

# Isoliner - грид и изолинии

## Содержание

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение</b>                                                | <b>6</b>  |
| Установка и расположение . . . . .                             | 7         |
| Обновление . . . . .                                           | 8         |
| Вызов справки . . . . .                                        | 9         |
| <b>Общая логика работы</b>                                     | <b>9</b>  |
| <b>1.01 Декластеризация (веса)</b>                             | <b>9</b>  |
| <b>1.02 2D Kriging (точки → растр)</b>                         | <b>10</b> |
| Автоматические значения . . . . .                              | 11        |
| Обрезка по контуру скважин . . . . .                           | 11        |
| Вариограмма и наггет . . . . .                                 | 11        |
| Наггет C0 . . . . .                                            | 13        |
| Структуры, радиус и анизотропия . . . . .                      | 14        |
| Отсев ураганных проб . . . . .                                 | 16        |
| Стандартная ошибка кригинга . . . . .                          | 18        |
| Снятие тренда (регрессия-кригинг) . . . . .                    | 19        |
| Блочный кригинг . . . . .                                      | 20        |
| <b>1.03 Минимальная кривизна (точки → растр)</b>               | <b>20</b> |
| <b>1.04 Изолинии из растра</b>                                 | <b>21</b> |
| Сглаживание изолиний . . . . .                                 | 22        |
| Контурные полигоны (пояса) . . . . .                           | 23        |
| Оформление слоёв . . . . .                                     | 23        |
| Значение в Z геометрии . . . . .                               | 23        |
| Топографические подписи . . . . .                              | 23        |
| Без разрешения перевёрнутых подписей это не работает . . . . . | 24        |
| Подпись ставится на линию . . . . .                            | 24        |
| Предупреждение о плоских уровнях . . . . .                     | 24        |
| Уверенность горизонталей . . . . .                             | 24        |
| Почему порог задаётся долей сечения . . . . .                  | 25        |
| Почему рвутся только серии . . . . .                           | 25        |
| Порядок в конвейере и сводка . . . . .                         | 25        |
| Чего инструмент не делает . . . . .                            | 25        |
| <b>1.05 Вариограмма (экспериментальная)</b>                    | <b>25</b> |
| Зачем нужен предпросмотр . . . . .                             | 26        |
| Краткая теория . . . . .                                       | 26        |
| Параметры . . . . .                                            | 26        |
| Поле группировки и разноплотностная разведка . . . . .         | 29        |
| Три типичные геологические ситуации . . . . .                  | 29        |
| Максимальное расстояние и выход на плато . . . . .             | 30        |
| Откуда взялся наггет . . . . .                                 | 31        |

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| Когда подбор ни на что не годен . . . . .                | 31        |
| Рабочий цикл с кросс-валидацией . . . . .                | 31        |
| <b>1.06 Вариограммная карта (анизотропия)</b>            | <b>32</b> |
| Что такое анизотропия и зачем её видеть . . . . .        | 32        |
| Как читать карту . . . . .                               | 32        |
| Параметры . . . . .                                      | 32        |
| Оценка азимута, анизотропии и радиуса . . . . .          | 33        |
| Когда радиус упирается в окно . . . . .                  | 35        |
| Растр поверхности . . . . .                              | 35        |
| <b>1.07 Кросс-валидация вариограммы</b>                  | <b>35</b> |
| <b>1.08 Кросс-валидация метода (LOO)</b>                 | <b>39</b> |
| <b>1.09 Профили обработки</b>                            | <b>42</b> |
| Откуда берутся профили . . . . .                         | 42        |
| Применение . . . . .                                     | 42        |
| Управление . . . . .                                     | 42        |
| <b>1.10 Создать пример скважин (демо)</b>                | <b>43</b> |
| <b>1.11 Создать пример геофизических профилей (демо)</b> | <b>44</b> |
| Кригинг или минимальная кривизна . . . . .               | 45        |
| <b>Топография: рельеф из открытых данных</b>             | <b>46</b> |
| <b>2.01 Загрузка ЦМР по рамке</b>                        | <b>46</b> |
| <b>2.02 Загрузка топоосновы по рамке</b>                 | <b>47</b> |
| <b>2.03 Торо2Raster (рельеф из векторов)</b>             | <b>49</b> |
| Трёхмерные тальвеги . . . . .                            | 50        |
| Граница области построения . . . . .                     | 51        |
| <b>2.04 Подготовка рельефа</b>                           | <b>51</b> |
| <b>2.05 Сток и аккумуляция (D8)</b>                      | <b>52</b> |
| <b>2.06 Речная сеть</b>                                  | <b>53</b> |
| <b>2.07 Бассейны и водоразделы</b>                       | <b>54</b> |
| <b>2.08 Уклон и экспозиция</b>                           | <b>55</b> |
| <b>2.09 Вершины</b>                                      | <b>55</b> |
| <b>2.10 Демо-рельеф</b>                                  | <b>56</b> |
| Пара поверхностей для объёмов . . . . .                  | 56        |
| Овражно-балочная сеть . . . . .                          | 57        |
| Куда ложится демо . . . . .                              | 57        |
| <b>2.11 Разделить горизонтالي для проверки</b>           | <b>57</b> |
| Зачем разделять . . . . .                                | 57        |
| Почему делим по отметкам, а не по объектам . . . . .     | 57        |
| Что на выходе . . . . .                                  | 57        |
| Рабочий порядок . . . . .                                | 58        |
| Параметры . . . . .                                      | 58        |

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2.12 Невязка горизонталей против ЦМР</b>             | <b>58</b> |
| Какие числа выдаются . . . . .                          | 58        |
| Две цифры вместо одной . . . . .                        | 58        |
| Отчёт . . . . .                                         | 59        |
| Слой точек . . . . .                                    | 59        |
| Параметры . . . . .                                     | 59        |
| <b>2.13 Диагностика террасинга ЦМР</b>                  | <b>59</b> |
| Два независимых признака . . . . .                      | 59        |
| Сечение рельефа . . . . .                               | 60        |
| Плоские участки в счёт не идут . . . . .                | 60        |
| Отчёт . . . . .                                         | 60        |
| Чем лечить . . . . .                                    | 60        |
| Параметры . . . . .                                     | 60        |
| <b>2.14 Убрать ступени (сглаживание с ограничением)</b> | <b>61</b> |
| Как это возможно . . . . .                              | 61        |
| Лечение самопроверяемое . . . . .                       | 61        |
| Чего инструмент не делает . . . . .                     | 61        |
| Параметры . . . . .                                     | 61        |
| <b>2.15 Отчёт по створу</b>                             | <b>62</b> |
| Как это работает . . . . .                              | 62        |
| Что считается . . . . .                                 | 62        |
| Параметры . . . . .                                     | 62        |
| Быстрая проверка на демо . . . . .                      | 63        |
| Границы применимости . . . . .                          | 63        |
| <b>2.16 Водосбор. Линии и контуры (канавы, карьеры)</b> | <b>63</b> |
| Как это работает . . . . .                              | 63        |
| Контур вместо линии . . . . .                           | 64        |
| Врезка трассы . . . . .                                 | 64        |
| Что считается . . . . .                                 | 64        |
| Параметры . . . . .                                     | 64        |
| Быстрая проверка на демо . . . . .                      | 65        |
| Границы применимости . . . . .                          | 65        |
| <b>2.18 Насыпи и выемки (объёмы работ)</b>              | <b>65</b> |
| Знак и поверхность сравнения . . . . .                  | 65        |
| Приведение к одной сетке . . . . .                      | 65        |
| Почему цифры расходятся с другими программами . . . . . | 65        |
| Мёртвая зона . . . . .                                  | 66        |
| Участки и баланс . . . . .                              | 66        |
| Выходы . . . . .                                        | 66        |
| Параметры . . . . .                                     | 66        |
| Быстрая проверка на демо . . . . .                      | 67        |
| Границы применимости . . . . .                          | 67        |
| <b>2.19 Кандидаты бровок и подошв</b>                   | <b>67</b> |
| <b>2.20 Бровки и подошвы в работу</b>                   | <b>68</b> |
| <b>2.21 Создать пример карьера (демо)</b>               | <b>69</b> |
| <b>3.01 Категориальный индикаторный кригинг</b>         | <b>70</b> |
| Как считается . . . . .                                 | 70        |
| Когда скважина не попала в свою зону . . . . .          | 72        |
| Что на выходе . . . . .                                 | 72        |

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| Векторные границы по вероятностям . . . . .              | 73        |
| <b>3.02 Кригинг с внешним дрейфом (External Drift)</b>   | <b>74</b> |
| В чём отличие от снятия тренда . . . . .                 | 74        |
| Как считается . . . . .                                  | 74        |
| Атрибуты сгенерированного слоя . . . . .                 | 75        |
| Параметры . . . . .                                      | 76        |
| Вариограмма по остаткам . . . . .                        | 76        |
| <b>3.03 Карта вероятности превышения</b>                 | <b>76</b> |
| Как считается . . . . .                                  | 76        |
| Как получить входы . . . . .                             | 77        |
| Параметры . . . . .                                      | 77        |
| Применение . . . . .                                     | 77        |
| <b>3.04 Гидравлический градиент и направление потока</b> | <b>77</b> |
| Без проницаемости . . . . .                              | 77        |
| Параметры и сглаживание . . . . .                        | 80        |
| Стрелки из точек . . . . .                               | 80        |
| Учебный цикл . . . . .                                   | 81        |
| <b>3.05 Удельный расход (закон Дарси)</b>                | <b>81</b> |
| Что считается . . . . .                                  | 81        |
| Как получить растры К и Т . . . . .                      | 81        |
| Параметры . . . . .                                      | 81        |
| Применение . . . . .                                     | 82        |
| <b>3.06 Гауссова симуляция (SGS)</b>                     | <b>82</b> |
| Параметры . . . . .                                      | 83        |
| <b>Виды кригинга: какой выбрать</b>                      | <b>83</b> |
| Шпаргалка . . . . .                                      | 84        |
| <b>3.07 Плотность по замерам (переменная опора)</b>      | <b>84</b> |
| Выход и инвариант . . . . .                              | 85        |
| Как читать . . . . .                                     | 85        |
| Окно «Карта плотности» (живой предпросмотр) . . . . .    | 86        |
| <b>3.08 Создать пример для плотности (демо)</b>          | <b>86</b> |
| <b>4.01 Разрез по линии</b>                              | <b>86</b> |
| Как задаются пласты . . . . .                            | 86        |
| Разрез по одной поверхности . . . . .                    | 86        |
| Порядок поверхностей задаёт дерево слоёв . . . . .       | 87        |
| Выходы . . . . .                                         | 87        |
| Вертикальный масштаб . . . . .                           | 88        |
| Несколько разрезов за один прогон . . . . .              | 88        |
| Цвет полос: справочник пластов . . . . .                 | 89        |
| Атрибуты выходных слоёв . . . . .                        | 89        |
| Параметры . . . . .                                      | 90        |
| Как попробовать на демо . . . . .                        | 91        |
| Связь с QGIS . . . . .                                   | 91        |
| <b>4.02 Скважины на разрезе (модель бурения)</b>         | <b>91</b> |
| Модель бурения . . . . .                                 | 91        |
| Терпимый читатель . . . . .                              | 92        |
| Пакетность и совмещение . . . . .                        | 92        |
| Раскраска и легенда . . . . .                            | 92        |

|                                                 |            |
|-------------------------------------------------|------------|
| Обрезка по чертежу и рамке . . . . .            | 92         |
| Цвет колонок: справочник пластов . . . . .      | 93         |
| Параметры . . . . .                             | 93         |
| <b>4.03 Состав пласта на разрезе</b>            | <b>93</b>  |
| Два режима . . . . .                            | 94         |
| Параметры . . . . .                             | 94         |
| <b>Определение разреза и общие параметры</b>    | <b>94</b>  |
| <b>4.04 Пересечение поверхностей с разрезом</b> | <b>95</b>  |
| Параметры . . . . .                             | 95         |
| <b>4.05 Пересечение векторов с разрезом</b>     | <b>97</b>  |
| Параметры . . . . .                             | 97         |
| Имя и стиль исходного слоя . . . . .            | 98         |
| Обрезка по рельефу и линии низа . . . . .       | 99         |
| Атрибуты объектов на разрезе . . . . .          | 99         |
| <b>4.06 Пересечение TIN с разрезом</b>          | <b>100</b> |
| Параметры . . . . .                             | 100        |
| <b>4.07 Проекция объектов на разрез</b>         | <b>100</b> |
| <b>4.08 Спроецировать с разреза</b>             | <b>101</b> |
| <b>4.09 Развёртка стенки ствола (бета)</b>      | <b>101</b> |
| <b>4.10 Создать пример для разреза</b>          | <b>102</b> |
| Скважины с интервалами опробования . . . . .    | 102        |
| Слой демо и их атрибуты . . . . .               | 103        |
| Параметры . . . . .                             | 104        |
| <b>4.11 Образец справочника пластов</b>         | <b>104</b> |
| Что внутри . . . . .                            | 104        |
| Тело заполняет геолог . . . . .                 | 105        |
| Составные тела серые . . . . .                  | 105        |
| Тот же файл вне QGIS . . . . .                  | 105        |
| <b>5.01 Фрактальная размерность</b>             | <b>105</b> |
| Как читать карту . . . . .                      | 105        |
| Выбор окна и лагов . . . . .                    | 105        |
| Рабочий цикл . . . . .                          | 106        |
| Параметры . . . . .                             | 106        |
| <b>5.02 Box-counting маски</b>                  | <b>106</b> |
| Откуда берётся маска . . . . .                  | 107        |
| <b>5.03 Размерность линий и границ</b>          | <b>107</b> |
| Диагностика сглаживания изолиний . . . . .      | 107        |
| Другие применения . . . . .                     | 107        |
| <b>5.04 Размерность Минковского (векторы)</b>   | <b>107</b> |
| <b>5.05 Создать пример для фракталов (демо)</b> | <b>108</b> |
| <b>Типичные ситуации и решения</b>              | <b>109</b> |
| <b>Приложение. Isoliner за 15 минут</b>         | <b>109</b> |

|                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| Сценарий 1. У меня точки . . . . .                                         | 109        |
| Сценарий 2. Мне нужен рельеф . . . . .                                     | 110        |
| Сценарий 3. Мне нужен разрез . . . . .                                     | 111        |
| Куда идти дальше . . . . .                                                 | 111        |
| <b>Приложение. Поля демо-слоёв</b>                                         | <b>111</b> |
| Выходы группы «Топография» . . . . .                                       | 111        |
| Скважины (демо) - инструмент 1.10 . . . . .                                | 111        |
| Профили электроразведки - инструмент 1.11, режим электроразведки . . . . . | 112        |
| Профили оседаний - инструмент 1.11, режим оседаний . . . . .               | 112        |
| Данные для разреза - инструмент 4.10 . . . . .                             | 112        |
| Данные для фракталов - инструмент 5.05 . . . . .                           | 113        |
| Плотность (демо) - инструмент 3.08 . . . . .                               | 113        |
| <b>Приложение. Плотность переменной опоры: пошагово</b>                    | <b>113</b> |
| Шаг 1. Сгенерировать демо (3.08) . . . . .                                 | 113        |
| Шаг 2. Плотность по точкам (3.07) . . . . .                                | 114        |
| Шаг 3. Плотность по линиям . . . . .                                       | 114        |
| Шаг 4. Плотность по полигонам и дазиметрия . . . . .                       | 114        |
| Шаг 5. Смешать типы через дописывание . . . . .                            | 114        |
| Шаг 6. Эффективная сигма . . . . .                                         | 115        |
| Как читать итог . . . . .                                                  | 115        |
| <b>Предприятиям</b>                                                        | <b>115</b> |
| Журнал и панель инструментов . . . . .                                     | 115        |
| <b>Лицензия и поддержка</b>                                                | <b>115</b> |

## Введение

Isoliner - провайдер инструментов Processing для интерполяции точечных данных, построения изолиний и работы с рельефом. Ядро кригинга - алгоритм KB2D из GSLIB. Инструменты разнесены по пяти группам: «Грид и изолинии» - основной поток обработки от декластеризации до изолиний, «Топография» - рельеф из открытых данных и гидрологический анализ, «Дополнительные инструменты анализа» - специализированные расчёты от индикаторного кригинга до плотности переменной опоры, «Разрез» - построение геологических разрезов, «Фрактальный анализ» - размерности поверхностей, масок и линий.

«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.

«Вариограммная карта (анизотропия)» - поверхность  $\gamma(h_x, h_y)$  с оценкой азимута и анизотропии для учёта направленности в кригинге.

«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.

В группе «Дополнительные инструменты анализа» специализированные расчёты, например:

«Категориальный индикаторный кригинг» - карта вероятности классов по категориальному полю (минтип, литотип): на каждый класс строится индикатор и кригуется отдельно, на выходе растр вероятностей, карта зон и уверенность.

«Гидравлический градиент и направление потока» - по растру напора строит модуль гидравлического градиента, азимут направления потока (вниз по градиенту) и точечный слой векторов потока, который сразу оформляется стрелками. Гидрогеология без проницаемости.

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.

