модель.

Инструмент проверяет, насколько удачно подобрана вариограмма, методом скользящего контроля (leave-one-out): каждая скважина по очереди исключается, её значение предсказывается кригингом по всем остальным, и сравнивается с фактическим. Так параметры (наггет, радиус, модель) подбираются по ошибке, а не субъективно.

В Журнал выводятся метрики:

**МЕ (среднее смещение)** - систематическая ошибка. Должна быть близка к 0 (несмещённость).

**MAE и RMSE** - средняя и среднеквадратичная ошибка предсказания. Чем меньше, тем точнее. Но одной RMSE недостаточно: она минимальна при нулевом наггете (переобучение), хотя неопределённость при этом оценена неверно.

**MSDR (стандартизованная ошибка)** - средний квадрат ошибки, делённой на стандартную ошибку кригинга. Должен быть близок к 1. Если MSDR заметно больше 1 - дисперсия недооценена (наггет или силл малы). Если меньше 1 - переоценена.

**R** - коэффициент корреляции «оценка - факт».

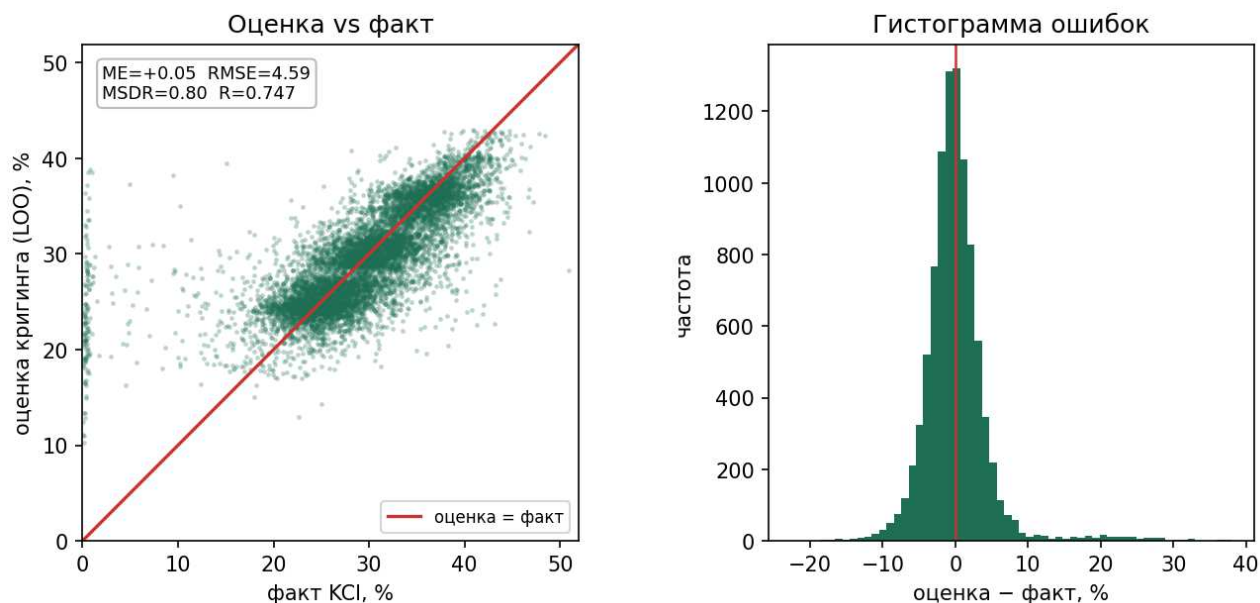


Рис. 18: Так выглядит HTML-отчёт кросс-валидации: слева график «оценка vs факт» с диагональю и метриками (пример - KCl по пласту KpII), справа гистограмма ошибок. Плотное облако вдоль диагонали - модель работает. Полоса при факте около 0 - зоны замещения. Гистограмма симметрична относительно 0 - смещения нет.