Выбор канала раstra во всех инструментах - выпадающими списками с именами каналов: у многоканального грида пласта в списках читаются «кровля», «подошва» и имена слоёв параметров.

Все инструменты провайдера, как они стоят в панели **Обработка**. Список собирается из кода при сборке руководства, поэтому он не расходится с плагином.

### 1. Грид и изолинии

- 1.01 Декластеризация (веса)
- 1.02 2D Kriging (точки → растр)
- 1.03 Минимальная кривизна (точки → растр)
- 1.04 Изолинии из раstra
- 1.05 Вариограмма (экспериментальная)
- 1.06 Вариограммная карта (анизотропия)
- 1.07 Кросс-валидация вариограммы
- 1.08 Кросс-валидация метода (LOO)
- 1.09 Профили обработки
- 1.10 Создать пример скважин (демо)
- 1.11 Создать пример геофизических профилей (демо)

### 2. Топография

- 2.01 Загрузка ЦМР по рамке
- 2.02 Загрузка топоосновы по рамке
- 2.03 Торо2Raster (рельеф из векторов)
- 2.04 Подготовка рельефа
- 2.05 Сток и аккумуляция (D8)
- 2.06 Речная сеть
- 2.07 Бассейны и водоразделы
- 2.08 Уклон и экспозиция
- 2.09 Вершины и ямы
- 2.10 Демо-рельеф
- 2.15 Отчёт по створу
- 2.16 Водосбор. Линии и контуры (канавы, карьеры)
- 2.18 Насыпи и выемки (объёмы работ)
- 2.19 Кандидаты бровок и подошв
- 2.20 Бровки и подошвы в работу
- 2.21 Создать пример карьера (демо)

### 2. Топография: диагностика и правка

- 2.11 Разделить горизонталы для проверки
- 2.12 Невязка горизонталей против ЦМР
- 2.13 Диагностика террасинга ЦМР
- 2.14 Убрать ступени (сглаживание с ограничением)

### **3. Дополнительные инструменты анализа**

- 3.01 Категориальный индикаторный кригинг
- 3.02 Кригинг с внешним дрейфом (External Drift)
- 3.03 Карта вероятности превышения
- 3.04 Гидравлический градиент и направление потока
- 3.05 Удельный расход (закон Дарси)
- 3.06 Гауссова симуляция (SGS)
- 3.07 Плотность по замерам (переменная опора)
- 3.08 Создать пример для плотности (демо)

### **4. Разрез**

- 4.01 Разрез по линии
- 4.02 Скважины на разрезе (модель бурения)
- 4.03 Состав пласта на разрезе
- 4.04 Пересечение поверхностей с разрезом
- 4.05 Пересечение векторов с разрезом
- 4.06 Пересечение TIN с разрезом
- 4.07 Проекция объектов на разрез
- 4.08 Спроецировать с разреза
- 4.09 Развёртка стенки ствола (бета)
- 4.10 Создать пример для разреза
- 4.11 Образец справочника пластов

### **5. Фрактальный анализ**

- 5.01 Фрактальная размерность
- 5.02 Box-counting маски
- 5.03 Размерность линий и границ
- 5.04 Размерность Минковского (векторы)
- 5.05 Создать пример для фракталов (демо)

*Всего инструментов: 55*

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

После установки инструменты появляются в панели «Обработка» (Processing), провайдер «Isoliner», группы «Грид и изолинии», «Топография», «Дополнительные инструменты анализа», «Разрез» и «Фрактальный анализ». 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. Руководство и сведения о версии доступны и без открытия инструмента: меню **Модули** содержит подменю **Isoliner** с пунктами **О плагине** (версия, ссылки, история изменений) и **Руководство (PDF)**.

## 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.

Инструменты собраны в три группы Processing. Группа «Грид и изолинии» это основной поток обработки, от кригинга до изолиний. Группа «Дополнительные инструменты анализа» это специализированные расчёты, категориальный индикаторный кригинг, кригинг с внешним дрейфом, гидравлический градиент с направлением потока, карта вероятности превышения и удельный расход по Дарси. Группа «Разрез» это построение геологических разрезов по линии и подготовка демо-данных для них.

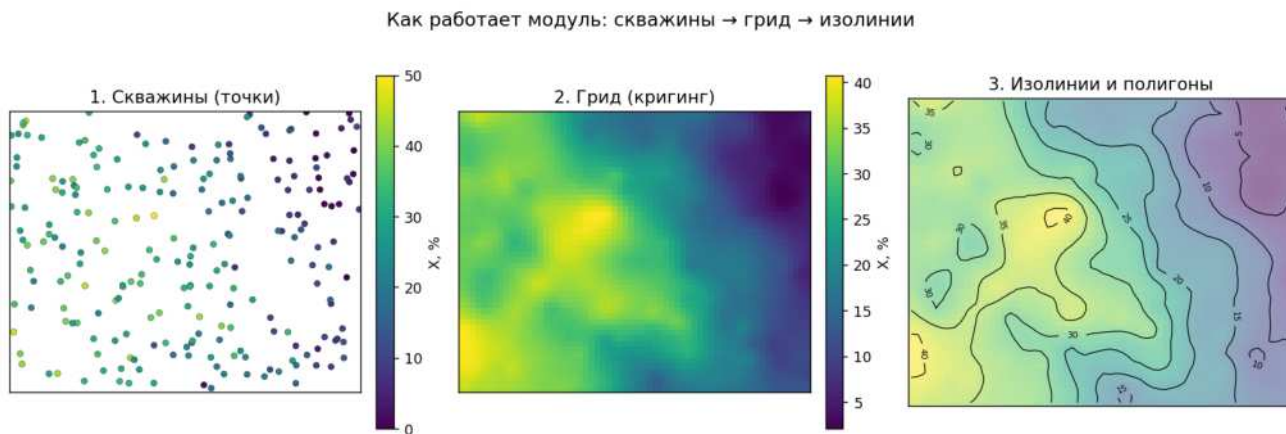


Рис. 1: Весь процесс на сгенерированном примере: скважины с измерениями (слева) превращаются в сплошной грид кригингом (в центре), по которому строятся изолинии и контурные полигоны (справа).

### 1.01 Декластеризация (веса)

Инструмент готовит данные перед интерполяцией. Когда пробы сгущены неравномерно, одни блоки разбурены плотнее других, наивная глобальная статистика смещается в сторону переразведанных участков. Если гуще бурили богатые зоны, среднее и гистограмма завышены, а это прямо влияет на подсчёт запасов. Ячеистая декластеризация (порт GSLIB **declus**) даёт каждой пробе вес, обратный локальной плотности: в скоплении меньше, на отшибе больше. По взвешенным данным считается представительное декластеризованное среднее.

На поле накладывается сетка ячеек, вес пробы пропорционален единице, делённой на число проб в её ячейке, затем веса нормируются. Размер ячейки подбирается автоматически: свип по размерам, выбор по минимуму декластеризованного среднего (когда скопления пришлись на богатые зоны) либо по максимуму. Можно задать размер вручную. На регулярной сети декластеризация ничего не меняет, все веса равны.

| Параметр                         | Назначение                            | По умолчанию |
|----------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| Точки со значениями              | Пробы.                                | -            |
| Поле значения (Z)                | Числовое поле.                        | -            |
| Размер ячейки                    | Авто (свип) или ручной.               | Авто         |
| Размер ячейки для ручного режима | Сторона ячейки в ручном режиме.       | 0            |
| Цель свипа (Доп.)                | Минимум или максимум среднего.        | Минимум      |
| Число размеров в свипе (Доп.)    | Сколько ячеек перебрать.              | 24           |
| Соотношение ячейки Y/X (Доп.)    | Анизотропия ячейки.                   | 1            |
| Смещений начала сетки (Доп.)     | Усреднение по сдвигам сетки.          | 4            |
| Точки с весами                   | Слой точек с полем <b>wt</b> .        | -            |
| HTML-отчёт                       | Сводка, гистограмма, кривая среднего. | по умолчанию |

Выходы: слой точек с полем **wt** и HTML-отчёт со сводкой (наивное против декластеризованного среднего), гистограммой сырой против взвешенной и кривой среднего от размера ячейки. Декластеризованное среднее из журнала и отчёта ставится в **1.02** в поле **Среднее для простого кригинга**, а поле **wt** подаётся в **3.06 Гауссова симуляция** для взвешенного нормально-балльного преобразования. Ураганные пробы отсекаются отдельно, персентильным капанием в самих инструментах кригинга и кросс-валидации.

## 1.02 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).

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 |
| Преобразование значения   | ln для лог-нормальных величин (K, T, содержания с длинным хвостом): кригуется ln(Z), оценка возвращается через exp. | нет                          |

| Параметр                    | Что задаёт                                                                                                                         | По умолчанию / совет        |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Тип кригинга                | Ординарный (ОК) - локально оценивает среднее сам. Простой (SK) - использует заданное «Среднее».                                    | ОК                          |
| Радиус поиска               | Радиус окна поиска соседних точек вокруг узла. 0 = вся выборка.                                                                    | 0 (вся выборка)             |
| Мин. количество точек       | Если в окне меньше точек - узел остаётся пустым (nodata).                                                                          | 1                           |
| Макс. количество точек      | Сколько ближайших точек включается в систему кригинга.                                                                             | 24                          |
| Размер ячейки               | Шаг грида. 0 = авто = $\min(\text{охват})/50$ .                                                                                    | мельче = плавнее, но дольше |
| Охват раstra                | 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.                                                        | -                           |
| Загрузить профиль обработки | Подставляет сохранённый профиль (наггет, структура вариограммы, отсев) поверх полей диалога. Список обновляется при открытии окна. | (не выбран)                 |

## 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

### Кригинг: оценка в узле - взвешенное среднее соседей

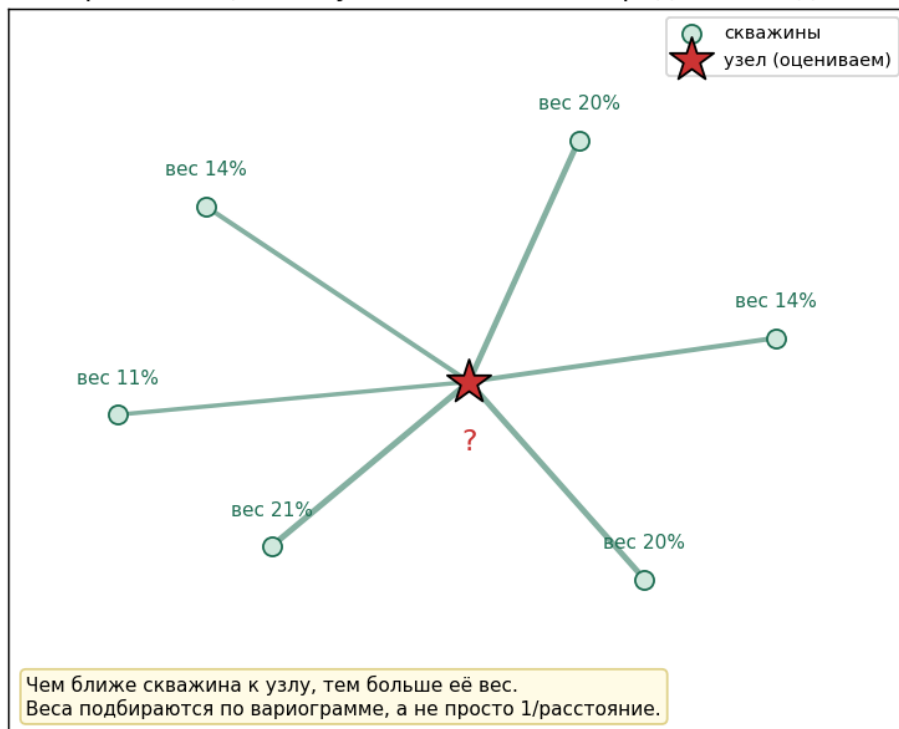


Рис. 2: Кригинг оценивает значение в узле как взвешенное среднее ближайших скважин: чем ближе скважина, тем больше её вес. Веса подбираются по вариограмме.

### Радиус поиска и число соседних точек

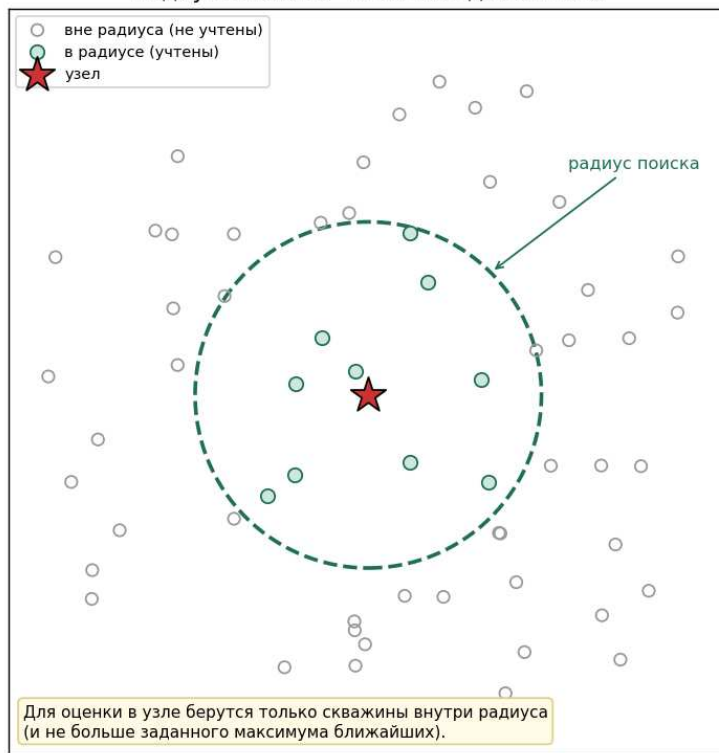


Рис. 3: Для каждого узла берутся только скважины внутри радиуса поиска и не более заданного числа ближайших. Точки за радиусом не участвуют.

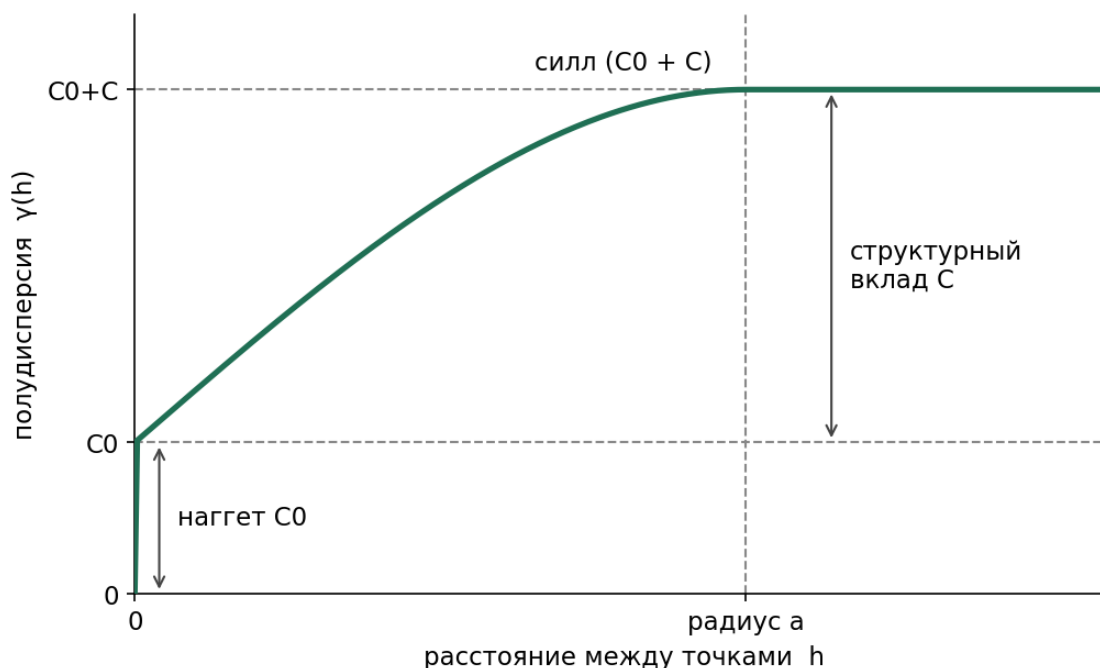


Рис. 4: Схема вариограммы: наггет  $C_0$ , структурный вклад  $C$ , силл  $(C_0+C)$  и радиус корреляции  $a$ .

каждой соседней скважине назначается вес. Модель задаётся в разделе «Дополнительные параметры».

Модель вариограммы: наггет  $C_0$ , силл  $(C_0 + C)$  и радиус корреляции  $a$ .

### Наггет $C_0$

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.

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.

$C_0 = \text{весь силл}$  (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  $(C_0 + \text{вклады структур } C)$  **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  $0.2-0.4 \times$

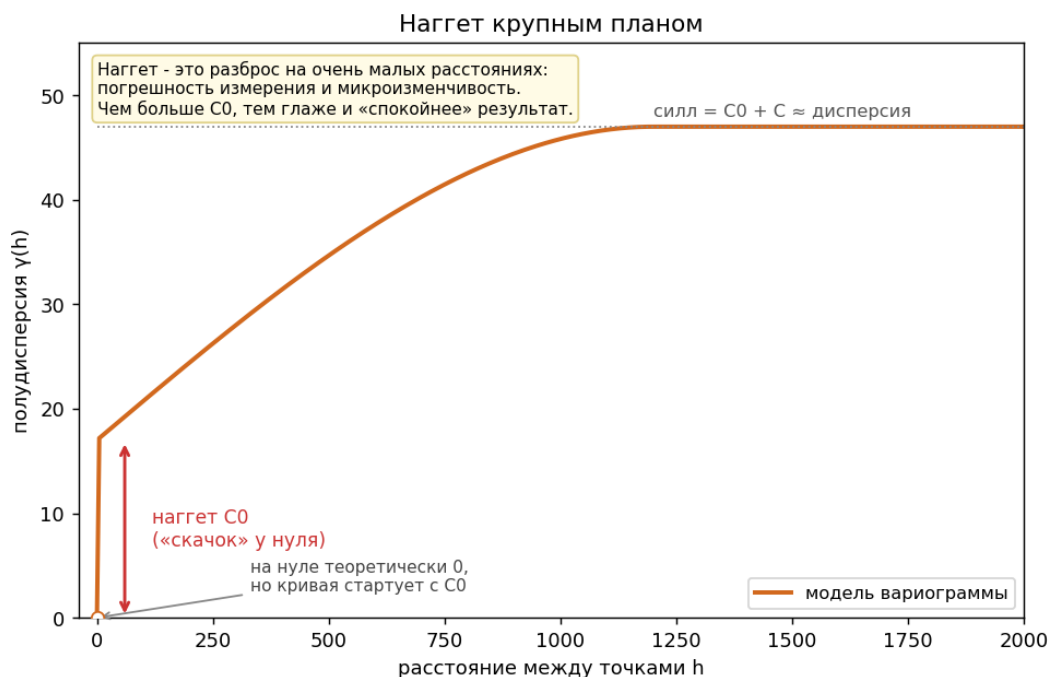


Рис. 5: Наггет крупным планом: модель стартует у нуля не с 0, а со «скачка»  $C_0$ . Это разброс на сверхмалых расстояниях (погрешность измерения, микроизменчивость). Полка  $C_0 + C \approx$  дисперсии данных.

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 вклада структуры  $C$ . Структура задаётся моделью (сферическая, экспоненциальная, гауссова или степенная), порогом  $C$ , радиусом  $a$ , азимутом и анизотропией.

**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  $\approx 47.6\%$ , то есть  $\sigma \approx 6.9\%$ . Значит, суммарный силл задаём  $\approx 47.6$ . Если наггет  $C_0 \approx 17$  (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  $C_0 : C$ . 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.

**Выбор модели.** Сферическая и экспоненциальная подходят для большинства задач. Степенная модель не имеет силла и радиуса в обычном смысле: её применяют, когда изменчивость растёт с расстоянием и не выходит на полку (нестационарность приращений), поля порога и радиуса для неё условны. Гауссову модель применяйте осторожно: при нулевом или очень малом наггете она даёт численно неустойчивую систему и артефакты (осцилляции, отрицательные веса). Поэтому при выборе гауссовой модели инструмент принудительно удерживает небольшой минимальный наггет. По возможности задавайте его и сами.

**Тип данных и режим.** Под разные данные нужны разные настройки. Гладкие структурные поверхности (отметки кровли и подошвы, мощности) лучше моделировать длинным радиусом

или степенной моделью при широком (глобальном, 0) радиусе поиска - тогда поверхность получается гладкой. Короткий радиус с локальным поиском на таких данных даёт «бычьи глаза» и разрывы оценки при смене состава соседних скважин. Для концентраций и химии (ФМС, газоопасность) кригинг работает в своём праве: здесь важны корректный наггет и, при сильной асимметрии распределения, преобразование данных (см. ниже про ураганные пробы).

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.

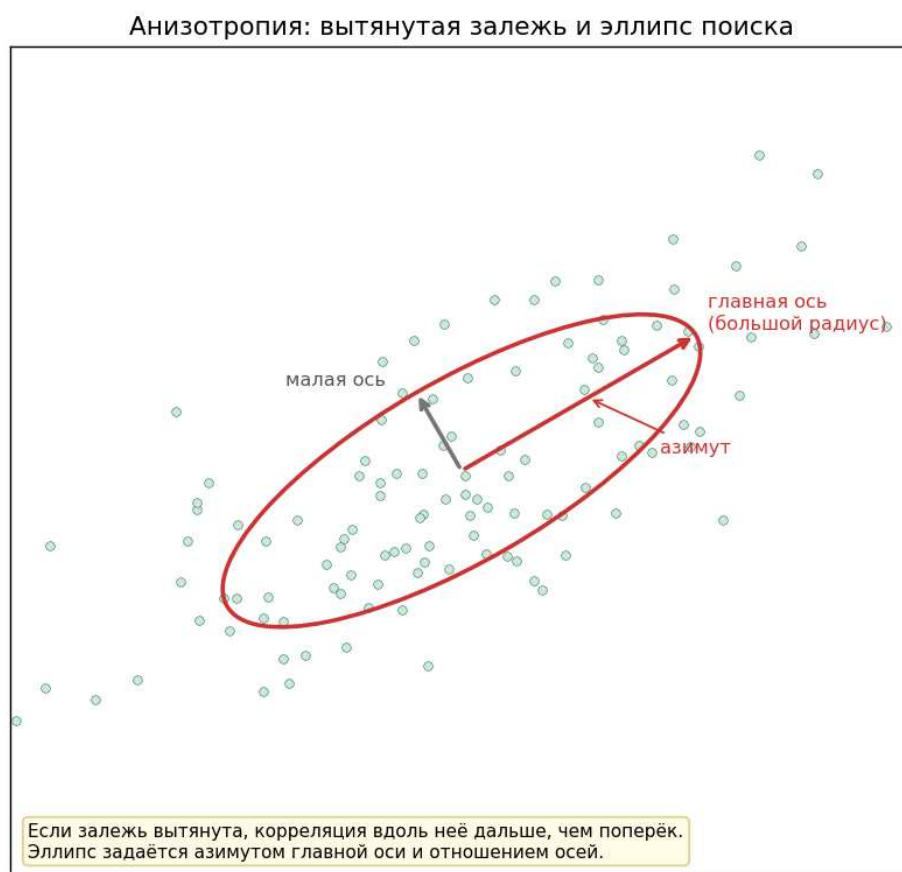


Рис. 6: Анизотропия: если залежь вытянута, корреляция вдоль неё дальше, чем поперёк. Эллипс поиска задаётся азимутом главной оси и отношением осей (малая/главная).

| Параметр                      | Что задаёт                                                                                  | По умолчанию / совет                |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Среднее для простого кригинга | Используется только при типе SK.                                                            | 0                                   |
| Наггет C0                     | «Шум»/скачок вариограммы у нуля. Подавляет локальные пики. В абсолютных единицах дисперсии. | 0. Для сглаживания 0.2-0.4 от силла |

| Параметр                                  | Что задаёт                                                                                                               | По умолчанию / совет                         |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Структура i · модель                      | Форма вариограммы:<br>сферическая,<br>экспоненциальная, гауссова,<br>степенная.                                          | сферическая                                  |
| Структура i · порог/вклад C               | Вклад структуры в силл (абс. единицы дисперсии). Сумма $C_0 + C \approx$ дисперсии данных. Для структур 2 и 3: 0 = выкл. | стр. 1 = 1 (замените на $\approx$ дисперсию) |
| Структура i · радиус корреляции a         | Дистанция выхода на полку. 0 = авто = $\max(\text{охват})/3$ .                                                           | 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  $C_0$ , 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».

Отсев и срезка - грубый практичный инструмент против явных ошибок. Для концентраций и химии будьте осторожны: экстремальные значения часто не шум, а сигнал (например, очаги загрязнения), и слепо обрезать хвосты распределения не стоит. Для сильно асимметричных данных корректнее не обрезать пробы, а преобразовать их к близкому к нормальному виду (логарифм, Вох-Сох) или применять индикаторный кригинг - это уже за рамками отсева, но именно так обходятся с тяжёлыми хвостами в геостатистике руд и загрязнений.

**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 абсолюту.** «Нижняя граница» и «Верхняя граница» задают пороги в единицах Z напрямую. Пустое поле - граница не задана. Они приоритетнее перцентиля. 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 значение p, и границы берутся симметрично: от p-го до (100-p)-го перцентиля. То есть  $p =$

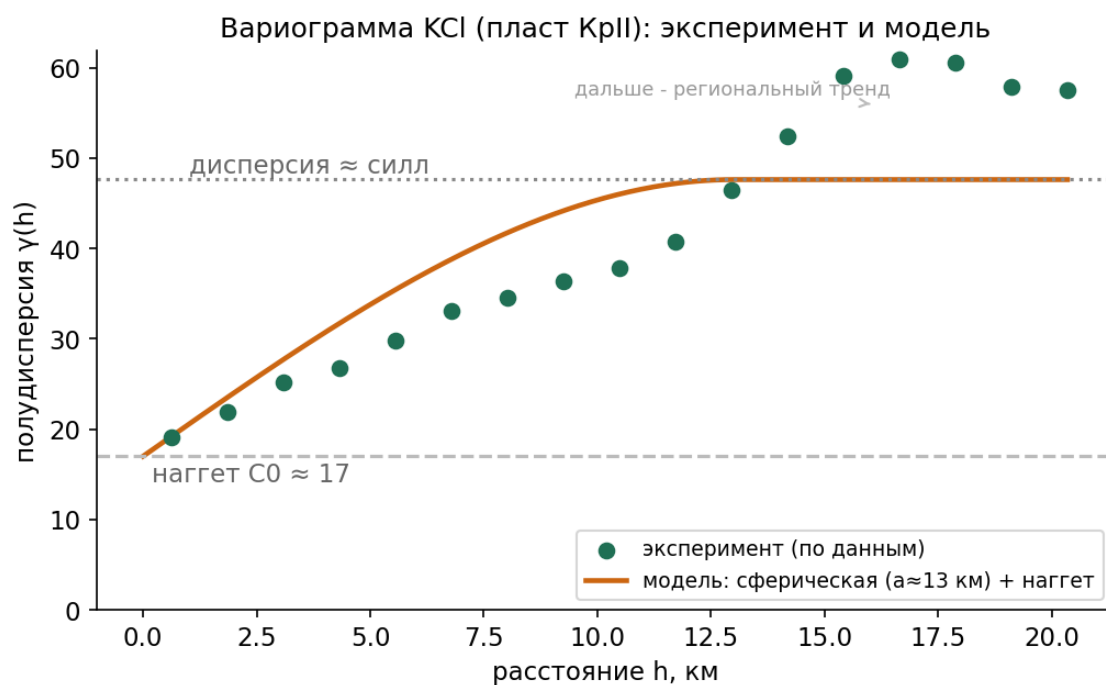


Рис. 7: Экспериментальная вариограмма KCl по пласту КрII и подобранная модель: наггет  $C_0 \approx 17$ , силл совпал с дисперсией данных, радиус  $\approx 13$  км. Точки дальше силла - региональный тренд.

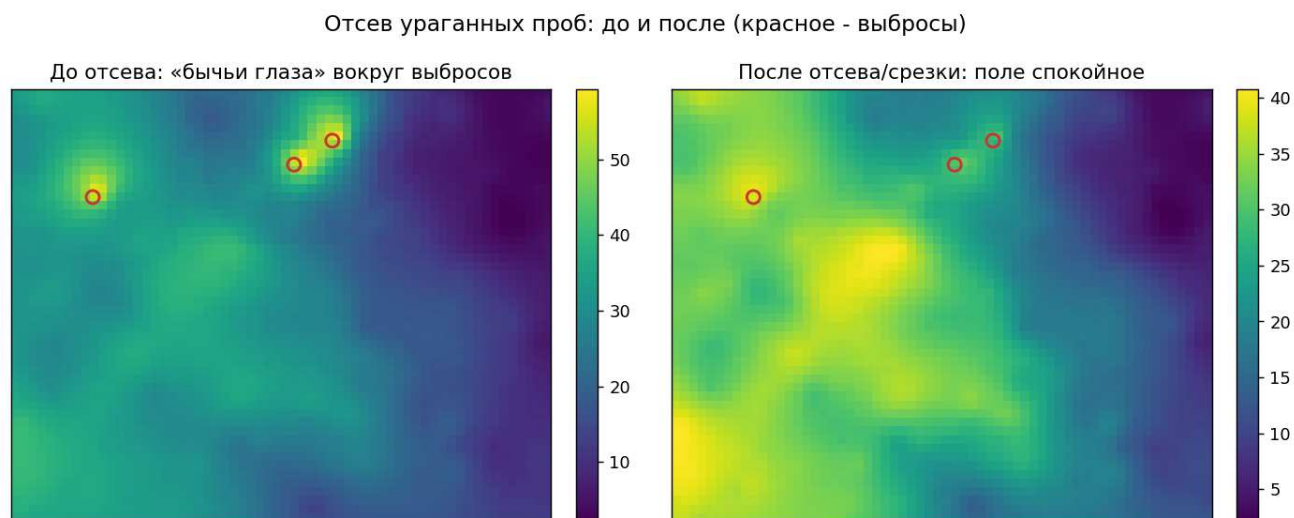


Рис. 8: Отсев ураганных проб на примере: слева три выброса дают «бычьи глаза» (горячие пятна), справа после срезки к верхней границе поле спокойное.

2 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.  $P = 0$  исключает 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

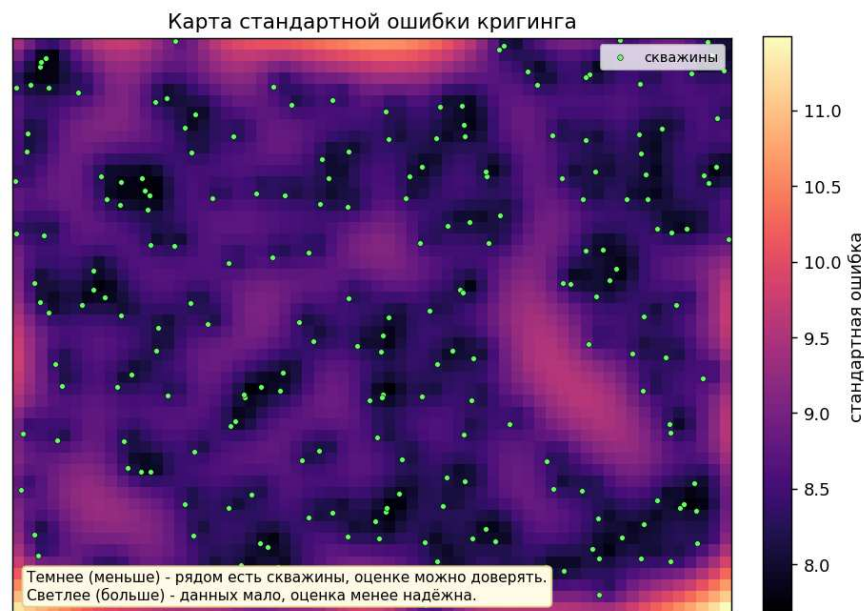


Рис. 9: Карта стандартной ошибки: тёмное у скважин (зелёные точки) - оценке можно доверять, светлое в пустых углах - данных мало.

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.

## Снятие тренда (регрессия-кригинг)

Обычный кригинг оценивает среднее локально, по окну поиска, поэтому плавно меняющееся по площади среднее он отслеживает сам. Сложность возникает, когда у поля есть выраженная региональная составляющая, например общее падение пласта на участке. Тогда экспериментальная вариограмма сырого значения раздувается: радиус завышен, порога нет, форма напоминает степенную модель, и подобрать устойчивую модель трудно.

Флажок **Снять полиномиальный тренд** убирает региональную составляющую методом наименьших квадратов перед кригингом. Дальше кригуются остатки, а тренд добавляется к оценке обратно. Вариограмма остатков возвращается к нормальному виду: выходит на порог с наггетом, и радиус отражает истинный масштаб корреляции, а не размах тренда. Поле **Степень тренда** задаёт плоскость или квадратичную поверхность.

Список **Преобразование значения** добавляет логарифмирование для величин с разбросом на порядки, таких как коэффициент фильтрации или водопроницаемость. При выборе **ln** кригуется натуральный логарифм значения, а оценка возвращается обратно через экспоненту. Это медианная, геометрическая оценка, корректная для лог-нормальных полей. Стандартная ошибка пересчитывается в исходные единицы. Логарифм избавляет от ручного создания поля **ln** в калькуляторе и применяется только к положительным значениям. Вариограмму и наггет при включённом логарифме задавайте в единицах **ln**.