На практике переберите несколько вариантов вариограммы и сравните. Хорошая модель даёт ME около 0, малую RMSE и MSDR около 1. Если RMSE тянет к нулевому наггету, а MSDR при этом огромный - это признак переобучения. Небольшой наггет калибрует неопределённость.

Оptionальный слой остатков (точки с полями: факт - под именем проверяемого поля, `z_est`, `error`, `abs_error` и `std_resid`. Плюс номер скважины, если задано поле ID) показывает, где модель промахивается: крупные по модулю остатки - проблемные участки, систематические знаки остатков - локальный тренд. Слой автоматически называется по проверяемому полю и источнику, а у полей заданы псевдонимы - понятные названия (видны в таблице атрибутов и свойствах поля). `std_resid` - это стандартизованный остаток (оценка – факт) / стандартную ошибку кригинга, со знаком: минус - кригинг занижил, плюс - завысил (это не дисперсия, дисперсия всегда  $\geq 0$ ).

Поля слоя остатков:

Поле	Псевдоним	Описание
<номер скважины>	Номер скважины	Значение выбранного поля ID (если задано «Поле номера скважины»).
<имя поля>	Факт (имя поля)	Фактическое значение проверяемого поля.
<code>z_est</code>	Оценка кригинга (LOO)	Оценка по остальным точкам (leave-one-out).
<code>error</code>	Ошибка (оценка – факт)	Оценка минус факт. Минус - занижено, плюс - завышено.
<code>abs_error</code>	Модуль ошибки	Абсолютная величина ошибки, $ \text{error} $ .

Поле	Псевдоним	Описание
std_resid	Станд. остаток	(оценка – факт) / стандартную ошибку кригинга, со знаком. Не дисперсия (она $\geq 0$ ).

Кроме слоя остатков инструмент по умолчанию формирует HTML-отчёт (на plotly): интерактивный график «оценка vs факт» с диагональю, гистограмма ошибок, QQ-график остатков и таблица метрик с блоком рекомендаций. В таблицу добавлена дисперсия данных - ориентир для суммарного силла C0+C. Рядом с таблицей метрик показывается блок «Параметры кригинга»: перечислены только настройки, отличающиеся от стандартных (наггет, силл, радиус, отсев и так далее), чтобы было видно, какими параметрами получены эти метрики. На графике «оценка vs факт» при наведении на точку видны номер скважины и значения, а восемь скважин с наибольшими по модулю остатками подписаны прямо на графике - их удобно проверить в первую очередь. Отчёт открывается в просмотрщике результатов QGIS (или в браузере). Если plotly в сборке QGIS недоступен, отчёт всё равно создаётся - с таблицей метрик, но без графиков.

**QQ-график остатков.** Показывает форму распределения ошибок. Ошибки нормируются на их собственную дисперсию (z-оценка) и сравниваются с нормальным распределением, поэтому график читается по форме при любой калибровке. За масштаб неопределённости отвечает отдельно MSDR в таблице метрик. По горизонтали - квантили нормального распределения, по вертикали - нормированная ошибка. Если ошибки нормальны, точки ложатся на красную диагональ. Отклонения читаются сразу. Загнутые концы (S-образно) - тяжёлые хвосты, то есть крупных промахов больше, чем при норме. Общий изгиб дугой - асимметрия, стоит подумать о трансформации значений. Отдельная группа, оторвавшаяся от линии, - чужая совокупность в данных, например безрудные пробы из зон замещения (где полезного компонента практически нет). Нормальность важна потому, что на ней основаны MSDR и карта стандартной ошибки.