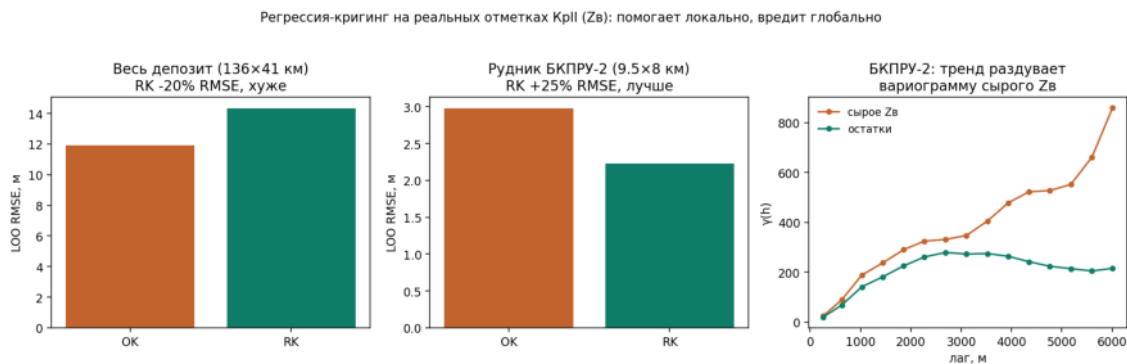


Рис. 10: Снятие тренда на реальных данных: поверхность пласта с выраженным региональным падением. Тренд снят полиномом, кригованы остатки, тренд возвращён к оценке.

Снятие тренда помогает там, где падение однородно, в пределах одного рудника или локального участка. На всю площадь месторождения сразу его применять не стоит. Соседние блоки разнесены по высоте, единый полином описывает их плохо, а локальный кригинг и без того держит меняющееся среднее, поэтому снятие глобального тренда там скорее вредит. Уместность видна по вариограмме. Если у сырого значения радиус сопоставим с размером участка и нет внятного порога, тренд есть и его стоит снять. Если вариограмма сырого значения уже выходит на порог с малым наггетом, снимать нечего.

Степени 1 обычно достаточно. Степень 2 описывает изгиб, но может вобрать в тренд часть реальной структуры, поэтому после её применения посмотрите на вариограмму остатков. Если порог и наггет стали выражены хуже, вернитесь к степени 1. Тот же флажок есть в инструменте **Кросс-валидация вариограммы**, там тренд переподбирается на каждом шаге контроля, и выигрыш или проигрыш от снятия тренда виден прямо по RMSE.

Вариограмму после снятия тренда задавайте по остаткам. Растр стандартной ошибки в этом режиме это ошибка кригинга остатков, тренд считается детерминированным и собственной погрешности к ней не добавляет.

## Блочный кригинг

Обычный кригинг оценивает значение в точке, в центре ячейки грида. Но в горном деле чаще нужна не точечная отметка, а среднее по площади, по блоку отработки, панели или ячейке подсчёта запасов. Содержание полезного компонента в блоке это среднее по его площади, и оценивать его как значение в одной точке не вполне корректно. Для этого служит флажок **Блочный кригинг**.

Включённый режим оценивает среднее по ячейке грида, а не значение в её центре. Ячейка мысленно разбивается на сетку точек размером  $N \times N$ , количество задаёт поле **Дискретизация блока,  $N \times N$  на ячейку**, и ковариации в системе кригинга усредняются по этим точкам. Так система решается не для одной точки, а сразу для всего блока. Это классическая схема блочного кригинга GSLIB.

У блочной оценки два следствия, оба полезные для подсчёта запасов. Поверхность получается глаже точечной, потому что усреднение по блоку гасит мелкие колебания. И стандартная ошибка кригинга выходит ниже точечной, потому что среднее по площади оценивается надёжнее, чем значение в одной точке. Расплата одна. Блочный кригинг не воспроизводит пробы в узлах точно. Среднее по блоку, даже центрированному на скважине, не равно значению в самой скважине, и это закономерно.

Дискретизации  $4 \times 4$  хватает почти всегда. Больше  $N$  считается дольше, а точность растёт незначительно. При  $N$  равном единице блочный кригинг вырождается в точечный, поэтому минимальное значение поля равно двум, а сам режим по умолчанию выключен.

Блочный кригинг сочетается со снятием тренда. Кригуются остатки по блоку, а тренд добавляется к оценке обратно. Сочетается он и со сглаживанием грида, но обычно одного блочного усреднения достаточно и дополнительное сглаживание не нужно.

## 1.03 Минимальная кривизна (точки → растр)

Инструмент строит грид методом минимальной кривизны. Поверхность ведёт себя как тонкая упругая пластина, проходящая через данные с минимумом изгиба, то есть решение бигармонического уравнения. Метод неточный: данные воспроизводятся приближённо, зато поверхность получается максимально гладкой, поэтому его традиционно берут для карт геофизических полей и любых плавных величин. Это детерминированная альтернатива кригингу без подбора вариограммы. Кригинг, в отличие от него, даёт оценку с картой стандартной ошибки.

**Натяжение** подмешивает мембранный член: при 0 это чистая минимальная кривизна, при 1 - натянутая мембрана, у которой меньше выбросов между пробами. Натяжение на границе задаётся отдельно и помогает убрать краевые перелёты. Решение итеративное, методом верхней релаксации (SOR) с обходом сетки девятью цветами: узлы одного цвета не попадают в расчётный шаблон друг друга, поэтому обновляются разом и устойчиво. Сетка пересчитывается, пока наибольшее изменение узла не станет меньше **порога невязки** или не исчерпается число итераций.

Свободные узлы стартуют с ближайшего значения данных, поэтому на плотных данных сходимость быстрая. На очень разрежённых данных итераций нужно больше: увеличьте их лимит или порог невязки. Faults и breaklines (разрывы и структурные линии) в этой версии не поддерживаются, это задел на будущее.

| Параметр                      | Назначение                              | По умолчанию |
|-------------------------------|-----------------------------------------|--------------|
| Точечный слой                 | Пробы со значением.                     | -            |
| Поле значения (Z)             | Числовое поле для интерполяции.         | -            |
| Охват                         | Прямоугольник результата.               | по слою      |
| Размер ячейки                 | 0 - авто, min(охват)/50.                | 0            |
| Натяжение                     | 0 - минимальная кривизна, 1 - мембрана. | 0            |
| Порог невязки                 | 0 - авто, 0.01 процента размаха данных. | 0            |
| Максимум итераций             | Потолок числа проходов SOR.             | 100000       |
| Натяжение на границе (Доп.)   | Натяжение на краю сетки.                | 0            |
| Коэффициент релаксации (Доп.) | Ускорение SOR, разумно 1.5 - 1.9.       | 1.85         |
| Анизотропия (Доп.)            | Отношение осей Y/X в мембранном члене.  | 1            |
| Грид (минимальная кривизна)   | Выходной растр.                         | -            |

Выход - обычный грид, готовый для **1.04 Изолинии из растра**. В журнал выводятся размер сетки, число узлов-данных, число итераций и итоговая невязка. Если достигнут потолок итераций, а невязка выше порога, инструмент об этом предупреждает.

## 1.04 Изолинии из растра

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

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

| Параметр                              | Что задаёт                                                                                                                                                                                                                         | По умолчанию / совет                |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Бикубическое сглаживание              | Сгущение грида ( $\times 2 \dots \times 4$ ) бикубической интерполяцией перед контурингом - основной способ сглаживания изолиний, убирает «октагоны» от грубой сетки. Работает и для линий, и для полигонов. выкл. = без сгущения. | выкл. ( $\times 4$ на грубом гриде) |
| Скругление линий (Chaikin), итераций  | Дополнительное лёгкое скругление линий (Chaikin). Слабее бикубического сглаживания, обычно не нужно, если оно включено. 0 = выкл.                                                                                                  | 2                                   |
| Записать значение в Z геометрии       | Уровень пишется в Z вершин линии. Нужен для экспорта в DXF: АвтоКАД и Кредо иначе кладут горизонталь на нулевую отметку.                                                                                                           | выкл.                               |
| Сторона бергштрихов и подписей (доп.) | Сторона склона для штрихов депрессионного стиля и направление топографических подписей разом.                                                                                                                                      | автоматически                       |
| 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:

| Слой               | Поле     | Тип   | Что содержит                                                          |
|--------------------|----------|-------|-----------------------------------------------------------------------|
| Изолинии           | ELEV     | число | Значение уровня линии (имя задаётся полем <b>Имя поля значения</b> ). |
| Изолинии           | is_index | целое | 1 у главных изолиний (каждая N-я), иначе 0 - для утолщения.           |
| Контурные полигоны | ELEV_MIN | число | Нижний уровень пояса.                                                 |
| Контурные полигоны | ELEV_MAX | число | Верхний уровень пояса.                                                |

## Сглаживание изолиний

Основной способ сгладить изолинии в этом инструменте - **бикубическое сглаживание**: грид перед контурингом сгущается бикубической интерполяцией ( $\times 2 \dots \times 4$ ), и контуры

строятся по более мелкой сетке. На грубом гриде изолинии иначе выглядят «октагонами» (вершины ставятся по краям ячеек) - сгущение убирает эту угловатость топологически чисто. Реализовано в чистом NumPy, без внешних зависимостей. Nodata-границы и внутренние «окна» данных сохраняются. Сгущение действует и на линии, и на контурные полигоны - границы поясов при этом совпадают с изолиниями. Цена - больше ячеек ( $\times 4 =$  в 16 раз больше), поэтому на очень крупном гриде начните с  $\times 2$ .

Дополнительно есть лёгкое скругление линий алгоритмом **Chaikin** (количество итераций). Оно слабее бикубического и обычно не требуется, если сгущение включено. Имеет смысл как быстрая альтернатива на грубом гриде, когда сгущать не хочется.

Сглаживание самого поля (гауссово, по растру) - это отдельная операция, она выполняется не здесь, а в инструменте «2D Kriging»: там оно идёт по гриду до контуринга и убирает не угловатость, а бугристость поля («бычьи глаза» вокруг скважин). Бикубическое сглаживание и гауссово сглаживание поля дополняют друг друга: первое лечит угловатость сетки, второе - бугристость данных. Контурный растр кригинга при этом не меняется - сглаживается лишь временная копия.

## Контурные полигоны (пояса)

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

## Значение в Z геометрии

Флажок **Записать значение в Z геометрии** поднимает вершины каждой линии на её собственную отметку. Изолиния это линия равного уровня, поэтому Z у всех её вершин один и равен значению поля.

Нужно это для передачи горизонталей в АвтоКАД и Кредо. Стандартный экспорт QGIS (**Проект → Импорт/экспорт → Экспорт проекта в DXF**) сохраняет отметки Z вершин, надо только снять галочку **Принудительно 2D**. Без Z в геометрии обе программы кладут все горизонталы на нулевую отметку, и высоту приходится задавать вручную по каждой линии.

Многочастность слоя сохраняется: изолиния одного уровня остаётся одним объектом со всеми своими ветвями, число объектов не меняется, подписи не размножаются.

## Топографические подписи

На топографической карте верх цифры на горизонтали всегда направлен вверх по склону. Читая карту, по одной подписи понимаешь, где выше, не сверяясь с соседними горизонталями.

QGIS отсчитывает верх подписи от направления линии, поэтому добиться этого поворотом текста нельзя, а нужно задать линиям одно направление относительно склона. Это и делает флажок **Топографические подписи**. В слое остаётся поле **up\_side**: 1 означает, что линия оставлена как была, 0 что развёрнута.

Автоматический выбор стороны иногда ошибается, и тогда его переключают руками параметром **Сторона бергштрихов и подписей**. Переключатель действует на обе части картины разом: и на сторону штрихов, и на направление подписей. Применяется он ровно один раз - разворот линии сам меняет местами лево и право, а значит и знак стороны склона, поэтому повторный переворот вернул бы штрихи на прежнее место.

### **Без разрешения перевёрнутых подписей это не работает**

В настройках подписей есть опция показа перевёрнутых подписей, и по умолчанию она запрещает их. При таком запрете QGIS сам доворачивает текст, чтобы он читался слева направо, и направление линии перестаёт на что-либо влиять.

Топографическая подпись по определению бывает перевёрнутой: на склоне, обращённом на юг, цифра читается вверх ногами. Поэтому показ перевёрнутых надо разрешать, а не бороться с ним.

В стилях **Структура / гипсометрия** и **Депрессия (штрихи вниз)** это уже настроено. Если подписываете своим стилем, включите показ перевёрнутых подписей в разделе отрисовки, иначе флажок не даст ничего.

### **Подпись ставится на линию**

В обоих стилях подпись размещается на самой горизонтали, а не над ней, и разрывает её. Это привычный топографический приём: цифра читается вместе с линией, а не рядом с ней.

### **Предупреждение о плоских уровнях**

Инструмент сам проверяет, не попал ли какой-то уровень сечения в площадку с околонулевым уклоном, и если попал, пишет об этом в журнал: уровень, число задетых ячеек и долю данных. Ничего при этом не блокируется, изолинии строятся как обычно.

Зачем это нужно. На площадке, где поверхность меняется на миллиметры, положение изолинии определяется не рельефом, а шумом матрицы. Линия там начинает вилять, рассыпается на множество мелких колец и выглядит как одна утолщённая. Классический источник такой площадки - водная гладь: на матрице, полученной по стереопаре, она стоит на одной отметке с точностью до сантиметров и может занимать половину площади.

Отличить эту болезнь от нормальной работы алгоритма на глаз трудно, потому что алгоритм отработал верно, а виноваты данные. Поэтому проверка и вынесена в журнал числами.

Практическое решение обычно простое: замаскировать водную гладь до построения либо сместить уровни. Урез воды это отдельный объект карты, а не горизонталь, и рисовать его горизонталью не следует.

Проверка идёт за один проход по массиву и на растрах крупнее шестидесяти миллионов ячеек пропускается, чтобы не тратить время. Любая ошибка внутри неё гасится, построение из-за диагностики не срывается.

### **Уверенность горизонталей**

Продолжение той же мысли, но уже с возможностью что-то сделать. Параметр **Уверенность горизонталей** имеет три положения.

**Не считать** - поведение по умолчанию, ничего не меняется.

**Только поля `drop_min` и `drop_mean`** - линии остаются целыми, но каждая получает два поля: наименьший и средний перепад высот на ячейку вдоль неё. Решение остаётся за вами: подозрительные участки видны выражением вида `drop_min < 0.005`, и вы сами решаете, прятать их или показывать.

**Поля и разрыв на подозрительных участках** - линия дополнительно рвётся там, где перепад ниже порога, и куски помечаются полем **`lowconf`**. Ничего не удаляется, спрятать помеченное можно фильтром слоя.

### **Почему порог задаётся долей сечения**

Мерится не уклон, а перепад высот на ячейку. Это величина той же размерности, что и сечение рельефа, поэтому её можно прямо сравнивать с ним, и один порог одинаково работает на разных данных.

Пример. При сечении 0.5 м и пороге в сотую долю граница проходит по 5 мм на ячейку. Пологий склон даёт на ячейке сантиметры и порог проходит, водная гладь даёт миллиметры и не проходит. Задавать порог абсолютным уклоном пришлось бы заново под каждый участок.

Порог настраивается в дополнительных параметрах, **Порог перепада на ячейку, доля сечения**, по умолчанию 0.01.

### **Почему рвутся только серии**

Одна подозрительная вершина линию не рвёт, и две тоже. Разрыв происходит только там, где подряд идут три и более слабых вершины. Иначе одна случайная шумная ячейка крошила бы горизонталь на нормальном склоне, и карта бы поредела без причины.

Число три зашито и параметром не выносится: подбирать его пользователю не за что, а лишний параметр в диалоге стоит дороже, чем кажется.

Куски делят граничную вершину, поэтому в геометрии не возникает разрыва: соседние части стыкуются точка в точку.

### **Порядок в конвейере и сводка**

Разметка идёт после построения изолиний и до фильтра коротких линий. Иначе обрывки, оставшиеся от разрезания, попали бы в статистику длин и часть линий отсеялась бы дважды по разным причинам.

В журнал уходит сводка: сколько линий пришло, сколько кусков получилось, сколько из них ниже шума и какая доля общей длины оказалась слабой.

### **Чего инструмент не делает**

Он не сглаживает плоские участки, чтобы линия перестала вилять. Это была бы подделка данных: на выходе получилась бы ровная и неверная горизонталь вместо рваной, но соответствующей тому, что есть в матрице. Решение о том, показывать ли слабый участок, остаётся за человеком.

## **1.05 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 количество 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 статистически связаны значения параметра в двух точках в зависимости от расстояния между ними. Для пары точек, разнесённых на расстояние  $h$ , берётся половина квадрата разности их значений (полудисперсия приращения). Эти величины усредняются по интервалам расстояния (лагам), и получается кривая  $\gamma(h)$ . Это мера не «средней разницы» значений, а статистической надёжности предсказания значения по соседу: чем меньше  $\gamma$ , тем теснее связь.

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 ( $a$ ) это расстояние, на котором кривая выходит на порог - то есть на котором пространственная корреляция спадает практически до нуля. Дальше этого расстояния точки статистически не связаны. Для экспоненциальной и гауссовой моделей порог достигается асимптотически, поэтому радиус для них - эффективный.

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

| Параметр                          | Что задаёт                                                     | По умолчанию / совет |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------|
| Точки со значениями               | Входной точечный слой.                                         | -                    |
| Поле значения Z                   | Атрибут, по которому строится вариограмма.                     | -                    |
| Поле группировки (доп.)           | Раздельные вариограммы по категориям (например, вид разведки). | -                    |
| Поле весов декластеризации (доп.) | Веса из 1.01 для взвешенной оценки.                            | -                    |
| Количество лагов                  | Число интервалов расстояний.                                   | -                    |
| Максимальное расстояние           | Верхняя граница расстояний. 0 = половина диагонали охвата.     | 0                    |
| Подобрать модель                  | Автоподбор модели по экспериментальным точкам (рекомендуется). | вкл.                 |

| Параметр                                   | Что задаёт                                                                         | По умолчанию / совет |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Модель для подбора (доп.)                  | Тип модели: сферическая, экспоненциальная, гауссова, степенная.                    | -                    |
| Устойчивая оценка (доп.)                   | Оценка Кресси-Хокинса, менее чувствительна к выбросам.                             | выкл.                |
| Ураганные пробы: перцентиль обрезки (доп.) | Отсев экстремальных значений по перцентиле. 0 = выкл.                              | 0                    |
| Срезать к границе вместо удаления (доп.)   | Capping: экстремум срезается к порогу, а не удаляется.                             | выкл.                |
| Сохранить профиль под именем               | Имя профиля «вариограмма + отсев» для подстановки в кригинг. Пусто = не сохранять. | -                    |
| Таблица вариограммы                        | Выход: лаг, значение $\gamma$ , количество пар.                                    | -                    |
| Отчёт (HTML)                               | Выход: график облака пар и модели.                                                 | -                    |

| Параметр                        | Что задаёт                                                                                                 | По умолчанию / совет         |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Точки со значениями             | Точечный слой со скважинами или пробами.                                                                   | -                            |
| Поле значения Z                 | Числовой атрибут для анализа: отметка пласта, мощность, содержание.                                        | запоминается между запусками |
| Поле группировки (необяз.)      | Строит отдельную кривую для каждого значения поля (напр. вид разведки) и накладывает их на один график.    | выкл.                        |
| Количество лагов                | На сколько интервалов расстояния разбивается облако пар.                                                   | 15                           |
| Максимальное расстояние         | Дальний край вариограммы, в единицах слоя (для метровых координат - метры). 0 = половина диагонали охвата. | 0                            |
| Подобрать модель (рекомендация) | Автоподбор наггета, порога, радиуса и типа модели, результат запоминается для подстановки в «2D Kriging».  | вкл.                         |

| Параметр                                    | Что задаёт                                                                                                             | По умолчанию / совет |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Модель для подбора (доп.)                   | Зафиксировать тип модели или оставить автовыбор лучшей по $R^2$ .                                                      | Авто                 |
| Минимум точек в группе, % (доп.)            | Группы мельче порога не строятся и перечисляются в журнале. Пол - 30 точек.                                            | 2                    |
| Устойчивая оценка (Кресси-Хокинса) (доп.)   | Снижает влияние редких аномальных пар.                                                                                 | выкл.                |
| Показать облако пар (доп.)                  | Добавляет на график исходные пары до усреднения.                                                                       | выкл.                |
| Наложить заданную модель вариограммы (доп.) | Рисует поверх облака модель с заданными вручную наггетом, порогом и радиусом - удобно сравнить свою модель с данными.  | выкл.                |
| Ураганные пробы (доп.)                      | Перцентиль обрезки, нижняя и верхняя границы значения, режим срезания к границе вместо удаления. В самом конце списка. | выкл.                |
| Сохранить профиль под именем                | Если заполнить - подобранная (изотропная) модель и текущий отсев сохраняются как профиль обработки под этим именем.    | пусто                |
| Таблица вариограммы                         | Выходной слой-таблица с точками вариограммы (столбцы ниже).                                                            | временный слой       |
| Отчёт (HTML)                                | Отчёт с облаком, подобранной кривой и линией дисперсии данных.                                                         | временный файл       |

Параметры с пометкой «доп.» лежат в свёрнутом разделе **Дополнительные параметры**.

На выходе формируется **Отчёт (HTML)** с графиком, подобранной кривой и линией дисперсии данных, а также необязательная **Таблица вариограммы** - точки экспериментальной вариограммы в виде слоя без геометрии (по строке на каждый лаг каждой серии). По ней можно построить свой график в QGIS или выгрузить значения. Её столбцы:

| Поле          | Тип     | Что содержит                                                                                                                                            |
|---------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>series</b> | строка  | Серия: «все точки» либо значение поля группировки, если оно задано.                                                                                     |
| <b>lag</b>    | дробное | Среднее расстояние между точками в интервале (лаге), в единицах слоя.                                                                                   |
| <b>gamma</b>  | дробное | Полудисперсия $\gamma(h)$ : среднее половины квадрата разностей значений по парам этого лага (или устойчивая оценка Кресси-Хокинса, если она включена). |
| <b>npairs</b> | целое   | Количество пар точек, попавших в лаг. Малое количество пар - точка вариограммы ненадёжна.                                                               |

## 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.

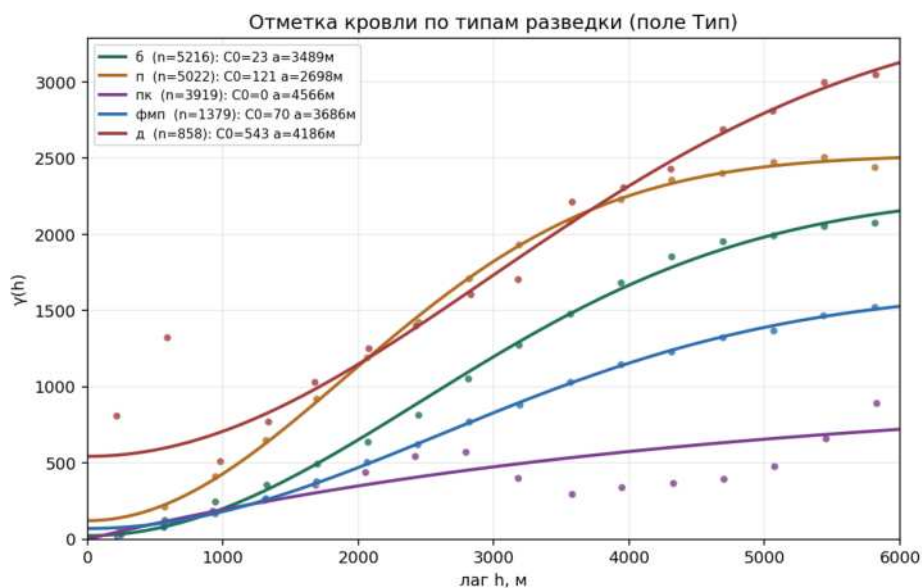


Рис. 11: Отметка кровли по пласту КрII, сгруппированная по виду разведки: подземная сеть лежит заметно ниже (область однороднее), детальная разведка даёт высокий нагет. Разные совокупности видно сразу.

## 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.

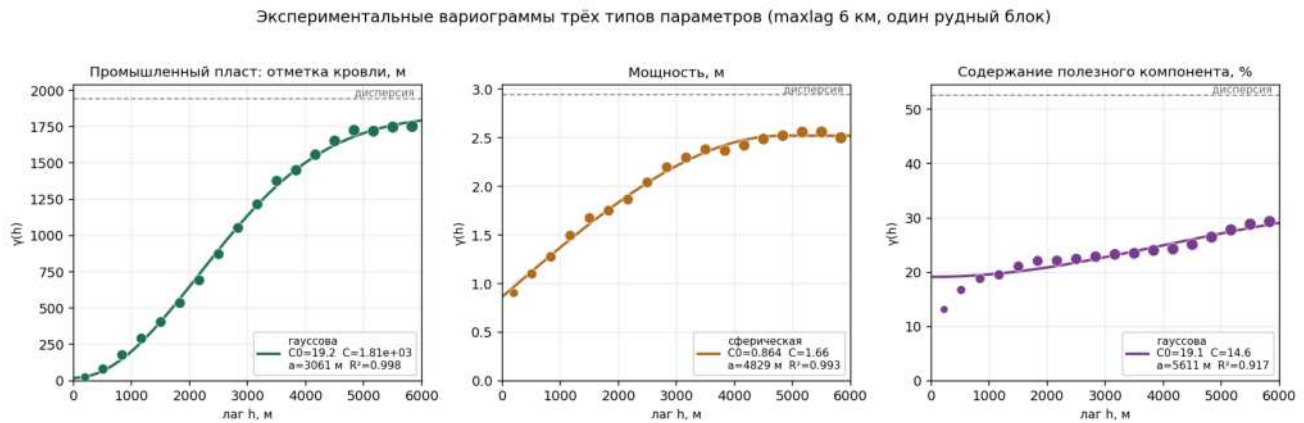


Рис. 12: Три типа параметров одного пласта в едином окне: отметка кровли (почти нулевой наггет, гладкая поверхность), мощность (наггет около трети, сферическая) и содержание (наггет сопоставим со вкладом, шумный параметр).

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.

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. Приznak 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.

## Откуда взялся наггет

В разреженной сети наггет почти всегда задают единицы пар точек, а не облако. Две скважины в десятках метров друг от друга с несопоставимыми значениями поднимают первый лаг выше порога, подбору остаётся описать это почти чистым наггетом, и кригинг по такой модели возвращает среднее вместо карты.

Поэтому инструмент печатает в журнал разбор первого лага: расстояние, число пар в нём и значение  $\gamma$  рядом с дисперсией данных. Если  $\gamma$  первого лага уже выше общей дисперсии, об этом сообщается отдельным предупреждением - описать такое можно только наггетом.

Следом называются самые тяжёлые пары внутри первого лага: расстояние между точками, оба значения, вклад  $\gamma$  и координаты обеих точек. По координатам пара находится на карте сразу, и дальше это вопрос к данным. Перепутанный горизонт, знак, единицы - либо настоящая микроизменчивость, и тогда наггет честный.

## Когда подбор ни на что не годен

Две беды подбора тихие: параметры выводятся, кригинг отрабатывает без единой ошибки и выдаёт ровное поле около среднего. Инструмент вытаскивает обе в предупреждения.

Первое - качество подгонки  $R^2$  ниже 0.1. Модель практически ничего не объясняет, и переносить её параметры в кригинг нельзя.

Второе - доля наггета выше половины суммарного порога. Связь на коротких расстояниях не разрешена: либо сеть реже, чем структура, которую пытаются увидеть, либо в данных те самые пары. Кригинг по такой модели сглаживает оценку до среднего, а на карте даёт «бычьи глаза», тугие концентрические кольца вокруг отдельных проб.

## 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 подобранные наггет, вклад, радиус и модель. Затем эти числа переносятся в кросс-валидацию и оцениваются метрики скользящего контроля. Подобранную и проверенную модель удобно сохранить как **профиль обработки** (поле **Сохранить профиль под именем**) и подставить её в **2D Kriging** полем **Загрузить профиль обработки** - см. раздел про инструмент «Профили обработки».

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 достоверной.

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**.

Если данные сгущены неравномерно, задайте необязательное поле весов **wt** из инструмента **1.01 Декластеризация**. Тогда каждая пара точек берётся с весом, равным произведению весов её концов, и скопления не раздувают ближние лаги. Счётчик пар в отчёте показывает сырое число пар, а сама  $\gamma$  считается взвешенно.

## 1.06 Вариограммная карта (анизотропия)

Инструмент строит вариограммную карту - поверхность полудисперсии  $\gamma$  как функцию двумерного вектора разнosa ( $h_x$ ,  $h_y$ ). Обычная вариограмма усредняет все направления в одну кривую и направленность теряет. Карта же показывает, как непрерывность параметра зависит от направления. По ней видно, есть ли в данных анизотропия и куда смотрит ось максимальной непрерывности. Инструмент диагностический: грид он не считает, а помогает осознанно задать азимут и анизотропию в структуре вариограммы «2D Kriging».

### Что такое анизотропия и зачем её видеть

Изотропная вариограмма предполагает, что связь значений зависит только от расстояния между точками, но не от направления. Для складчатых и вытянутых геологических тел это не так. Вдоль простираения пласт выдержан, поперёк меняется быстрее: та же разница в отметках кровли набирается вдоль складки на километры, а вкрест - на сотнях метров. Если этого не учесть, кригинг сглаживает поле одинаково во все стороны и размывает реальную вытянутость структуры.

Вариограммная карта вскрывает направленность напрямую. Для каждой пары точек берётся не только расстояние, но и направление вектора между ними, и полудисперсия приращения раскладывается по двумерной сетке лагов. Там, где  $\gamma$  растёт медленно и карта остаётся тёмной далеко от центра, непрерывность высокая. Там, где  $\gamma$  растёт быстро, непрерывность низкая. Область низкой  $\gamma$  в сумме вытягивается в эллипс, длинная ось которого и есть направление максимальной непрерывности - для складчатости это направление простираения.

### Как читать карту

В центре карты лежит нулевой лаг: значение в точке всегда равно само себе, поэтому  $\gamma$  здесь равна нулю и центр самый тёмный. По мере удаления от центра точки разносятся всё дальше и  $\gamma$  растёт. Ось  $h_x$  направлена на восток, ось  $h_y$  на север, масштаб по обеим осям одинаковый. Карта точечно-симметрична: пара и её зеркальное отражение дают одну и ту же полудисперсию, поэтому рисунок одинаков в противоположных направлениях.

Анизотропия читается по форме тёмной зоны. Если она круглая - структура изотропна, направление роли не играет. Если вытянута - вдоль её длинной оси  $\gamma$  нарастает медленнее, то есть в этом направлении значения связаны на большем расстоянии. Поверх карты рисуются подсказки: белый эллипс по оценённым радиусам и красная пунктирная линия по главной оси.

### Параметры

| Параметр            | Что задаёт                                                          | По умолчанию / совет         |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Точки со значениями | Точечный слой со скважинами или пробами.                            | -                            |
| Поле значения Z     | Числовой атрибут для анализа: отметка пласта, мощность, содержание. | запоминается между запусками |

| Параметр                                | Что задаёт                                                                                                                                                             | По умолчанию / совет |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Бинов на полуось<br>(детализация карты) | На сколько ячеек делится каждая полуось лага. Карта получается размером $(2N+1) \times (2N+1)$ . Больше бинов - детальнее карта, но меньше пар в ячейке и больше шума. | 15                   |
| Макс. лаг, в единицах слоя              | Размер окна карты, в единицах слоя (для метрических координат - метры). 0 = половина диагонали охвата.                                                                 | 0                    |
| Мин. количество пар в ячейке (доп.)     | Ячейки, в которые попало меньше пар, оставляются пустыми. Отсекает шумные дальние лаги, где пар мало.                                                                  | 5                    |
| Отчёт (HTML)                            | Отчёт с хитмапом, эллипсом, главной осью и сводкой оценок.                                                                                                             | временный файл       |
| Растр поверхности (опц.)                | Поверхность $\gamma$ как растр в координатах лага (см. ниже). По умолчанию не создаётся.                                                                               | выкл.                |

Параметр с пометкой «доп.» лежит в свёрнутом разделе **Дополнительные параметры**.

## Оценка азимута, анизотропии и радиуса

Кроме самой карты инструмент выводит в Журнал и в HTML-отчёт три числа: азимут главной оси (географический, 0 - на север, по часовой стрелке), коэффициент анизотропии как отношение малой оси к главной (1 - изотропно, меньше - сильнее вытянутость) и радиус главной оси. Оценка устроена так: по каждому направлению ищется лаг, на котором  $\gamma$  выходит на полку (близко к дисперсии данных), радиусы сглаживаются по азимуту, главная ось берётся по наибольшему радиусу, а малая - перпендикулярно ей.

Эти три числа подставляются в структуру вариограммы инструмента «2D Kriging»: азимут, анизотропия (малая/главная) и радиус  $a$ . Это и есть учёт анизотропии в кригинге. Оценка индикативная: её стоит сверить с формой самого хитмапа, а не переносить вслепую. Азимут карта определяет надёжнее всего, а радиус и коэффициент - грубее, особенно на разреженной сети.

Чтобы не переносить числа вручную, в окне есть поле **Записать анизотропию в профиль**. Выберите ранее сохранённый профиль, и азимут, коэффициент и радиус главной оси допишутся в него поверх модели и наггета, заданных в **Вариограмме**. При следующей загрузке профиля в **2D Kriging** эти значения подставляются сами и появятся в подписи под списком профилей. Если радиус упёрся в окно, он остаётся прежним, обновляются только азимут и коэффициент.