**Главное - что делать с результатами.** Смысл инструмента в том, чтобы перед построением грида утвердить или поправить весь набор параметров, который вы затем зададите в «2D Kriging». Это и вариограмма (наггет, силл, радиус, модель, анизотропия), и настройки самого кригинга (радиус поиска, минимум/максимум точек, тип - ординарный или простой): кросс-валидация считает кригинг ровно с теми же настройками, поэтому удачный набор переносится в инструмент «2D Kriging» без изменений. Порядок решений:

- ME около 0, MSDR около 1, RMSE и R вас устраивают - набор можно утверждать: переносите эти же параметры (вариограмму и настройки поиска) в «2D Kriging» и стройте поверхность.
- MSDR заметно больше 1 - кригинг слишком «уверен в себе», карта стандартной ошибки будет занижена: увеличьте наггет C0 или силл и проверьте снова.
- MSDR меньше 1 - неопределённость завышена: уменьшите наггет или силл.
- ME заметно отличается от 0 - систематический сдвиг: проверьте данные и тип кригинга (для простого кригинга - заданное среднее).
- Большая RMSE и низкий R - модель плохо предсказывает: попробуйте другой радиус, модель или анизотропию (азимут и отношение осей). Если ничего не помогает - это предел данных: короткомасштабная изменчивость, которую сеть не ловит (например, зоны замещения по руде - на графике выше это вертикальная полоса при факте около 0).

Слой остатков подсказывает точно: где остатки крупные - там стоит сгустить сеть (добавить скважины) или проверить пробы. Где остатки систематически одного знака по площади - там локальный тренд, который кригинг не учёл.

Итог: этот инструмент - последний шаг перед финальным кригингом. Сначала вы калибруете вариограмму здесь по ошибке, затем те же параметры ставите в «2D Kriging»