Если структура близка к изотропной или радиус главной оси оказывается меньше нескольких

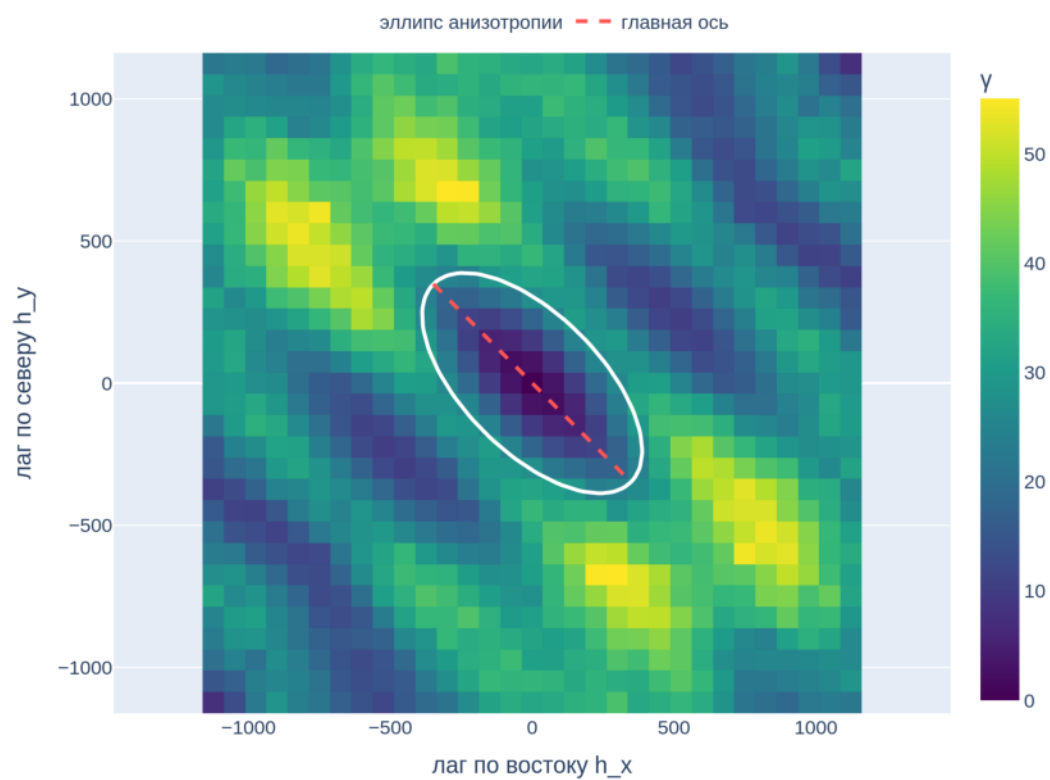


Рис. 13: Вариограммная карта: тёмная (низкая  $\gamma$ , высокая непрерывность) зона вытянута по азимуту около  $135^\circ$ . Белый эллипс и красная пунктирная главная ось показывают оценённое направление и анизотропию.

ячеек карты, анизотропия не оценивается и помечается в отчёте как «не выражена». В этом случае радиусы лежат на уровне сетки, и направленность недостоверна - правильное сообщить об этом, чем выдать случайный азимут. Помогает уменьшить макс. лаг или увеличить количество бинов, чтобы разрешить ближнюю структуру.

## Когда радиус упирается в окно

Если вдоль главной оси  $\gamma$  не успевает выйти на полку в пределах окна, радиус возвращается равным макс. лагу, а в отчёте и Журнале появляется предупреждение: радиус упёрся в макс. лаг, это нижняя оценка. Это та же ситуация, что и для обычной вариограммы (см. раздел «Максимальное расстояние и выход на плато»): кривая не вышла на плато, и порог получен экстраполяцией. На карте признак простой - тёмная зона вдоль главной оси тянется до самого края.

В этом случае радиус а в кригинг переносить как есть нельзя: настоящая длина корреляции больше окна, а коэффициент анизотропии занижен по выраженности (поле на деле ещё анизотропнее). Азимут при этом обычно определён нормально. Лечится увеличением макс. лага, чтобы карта захватила выход на полку. Если же  $\gamma$  не выходит на полку даже при широком окне, в данных доминирует тренд - его убирают до интерполяции либо учитывают соответствующим видом кригинга.

## Растр поверхности

По желанию карта сохраняется ещё и растром (поле **Растр поверхности**). Это та же поверхность  $\gamma$ , но в координатах лага: начало в точке (0, 0), размер пиксела равен ячейке лага. Растр не привязан к местности - он лежит в пространстве разносов, а не в плане месторождения, - и нужен тем, кто хочет покрутить карту на холсте QGIS, наложить свою цветовую шкалу или измерить лаг линейкой. Для самой оценки анизотропии достаточно HTML-отчёта.

Если данные сгущены неравномерно, задайте необязательное поле весов **wt** из инструмента **1.01 Декластеризация**. Тогда каждая пара точек берётся с весом, равным произведению весов её концов, и скопления не раздувают ближние лаги. Счётчик пар в отчёте показывает сырое число пар, а сама  $\gamma$  считается взвешенно.

## 1.07 Кросс-валидация вариограммы

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.

Параметры:

| Параметр                                                  | Что задаёт                                                                                                                               | По умолчанию / совет |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Точки со значениями                                       | Исходные точки (скважины).                                                                                                               | -                    |
| Поле значения Z                                           | Проверяемый числовой атрибут.                                                                                                            | -                    |
| Поле номера скважины                                      | Поле ID для подписей в отчёте и слое остатков.                                                                                           | необязательно        |
| Тип кригинга, радиус, мин./макс. точек, наггет, структуры | Настройки кригинга и вариограммы. Контроль считает кригинг ровно с ними, поэтому удачный набор переносится в «2D Kriging» без изменений. | как у «2D Kriging»   |

| Параметр                       | Что задаёт                                                                          | По умолчанию / совет   |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Снять полиномиальный тренд     | Регрессия-кригинг: тренд переподбирается на каждом шаге LOO, выигрыш виден по RMSE. | выкл.                  |
| Степень тренда                 | Плоскость или квадратичная поверхность.                                             | 1 (плоскость)          |
| Загрузить профиль обработки    | Подставить сохранённую модель поверх полей диалога.                                 | (не выбран)            |
| Сохранить профиль под именем   | Сохранить проверенную модель в профиль (с анизотропией).                            | пусто = не сохранять   |
| Слой остатков (точки)          | Точки с полями факт/оценка/ошибка (см. таблицу полей ниже).                         | необязательный         |
| Отчёт о кросс-валидации (HTML) | Интерактивный отчёт: оценка vs факт, гистограмма, QQ-график, метрики.               | создаётся по умолчанию |

В Журнал выводятся метрики:

**ME (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».

Полезно различать две стороны. Облако «оценка - факт» и RMSE говорят о **точности предсказания**. А насколько корректна сама **модель** - то есть верно ли вариограмма описывает неопределённость - показывают стандартизованные ошибки: MSDR около 1 и qq-график. Для кригинга ценны обе стороны: маленькая RMSE при MSDR около 1 означает, что модель и предсказывает хорошо, и не обманывается в собственной точности. Гнаться только за RMSE нельзя - она минимальна при нулевом наггете, где неопределённость занижена.

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.

Опциональный 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 занизил, плюс - завысил (это не дисперсия, дисперсия всегда  $\geq 0$ ).

Поля слоя остатков:

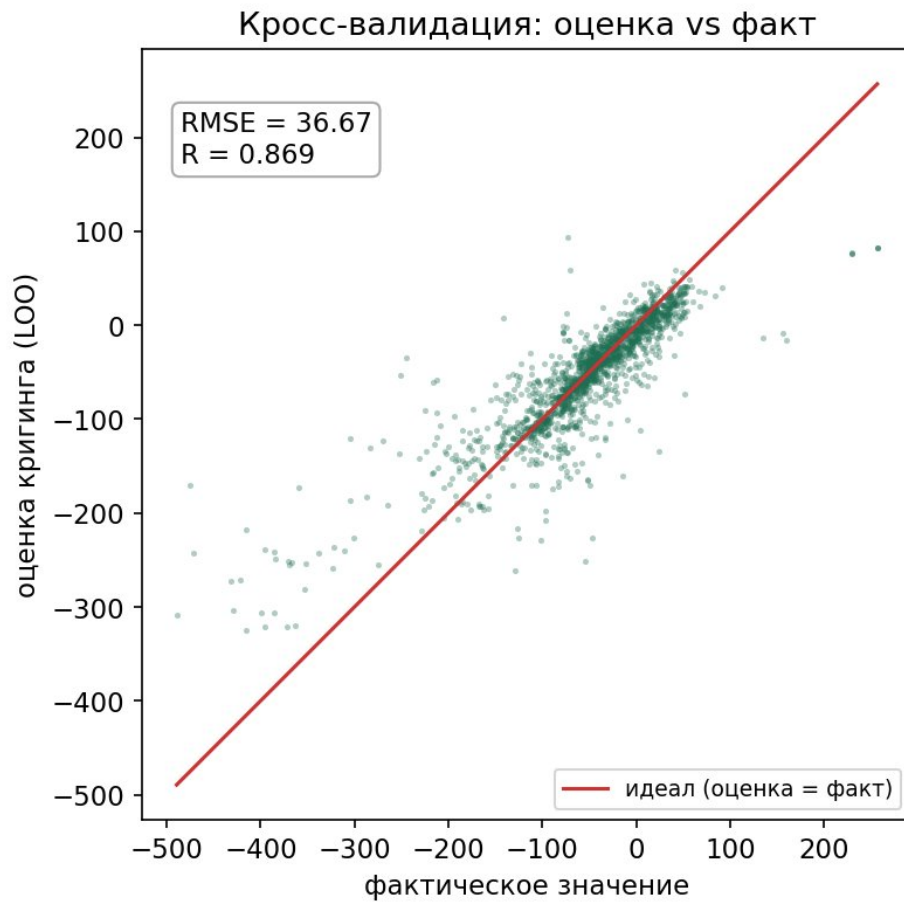


Рис. 14: Идея кросс-валидации: оценку кригинга по остальным точкам (по вертикали) сравнивают с фактом (по горизонтали). Чем теснее облако ложится на диагональ оценка = факт, тем точнее предсказание.

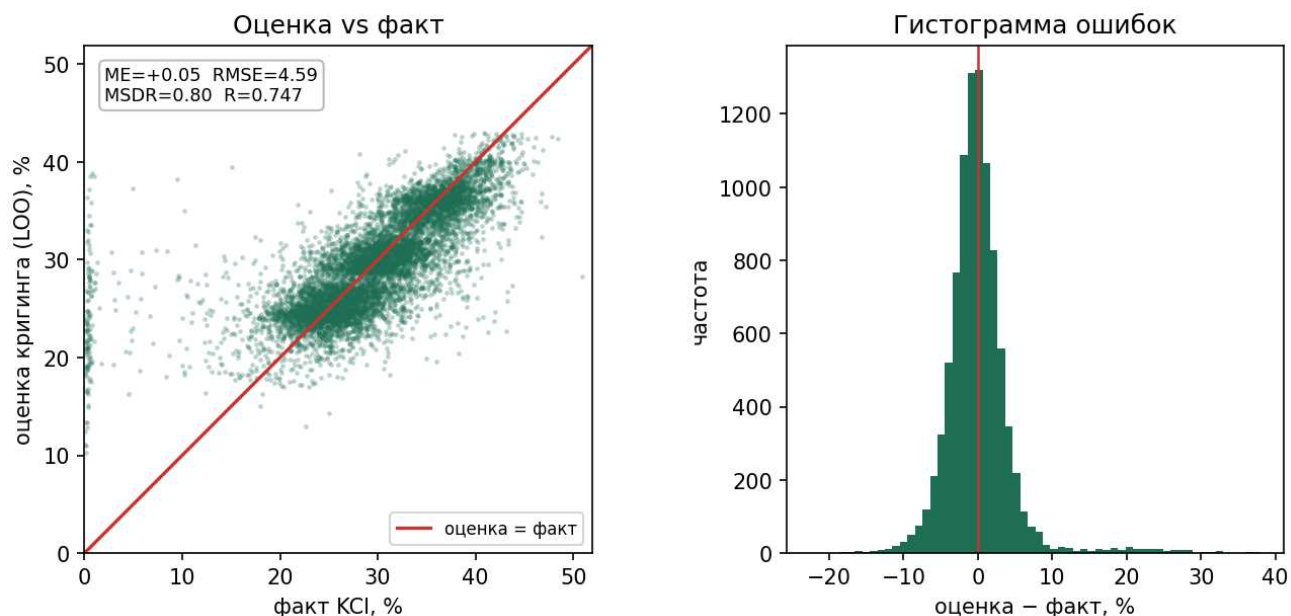


Рис. 15: Так выглядит HTML-отчёт кросс-валидации: слева график «оценка vs факт» с диагональю и метриками (пример - KCl по пласту КрII), справа гистограмма ошибок. Плотное облако вдоль диагонали - модель работает. Полоса при факте около 0 - зоны замещения. Гистограмма симметрична относительно 0 - смещения нет.

| 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.                                                 |
| z_est            | Оценка кригинга (LOO)  | Оценка по остальным точкам (leave-one-out).                                             |
| error            | Ошибка (оценка – факт) | Оценка минус факт. Минус - занижено, плюс - завышено.                                   |
| abs_error        | Модуль ошибки          | Абсолютная величина ошибки,  error .                                                    |
| 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 двумя линиями - серой диагональю 1:1 (идеал) и синей линией регрессии Best Fit, гистограмма ошибок, QQ-график остатков и таблица метрик с блоком рекомендаций. Наклон, сдвиг и угол Best Fit выведены в метрики: это индикатор условного смещения по диапазону. Наклон около 1 - метод одинаково точен на низких и высоких значениях, наклон меньше 1 - высокие значения занижаются, а низкие завышаются (регрессия к среднему, характерная подпись сглаживающих методов). 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, sill, 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 sill и проверьте снова.
- MSDR меньше 1 - неопределённость завышена: уменьшите наггет или sill.
- 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» - 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.

Если данные сгущены неравномерно, задайте необязательное поле весов **wt** из инструмента **1.01 Декластеризация**. Метрики ME, MAE, RMSE, MSDR и R тогда считаются взвешенно, и плотный куст скважин не доминирует в оценке качества. Сама оценка leave-one-out при этом не меняется, взвешивается только сводка.

## 1.08 Кросс-валидация метода (LOO)

Скользкий контроль для метода гридирования: кригинга или минимальной кривизны. Каждая проверяемая точка по очереди исключается, её значение предсказывается методом по остальным точкам и сравнивается с фактом. По ошибкам считаются метрики, и это

### QQ-график ошибок: как читать форму

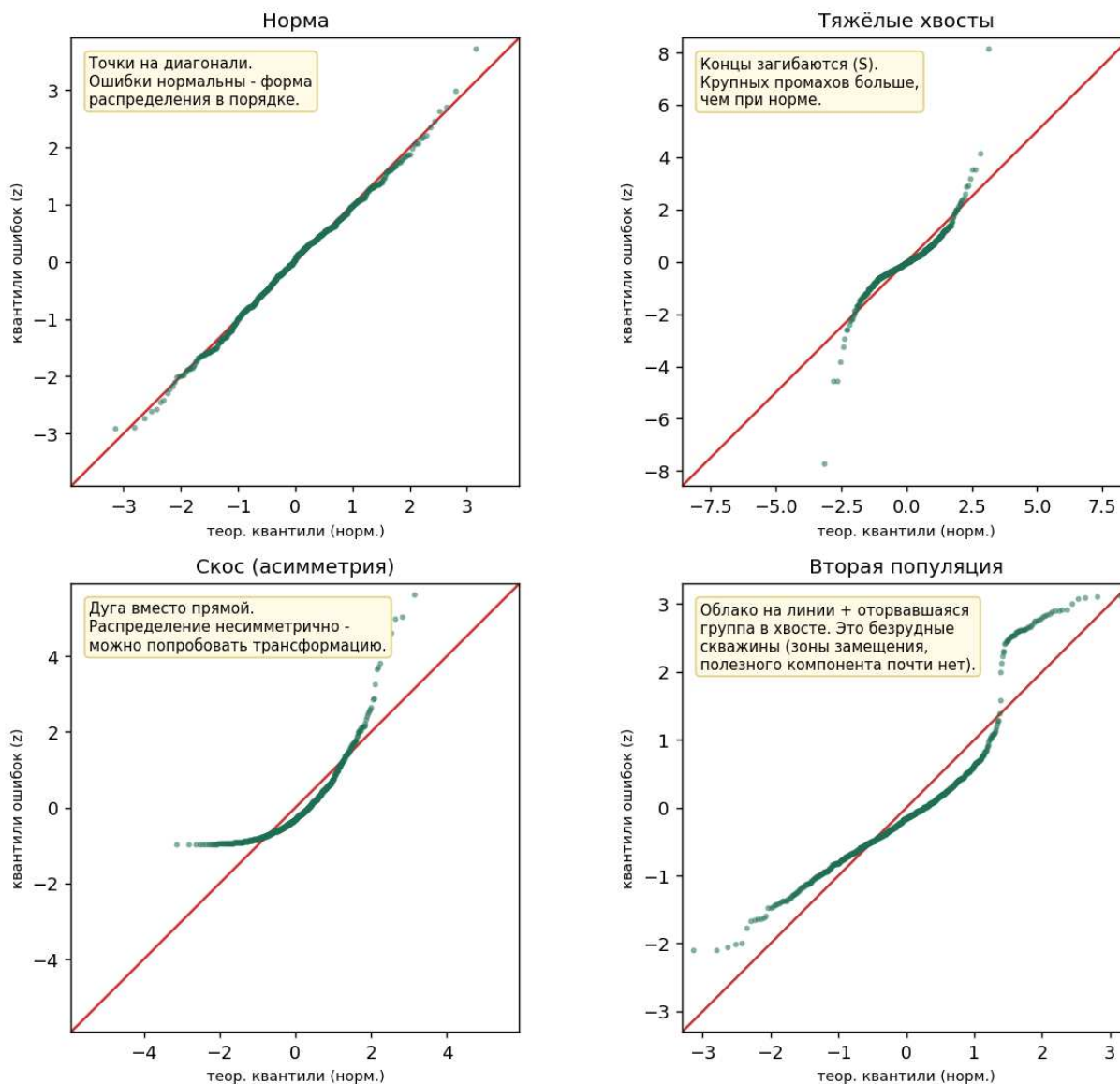


Рис. 16: Четыре типичных вида QQ-графика остатков: норма (точки на диагонали), тяжёлые хвосты, асимметрия и вторая популяция - оторвавшаяся группа в хвосте.

объективная оценка качества метода, а также способ сравнить методы между собой на своих данных.

Инструмент отличается от **1.07 Кросс-валидация вариограммы**: та подбирает модель вариограммы для кригинга, а эта сравнивает методы гридирования как таковые и работает в том числе для минимальной кривизны.

Метрики: **ME** (смещение, ближе к 0), **MAE** и **RMSE** (меньше - лучше), **R** (корреляция оценки и факта). Для кригинга дополнительно **MSDR** (ближе к 1, если масштаб стандартной ошибки адекватен). На графике оценка/факт две линии: серая диагональ 1:1 (идеал) и синяя линия регрессии **Best Fit**. Её наклон, сдвиг и угол выведены в метрики как индикатор условного смещения по диапазону. Наклон около 1 - метод одинаково точен на низких и высоких значениях, наклон меньше 1 - высокие значения занижаются, а низкие завышаются (регрессия к среднему, характерная подпись сглаживающих методов).

По образцу Surfer доступны три вещи. **Случайная выборка** из N точек ускоряет контроль на больших данных, при этом в оценке каждой точки участвует вся выборка, а не только подмножество. **Фильтр области** ограничивает проверку подобластью по охвату и по значению Z, полезно, чтобы не считать контроль в известных аномалиях. **Буфер исключения** по X и Y убирает из оценки точки в прямоугольнике вокруг проверяемой, это нужно для сгущённых кластеров, иначе оценка просто повторяет ближайшего соседа.

| Параметр                           | Назначение                                             | По умолчанию |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------|
| Точки со значениями                | Пробы.                                                 | -            |
| Поле значения (Z)                  | Числовое поле.                                         | -            |
| Поле номера скважины               | Для подписей в отчёте.                                 | -            |
| Метод                              | Кригинг или минимальная кривизна.                      | Кригинг      |
| Проверяемых точек                  | 0 - авто, $\min(N, 100)$ .                             | 0            |
| Буфер исключения по X, Y           | Прямоугольник вокруг точки, соседи в нём не участвуют. | 0            |
| Параметры кригинга                 | Вариограмма и поиск (как в 1.1).                       | -            |
| Параметры мин. кривизны (Доп.)     | Охват, ячейка, натяжение, порог, итерации.             | авто         |
| Проверять только в охвате (Доп.)   | Область контроля по X/Y.                               | езде         |
| Проверять при Z в диапазоне (Доп.) | Область контроля по значению.                          | нет          |
| Зерно ГСЧ (Доп.)                   | Для воспроизводимости выборки.                         | 0            |
| Ошибки кросс-валидации             | Слой точек с полями факта, оценки и ошибки.            | -            |
| HTML-отчёт                         | График оценка/факт, гистограмма, метрики.              | по умолчанию |

Для минимальной кривизны переоценка каждой точки идёт с тёплого старта от полного решения, поэтому один проход считается быстро. На очень больших выборках уменьшайте число проверяемых точек.

Если данные сгущены неравномерно, задайте необязательное поле весов **wt** из инструмента **1.01 Декластеризация**. Метрики ME, MAE, RMSE, MSDR и R тогда считаются взвешенно, и плотный куст скважин не доминирует в оценке качества. Сама оценка leave-one-out при этом не меняется, взвешивается только сводка.

## 1.09 Профили обработки

Профиль - это именованный набор настроек обработки одного параметра: вариограмма (наггет C0, тип модели, порог C, радиус a, азимут и оси анизотропии) плюс отсев ураганных проб (перцентиль, границы, режим срезки). Профили удобны, когда в проекте несколько пластов или зон с разной изменчивостью: один раз подобрал модель для пласта - и переиспользуешь её в кригинге, не вводя числа заново.

Профили хранятся глобально в настройках QGIS, поэтому доступны во всех проектах: собрал модель пласта однажды - применяешь где угодно. Профиль описывает одну структуру вариограммы - ровно столько, сколько использует кригинг.

### Откуда берутся профили

- **Вариограмма** - поле **Сохранить профиль под именем**. Сохраняется подобранная модель. Кривая строится изотропной, поэтому азимут и оси записываются нейтральными (0 и 1) - анизотропию задают позже.
- **Кросс-валидация** - поле **Сохранить профиль под именем**. Сохраняется проверенная модель вместе с заданной анизотропией. Это основной способ получить профиль с азимутом и осями.
- **Профили обработки** - действие **Сохранить вручную**: все значения профиля вводятся в полях раздела **Дополнительные параметры**.

### Применение

В инструменте **2D Kriging** и в **Кросс-валидации** поле **Загрузить профиль обработки** подставляет выбранный профиль поверх полей диалога. Что именно подставлено, печатается в Журнал.

### Управление

Сам инструмент **Профили обработки** управляет хранилищем через параметр **Действие**:

| Действие          | Что делает                                                                                  |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Показать список   | Выводит в Журнал все профили с их параметрами.                                              |
| Сохранить вручную | Сохраняет профиль с именем из поля <b>Имя профиля</b> по значениям полей в «Дополнительно». |
| Удалить выбранный | Удаляет профиль, выбранный в поле <b>Профиль</b> .                                          |
| Очистить все      | Удаляет все профили.                                                                        |

Сохранение под уже существующим именем перезаписывает профиль. Списки профилей в выпадающих полях (выбор для удаления, загрузка в кригинге) обновляются при открытии окна инструмента: сохранили профиль - переоткройте инструмент, чтобы он появился в списке.

Под выпадающим списком профиля строкой ниже показываются параметры выбранного профиля (наггет, тип, порог, радиус, азимут, оси, отсев). В **2D Kriging** и **Кросс-валидации** там же выводится напоминание, что расчёт пойдёт по профилю, а не по полям диалога. На сборках QGIS без старого API виджетов подпись не появляется - остаётся обычный список (на работу это не влияет).

## 1.10 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 (КрII). Инструмент предназначен для обучения и проверки кригинга, изолиний и кросс-валидации без реальных данных.

Параметры:

| Параметр                             | Что задаёт                                                                       | По умолчанию / совет |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Область (экстент)                    | Прямоугольник генерации (по слою, холсту, координатами, рисованием).             | -                    |
| Количество скважин                   | Сколько точек создать.                                                           | 300                  |
| Минимум / максимум значения X        | Диапазон содержания компонента.                                                  | 0 / 50               |
| Гладкость (доля охвата)              | Радиус корреляции как доля охвата: больше - крупнее «пятна».                     | 0.15                 |
| Кровля, мощность: мин/макс (Доп.)    | Диапазоны полей roof и thick.                                                    | как у КрII           |
| Доля наггета (Доп.)                  | Доля дисперсии на короткомасштабный шум: больше - ниже предсказуемость.          | 0.35                 |
| Добавить категориальное поле минтипа | Поле mintype (сильвинит, замещение) для индикаторного кригинга.                  | выкл.                |
| Добавить поле напора                 | Поле head с региональным уклоном для градиента потока.                           | выкл.                |
| Добавить поля К и Т и напор          | Напор и лог-нормальные К (м/сут) и Т = К·мощность для удельного расхода (Дарси). | выкл.                |
| Зерно ГСЧ (Доп.)                     | Воспроизводимость генерации. 0 = случайно.                                       | 0                    |
| Скважины (демо)                      | Выходной точечный слой.                                                          | -                    |
| Поверхность дрейфа (растр) + поле dz | Включите вывод - получите растр s и поле dz для внешнего дрейфа.                 | выкл. (пропущен)     |

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

Две галки и отдельный вывод добавляют необязательные поля для обучения смежных инструментов. **Добавить категориальное поле минтипа** даёт поле mintype с фоном сильвинита и очагами замещения для категориального индикаторного кригинга. **Добавить поле напора** даёт поле head с выраженным региональным уклоном для гидравлического градиента: кригуете head, подаёте растр в инструмент потока, и стрелки идут вниз по склону напора. Включённый вывод **Поверхность дрейфа** строит отдельным растром гладкую стороннюю поверхность s, известную всюду, и добавляет поле dz, линейно с ней связанное. На этой паре осваивают кригинг с внешним дрейфом: кригуете dz с растром s как дрейфом и сравниваете с обычным кригингом dz без дрейфа. Если вывод поверхности пропущен, поле dz

не добавляется. Галка **Добавить поля К и Т и напор** генерирует напор и лог-нормальные поля К (коэффициент фильтрации, разброс на порядки, как в реальных откачках) и  $T = K \cdot \text{мощность}$ . На них осваивают удельный расход по Дарси: кригуете К и Т в «2D Kriging» с преобразованием **ln** (или вручную поля ln), плюс напор, и подаёте растры в «Удельный расход».

Поля результата:

| Поле    | Тип   | Что содержит                                                                                        |
|---------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| well    | текст | Номер скважины, формат SK-0001.                                                                     |
| roof    | число | Абсолютная отметка кровли пласта, м.                                                                |
| thick   | число | Мощность пласта, м.                                                                                 |
| X       | число | Содержание абстрактного компонента, %.                                                              |
| head    | число | Напор (пьезометрический уровень), м. С галкой напора или галкой К и Т.                              |
| K       | число | Коэффициент фильтрации, м/сут (лог-нормально). Только с галкой К и Т.                               |
| T       | число | Водопроводимость $T = K \cdot \text{мощность}$ , м <sup>2</sup> /сут. Только с галкой К и Т.        |
| mintype | текст | Минеральный тип (сильвинит, частичное замещение, каменная соль). Только с галкой минтипа.           |
| dz      | число | Значение, линейно связанное с поверхностью дрейфа. Только при включённом выводе поверхности дрейфа. |

Полный перечень полей выходных слоёв - в приложении **Скважины (демо)** (раздел «Поля демо-слоёв» в конце руководства).

## 1.11 Создать пример геофизических профилей (демо)

Инструмент создаёт точечный слой геофизических профилей для обучения и проверки без реальных данных. Строятся несколько параллельных профилей с пикетами. Предусмотрено два режима.

**Электроразведка.** Вдоль профилей заданы кажущееся сопротивление  $\rho_k$  (Ом·м), потенциал естественного поля ЕП (мВ) и вызванная поляризация ВП (мВ/В). В данные заложена низкоомная аномалия - обводнённая или замещённая зона. В ней  $\rho_k$  проваливается с фоновых десятков Ом·м до единиц, а ЕП даёт отрицательный минимум. Такое поведение отвечает промысловой практике: наименьшие сопротивления характерны для осадочных пород, тогда как соль, гипс и ангидрит, наоборот, высокоомны, а обводнение и засоление уводят сопротивление вниз. Аномалия задана компактным пятном, а не полосой, поэтому профили не синхронны, и при интерполяции виден локальный очаг, а не сплошная лента.

**Оседания (мульда).** Значение - оседание (мм) в виде мульды сдвижения над отработанной площадью, по нескольким турам наблюдений. Мульда углубляется от тура к туру и ограничена по модулю двумя метрами. Знак единый: вниз (отрицательное) или величина (положительное),

по выбору. По краям строго нули - в стороне от отработки оседания нет. По одним пикетам можно посчитать разность **settle** между турами и получить скорость оседания.

Рабочий цикл повторяет основной: поле **rho\_k** (или **settle**) интерполируется инструментом **1.02 2D Kriging** либо минимальной кривизной, по гриду строятся изолинии инструментом **1.04**, и аномалия оконтуривается. Поле **sp** можно интерполировать так же и сравнить минимум ЕП с провалом рк. Поле **rho\_true** (или **settle\_true**) - заложенное значение без шума, эталон для проверки точности интерполяции.

## Кригинг или минимальная кривизна

Геофизические профили - характерный случай, где выбор метода интерполяции важнее его настройки. Данные плотные вдоль профилей и разреженные между ними, а сама величина (сопротивление, потенциал) физически гладкая и непрерывная.

Кригинг верно отражает неравномерность сети: без настройки анизотропии вариограммы он тянет структуру вдоль линий съёмки, и поле распадается на полосы вдоль пикетов. Минимальная кривизна (**1.03**) навязывает физически осмысленную гладкость и сшивает разрозненные профили в связную поверхность, поэтому для профильной съёмки и потенциальных полей она обычно предпочтительнее. То же справедливо и для поля **sp**: минимум ЕП проявляется цельным телом, а не столбцами. Ярче всего это видно на оседаниях: мульда сдвижения - компактная осесимметричная воронка, и кригинг раскатывает её в ленту вдоль профилей, тогда как минимальная кривизна восстанавливает чашу с чётким центром.

Практический вывод: поля с профилей стройте минимальной кривизной, а кригинг применяйте, когда настроена анизотропия вариограммы под геометрию сети.

Область задаётся экстендом. Режим, диапазоны, число туров и отметку поверхности можно изменить в разделе **Дополнительно**.

| Параметр                            | Что задаёт                                         | По умолчанию    |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------|
| Область (экстент)                   | Границы генерации.                                 | -               |
| Режим                               | Электроразведка или оседания.                      | Электроразведка |
| Число профилей                      | Сколько параллельных профилей.                     | 4               |
| Шаг пикетов, м                      | Расстояние между пикетами.                         | 20              |
| Фоновое рк, Ом·м (Доп.)             | Сопротивление вне аномалии.                        | 60              |
| Минимальное рк, Ом·м (Доп.)         | Сопротивление в центре пятна.                      | 10              |
| Амплитуда ЕП, мВ (Доп.)             | Глубина минимума ЕП, обычно меньше 0.              | -100            |
| Амплитуда ВП, мВ/В (Доп.)           | Высота аномалии ВП.                                | 15              |
| Шум рк (Доп.)                       | Доля разброса в лог-масштабе.                      | 0.06            |
| Максимальное оседание, мм (Доп.)    | Глубина мульды в последнем туре.                   | 400             |
| Число туров (Доп.)                  | Сколько циклов для режима оседаний.                | 2               |
| Знак оседания (Доп.)                | Вниз (отрицательное) или величина (положительное). | Вниз            |
| Отметка: база и амплитуда, м (Доп.) | Плавный рельеф поверхности.                        | 120 и 15        |
| Геофизические профили               | Слой точек с полями.                               | -               |

Поля электроразведки: **profile** (номер профиля), **picket\_m** (пикет в метрах от начала профиля),

**pk** (метка ПК, например ПК5+20), **z** (отметка поверхности, м), **rho\_k** (ρк, Ом·м), **rho\_true** (ρк без шума), **sp** (ЕП, мВ), **vp** (ВП, мВ/В).

Поля оседаний: **profile**, **picket\_m**, **pk**, **tour** (номер тура), **z** (отметка, м), **settle** (оседание, мм), **settle\_true** (оседание без шума).

## Топография: рельеф из открытых данных

Группа «**2. Топография**» отвечает на частый запрос: максимально качественная модель рельефа из открытых данных из коробки. Парадный вход - загрузчик ЦМР по рамке, к нему векторная топооснова из OpenStreetMap, ядро Торо2Raster для построения рельефа из точек и изолиний, и полный гидрологический набор: заполнение понижений, сток и аккумуляция, речная сеть, бассейны, уклон с экспозицией и вершины. Вся аналитика на чистом NumPy, без GRASS, SAGA и внешних модулей.

Рядом стоит группа «**2. Топография: диагностика и правка**». В неё вынесены инструменты проверки готового рельефа: разделение горизонталей на наборы, невязка против ЦМР и поиск террасинга. Отдельная группа нужна потому, что подгрупп в Processing нет, а держать проверку внутри рабочей цепочки неудобно: она разрывает последовательность построения. Нумерация инструментов при этом сквозная с топографией.

Все выходные слои группы складываются в группу **Топография** дерева слоёв, чтобы не тонуть среди рабочих слоёв проекта. Инструменты группы стыкуются друг с другом. Загрузчик 2.01 отдаёт готовую метрическую ЦМР, которая без всяких манипуляций идёт в изолинии (1.04) и в любой расчёт группы. Водотоки из 2.02 и речная сеть из 2.06 подходят тальвегами в Торо2Raster (2.03) как есть, потому что их вершины идут вниз по течению.

Полный перечень полей выходных слоёв - в приложении **Профили электроразведки / Профили оседаний** (раздел «Поля демо-слоёв» в конце руководства).