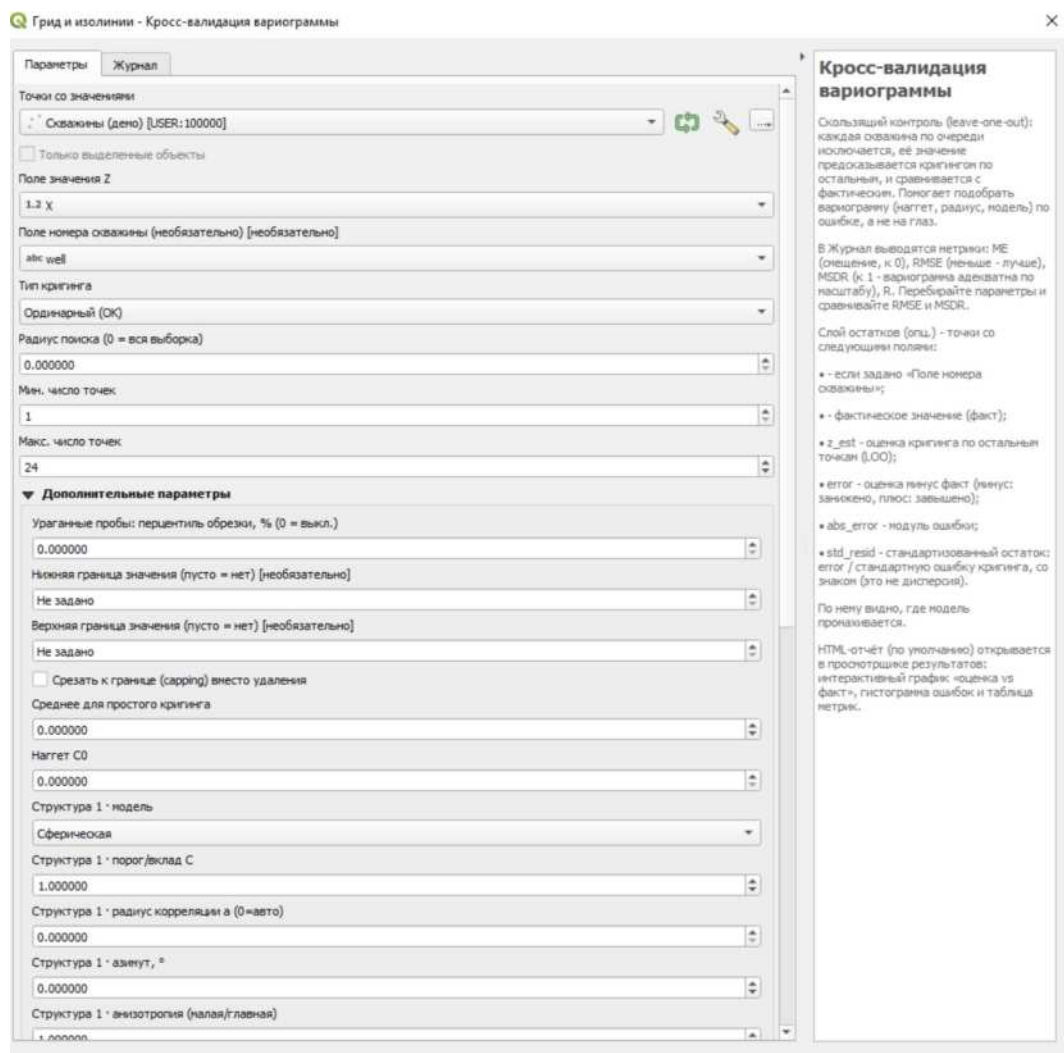


Рис. 19: Окно инструмента «Кросс-валидация вариограммы». Поле «Поле номера скважины» включает подписи скважин в отчёте.



## QQ-график ошибок: как читать форму

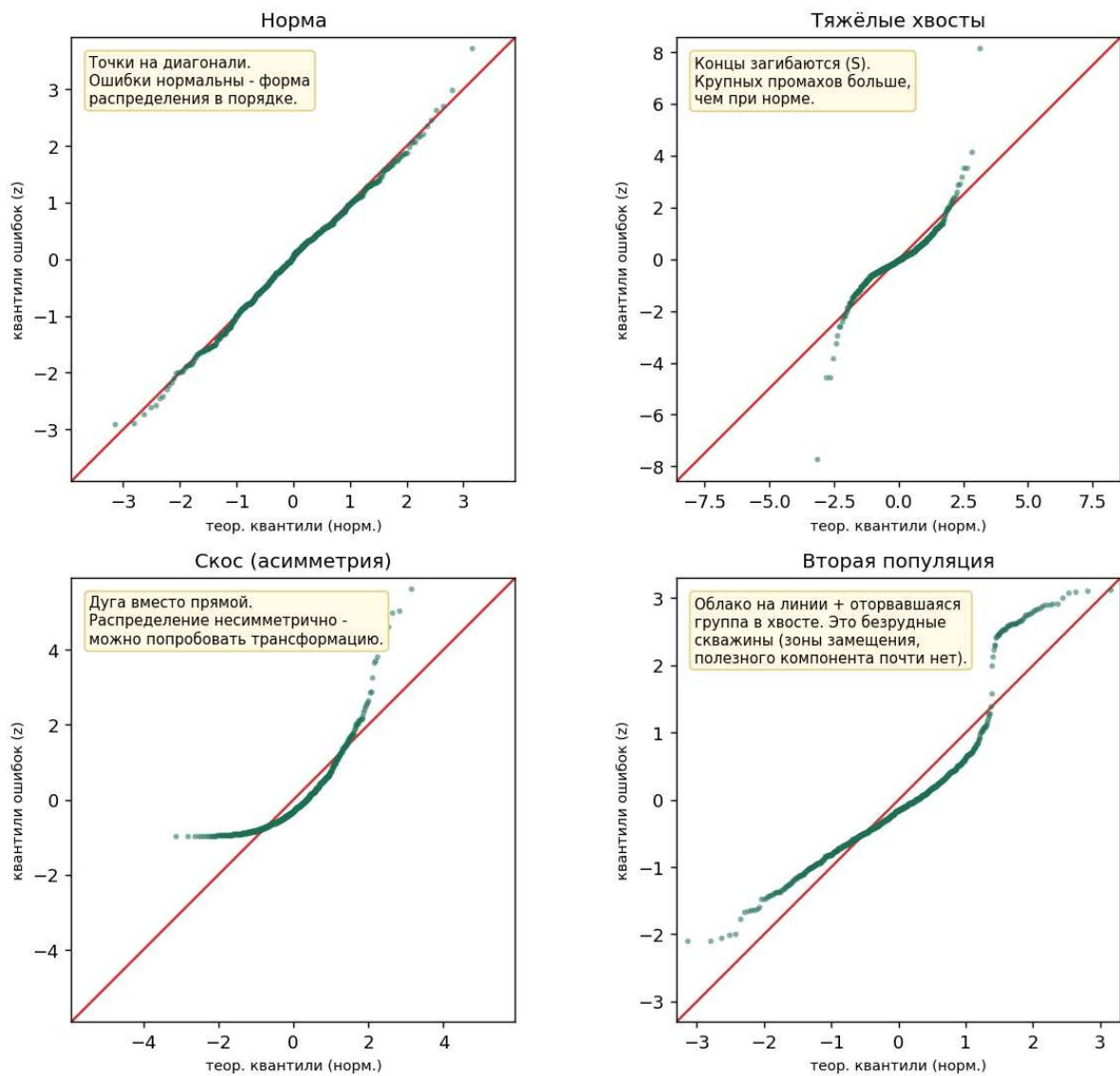


Рис. 20: Четыре типичных вида QQ-графика остатков: норма (точки на диагонали), тяжёлые хвосты, асимметрия и вторая популяция - оторвавшаяся группа в хвосте.

- и поверхность вместе с картой стандартной ошибки получаются обоснованными, а не подобранными субъективно.

Замечание о скорости: контроль решает кригинг столько раз, сколько точек, поэтому на больших наборах (десятки тысяч скважин) выполняется заметно дольше. При необходимости уменьшите выборку.

## Инструмент «Создать пример скважин (демо)»

Инструмент «Создать пример скважин (демо)» формирует точечный слой со случайными координатами и тремя структурированными полями: абсолютная отметка кровли пласта (roof), мощность (thick) и содержание абстрактного компонента X (%). Диапазоны кровли и мощности заданы по образцу промышленного пласта (KpII). Инструмент предназначен для обучения и проверки кригинга, изолиний и кросс-валидации без реальных данных.

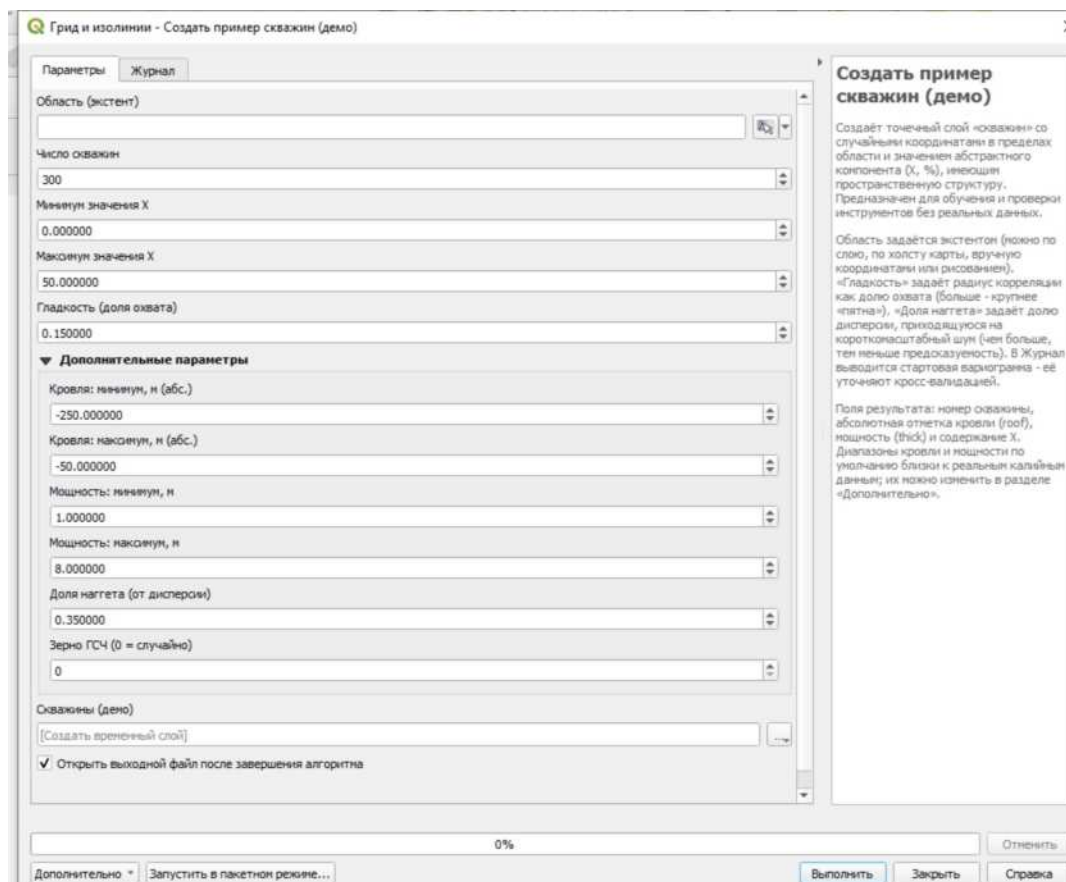


Рис. 21: Окно инструмента «Создать пример скважин (демо)».

Параметры: область (экстент - можно задать по слою, по холсту карты, координатами или рисованием на карте). Число скважин. Минимум и максимум значения X. Диапазоны кровли и мощности (по умолчанию - как у KpII). Гладкость (доля охвата - задаёт радиус корреляции: больше значение - крупнее области однородности). Доля наггета (доля дисперсии, приходящаяся на короткомасштабный шум. Чем больше, тем ниже предсказуемость). В разделе «Дополнительно» - зерно генератора случайных чисел для воспроизводимости.

При запуске в Журнал выводится стартовая вариограмма (суммарный силл  $\approx$  дисперсии данных, наггет, радиус). Сгенерированные данные имеют восстанавливаемую вариограмму, поэтому на них удобно освоить весь цикл: построить грид в «2D Kriging», затем изолинии,

и проверить параметры кросс-валидацией.

## Типичные ситуации и решения

Что видно	Причина	Решение
Концентрические «бычьи глаза», конусы	Кригинг точно протягивает значение через скважины-выбросы (нагет 0).	Задать нагет C0 (0.2-0.4 от силла, в абсолютных единицах дисперсии). И/или увеличить радиус сглаживания поля.
Угловатые изолинии («октагоны»)	Грубый грид: вершины ставятся по краям ячеек.	Увеличить «Скругление линий» до 3 или уменьшить размер ячейки в кригинге.
Радиальные/веерные линии в пустых углах	Экстраполяция за пределами данных.	Включить «Обрезать по контуру скважин» или задать маску обрезки.
Изолинии пересекаются в густых местах	Раньше - следствие сглаживания каждой линии.	Сглаживание выполняется по полю. Увеличить радиус сглаживания поля.
Полигоны одного цвета	По умолчанию слой создаётся с одним символом.	Задать градуированную символику по ELEV_MIN.

## Лицензия и поддержка

Плагин распространяется под лицензией GNU GPL v2 или новее (GPL-2.0-or-later) - той же, что и сам QGIS. Полный текст в файле LICENSE в комплекте. © ООО «Информ++», [www.informpp.ru](http://www.informpp.ru).