### 2.01 Загрузка ЦМР по рамке

Загружает ЦМР по рамке из открытого хранилища, без регистрации и ключей, на выбор из двух источников. Плитки размером один градус собираются в мозаику без швов и перепроецируются в метрическую систему координат с кубической интерполяцией. Сырые градусные плитки в анализ не попадают, поэтому особенность GLO-30 севернее 50 широты (укрупнённый шаг по долготе) обрабатывается автоматически.

| Параметр                 | Что задаёт                                                                                                                      | По умолчанию / совет |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Источник рельефа         | GLO-30 (Copernicus, DSM: высоты по кронам и кровлям) или GEDTM30 (DTM без леса и построек, машинное обучение по ICESat-2/GEDI). | GLO-30               |
| Рамка загрузки           | Охват в любой СК, пересчитывается в градусы автоматически.                                                                      | -                    |
| Целевая СК               | Метрическая СК выхода. Пусто = СК проекта, если метрическая, иначе UTM по центру рамки.                                         | пусто                |
| Размер ячейки, м         | Шаг выходного грида после перепроецирования.                                                                                    | 30                   |
| Сгладить рельеф (FPDEMS) | Сглаживание с сохранением бровок (см. ниже). выкл. = сырой растр источника.                                                     | выкл.                |

| Параметр                                          | Что задаёт                                                                            | По умолчанию / совет |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Гидрологическая коррекция                         | Заполнение ложных понижений, чтобы вода текла вниз. Снять для карста и мულд оседания. | вкл.                 |
| Сглаживание: окно нормалей, ячеек (доп.)          | Сторона окна фильтра нормалей, нечётная.                                              | 11                   |
| Сглаживание: порог различия нормалей, град (доп.) | Строгость сохранения граней: меньше - агрессивнее сохранение.                         | 15                   |
| Сглаживание: число проходов (доп.)                | Внешних шагов пересборки высот.                                                       | 2                    |
| Epsilon уклона при заполнении, м (доп.)           | Минимальный уклон на плоскостях. 0 = поднять только ямы до слива.                     | 0.001                |
| Предел числа плиток 1x1 градус (доп.)             | Страховка от слишком большой рамки для GLO-30.                                        | 25                   |
| ЦМР (метрическая СК)                              | Выходной растр float32, слой в группе Топография.                                     | -                    |

**Источник рельефа** - ключевой выбор. **Copernicus GLO-30** это цифровая модель поверхности (DSM): высоты снимаются по верху крон и кровель, раздаётся плитками по градусу. **GEDTM30** это цифровая модель рельефа (DTM) от OpenGeoHub под лицензией CC BY 4.0: лес и постройки сняты машинным обучением по данным ICESat-2 и GEDI, поэтому под пологом леса GEDTM30 заметно точнее, что подтверждено независимой проверкой. Раздаётся единым глобальным облачным GeoTIFF. Для лесистого Прикамья DTM обычно предпочтительнее, для открытых участков разница мала.

Параметры:

- **Рамка загрузки** - охват в любой СК, внутри переводится в градусы для выбора данных.
- **Целевая СК** - метрическая СК результата. Пустое значение включает автоматику: берётся СК проекта, если она метрическая, иначе зона UTM по центру рамки. Градусная целевая СК отклоняется с внятным сообщением.
- **Размер ячейки, м** - по умолчанию 30, родное разрешение GLO-30.
- **Гидрологическая коррекция** - включена по умолчанию: ложные понижения заполняются сразу (см. 2.04), чтобы вода на модели текла вниз. Для задач, где важны замкнутые котловины (карст, мულды оседаний), флажок снимите.
- В **Дополнительно: Epsilon уклона при заполнении** и **Предел числа плиток** (защита от случайной рамки на полстраны).

Отказ сети или рамка целиком в океане завершаются понятным сообщением, а не пустым растром. Источник данных: Copernicus DEM © ESA, открытая лицензия допускает использование с указанием источника.

## 2.02 Загрузка топоосновы по рамке

Векторный близнец загрузчика ЦМР: по той же рамке забирает из OpenStreetMap слои для работы с рельефом.

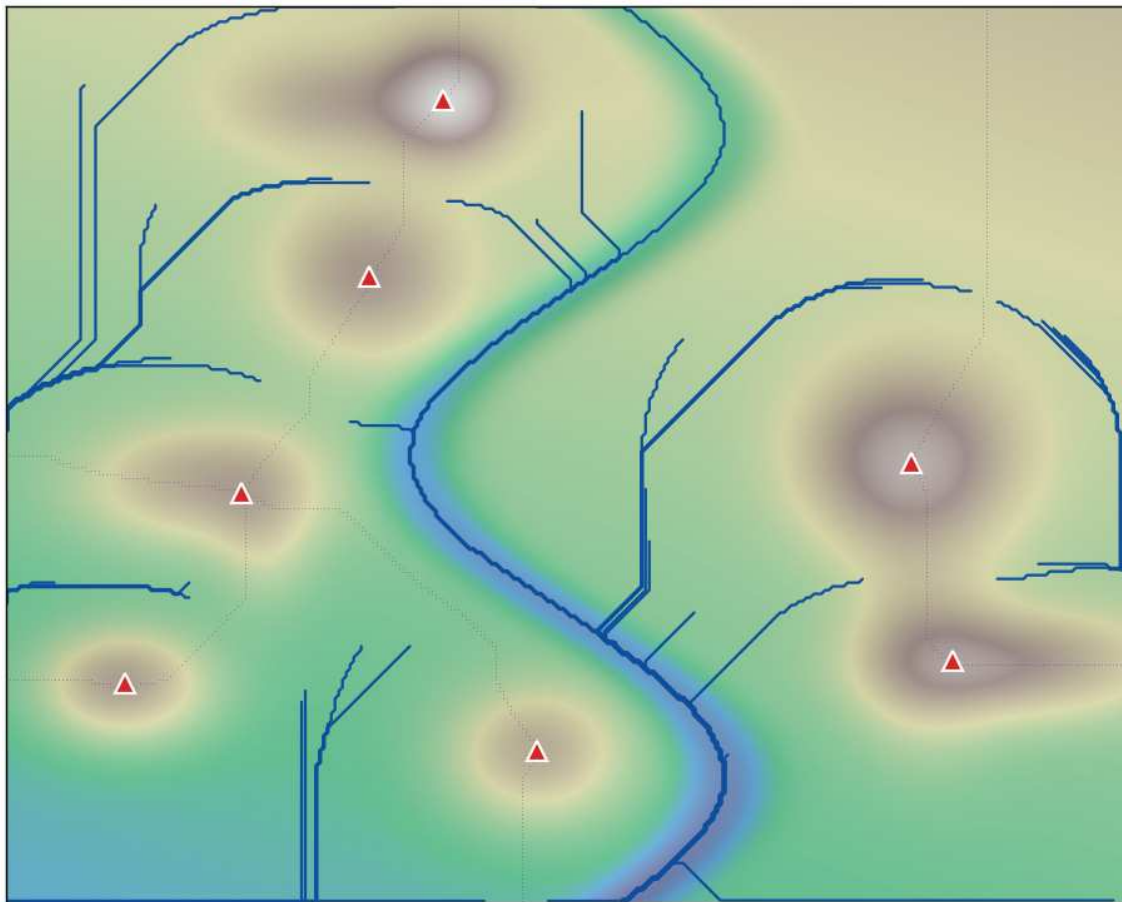


Рис. 17: Полная цепочка группы на демо-рельефе: отмывка, речная сеть толщиной по порядку Стралера (2.06), границы бассейнов (2.07) и вершины (2.09).

| Параметр                           | Что задаёт                                                                     | По умолчанию / совет |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Рамка загрузки                     | Охват запроса к OSM Overpass. Держать скромным - большие запросы сервер режет. | -                    |
| Предел площади рамки, кв. градусов | Страховка от чрезмерного запроса.                                              | 0.5                  |
| Таймаут запроса, с                 | Ожидание ответа Overpass, при отказе идёт переход на зеркало.                  | 90                   |

Выходные слои: водотоки, водоёмы (плоскости), вершины с полем **ele**, обрывы (барьеры). Все попадают в группу Топография.

- **Водотоки** - реки, ручьи и каналы. В OSM водотоки рисуются вниз по течению, поэтому слой годится тальвегами в 2.03 без подготовки.
- **Водоёмы** - замкнутые контуры озёр и прудов, плоскости постоянной высоты для 2.03. Составные мультиполигоны (большие озёра из нескольких way) первая версия пропускает.
- **Вершины с отметками** - точки natural=peak с высотой ele, готовые отметки вершин для 2.03 и контроль для 2.09.
- **Обрывы и насыпи** - линии разрыва рельефа для 2.03.
- **Береговая линия** - по умолчанию выключена, нужна на приморских территориях.

Выход в СК проекта, линии обрезаются по рамке. Публичные серверы Overpass имеют лимиты, при отказе основного сервера запрос уходит на зеркало, для больших территорий уменьшайте рамку или поднимайте предел площади в **Дополнительно**. Данные: © участники OpenStreetMap, лицензия ODbL.

## 2.03 Топо2Raster (рельеф из векторов)

Строит рельеф из векторных данных мультисеточной интерполяцией от грубой сетки к тонкой, по мотивам ANUDEM. Инструмент закрывает классическую задачу: есть отцифрованные горизонталы топоплана, отметки высот, реки и озёра, нужен корректный грид.

| Параметр                     | Что задаёт                                                             | По умолчанию / совет |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Точки высот                  | Слой отметок (например, вершины 2.09).                                 | -                    |
| Поле высоты точек            | Атрибут Z у точек.                                                     | -                    |
| Изолинии                     | Слой горизонталей (оцифровка плана или 1.04 по ЦМР).                   | -                    |
| Поле высоты изолиний         | Атрибут уровня у изолиний.                                             | ELEV                 |
| Тальвеги (вниз по течению)   | Линии рек, вершины направлены вниз. Сеть 2.06 и OSM подходят как есть. | -                    |
| Обрывы (барьеры сглаживания) | Линии, вдоль которых перепад не размазывается.                         | -                    |
| Озёра и урез воды            | Плоскости водоёмов.                                                    | -                    |
| Поле отметки уреза           | Отметка уреза. Пусто = Z узлов (наклон) или минимум берега.            | пусто                |
| Охват                        | Рамка выхода. Пусто = по входным слоям.                                | пусто                |

| Параметр                                      | Что задаёт                                      | По умолчанию / совет |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------|
| Размер ячейки, м                              | Шаг выходного грида.                            | 30                   |
| Заполнить понижения в итоге                   | Гидрологическая коррекция результата.           | вкл.                 |
| Итераций сглаживания на уровень (доп.)        | Проходов внутреннего сглаживания поля.          | 60                   |
| Минимальное падение тальвега, м/ячейку (доп.) | Гарантированный уклон вдоль рек.                | 0.01                 |
| Epsilon уклона при заполнении, м (доп.)       | Минимальный уклон на плоскостях при заполнении. | 0.001                |
| Рельеф                                        | Выходной растр float32.                         | -                    |

Нужны точки или изолинии (хотя бы один источник высот). Приоритет отметки уреза: Z узлов (наклон реки) выше поля отметки (плоскость), поле выше минимума берега.

Каждый тип входа работает своим ограничением:

- **Точки высот и изолинии** - жёсткие узлы, поверхность через них проходит точно. Нужен хотя бы один из этих слоёв, у каждого выбирается числовое поле высоты.
- **Тальвеги** - принудительное монотонное падение вниз по течению. Вершины линий должны идти вниз по течению: водотоки OSM (2.02) и речная сеть (2.06) подходят как есть. Минимальное падение на ячейку задаётся в **Дополнительно**.
- **Обрывы** - барьеры сглаживания. Поверхности по сторонам обрыва независимы, перепад не размазывается. Сама линия шириной в ячейку получает промежуточную высоту, это ограничение первой версии.
- **Урез воды** - три приоритета высоты на каждый объект, слой может смешивать типы. Если у полигона трёхмерные вершины (задан Z в узлах), урез интерполируется по их высотам и наклоняется вдоль русла - так задаётся падение уровня реки от истока к устью. Если Z нет, но заполнено поле отметки, объект держится горизонтальной плоскостью. Если нет ни того, ни другого, уровень берётся автоматически по минимуму прилегающего берега. Разнотипные объекты в одном слое разбираются каждый своей веткой: озеро плоскостью, река наклоном.

Внутри работает двухтактный цикл на каждом уровне сетки: мембранное сглаживание ставит каркас и держит ограничения, затем полировка минимальной кривизной (стенсил Бриггса) убирает мембранное смещение между кривыми изолиниями. На круговом тесте (демо-рельеф, горизонтали через 4 м, восстановление, сравнение с оригиналом) полировка снижает ошибку примерно на треть. Остаточный максимум ошибки живёт на вершинах выше последней горизонтали, поэтому отметки вершин во входных данных заметно улучшают макушки - именно так топографы и подписывают карты.

Охват по умолчанию берётся по слоям с отступом две ячейки. Все слои приводятся к СК первого заданного слоя, она должна быть метрической. Финальное **заполнение понижений** включено по умолчанию, его логика описана в 2.04.

## Трёхмерные тальвеги

Тальвег без отметок работает условием: вдоль него поддерживается падение вниз по течению, а какая там высота, решает интерполятор по окружающим данным. Если у линии есть отметки вершин, они становятся жёсткими узлами, и промер по руслу начинает задавать дно, а не подсказывать направление.

Отметки при этом один раз приводятся к падающим вниз по течению. Причина не в аккуратности, а в устройстве расчёта: измерения по руслу шумят, отдельные вершины уходят вверх по течению, и такой узел спорил бы с принуждением падения на каждой итерации. Релаксация прищипливает ячейку к отметке, принуждение продавликает её ниже, и так по кругу. После приведения принуждение становится пустой операцией и спорить не с чем.

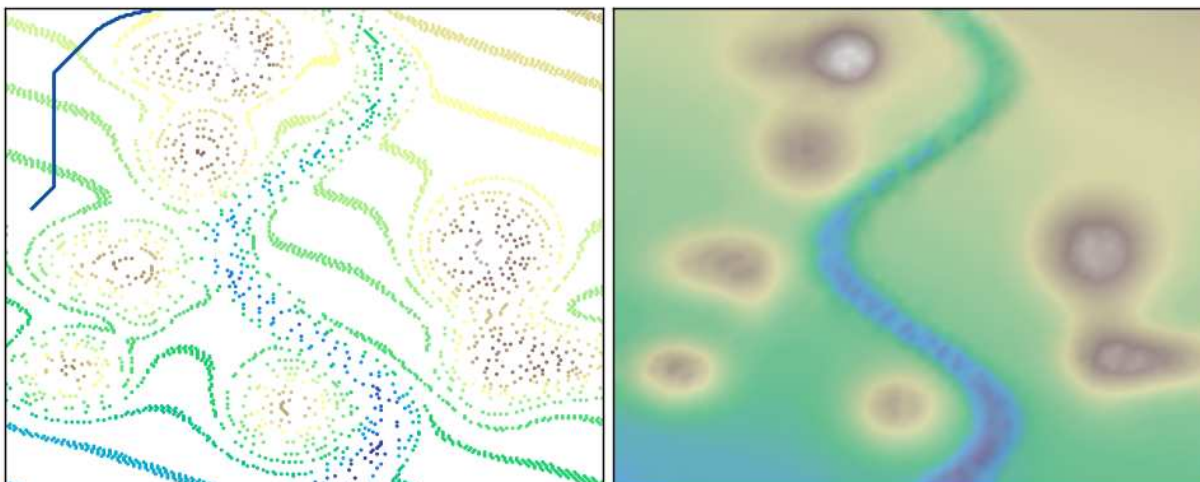


Рис. 18: Слева входные ограничения: уплотнённые изолинии (цвет по высоте) и главный тальвег. Справа восстановленный рельеф.

Правка идёт только вниз: отметку выше измеренной инструмент не выдумывает. Её наибольшая величина печатается в журнал, и по ней видно, насколько шумным был промер.

Отдельно считаются ячейки, где отметка тальвега расходится с другим узлом больше чем на пять сантиметров. Обычно это пересечение русла с горизонталью, и там побеждает тальвег. Число таких мест выводится предупреждением: молча решать такой спор нельзя.

Линия без отметок ведёт себя как прежде, разнотипный слой разбирается по объектам.

## Граница области построения

Полигон ограничивает поверхность так же, как outer boundary в системах проектирования: за границей растр не выдаётся, там nodata.

Важна не сама обрезка, а момент, когда она применяется. Маска накладывается **после** интерполяции, а не отсечением входных данных. Точки, горизонтали и тальвеги за пределами границы продолжают формировать поверхность у самой границы, поэтому края не заворачиваются. Если бы мы вместо этого обрезали вход, у границы возник бы искусственный перегиб: интерполятору стало бы не на что опереться с внешней стороны.

Слой границы подавайте в любой системе координат, геометрия переводится сама. В журнал печатается, сколько ячеек оказалось внутри и какая это доля площади. Если внутри не оказалось ни одной, расчёт прерывается с указанием проверить систему координат: чаще всего дело именно в ней.

## 2.04 Подготовка рельефа

Готовит ЦМР к анализу двумя независимыми модификациями, каждая включается своим флажком, порядок фиксирован: сначала сглаживание, потом заполнение.

| Параметр    | Что задаёт                    | По умолчанию / совет |
|-------------|-------------------------------|----------------------|
| Входная ЦМР | Растр рельефа для подготовки. | -                    |

| Параметр                                          | Что задаёт                                                                                      | По умолчанию / совет |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Сгладить рельеф (FPDEMS)                          | Сглаживание с сохранением бровок (см. ниже).                                                    | выкл.                |
| Заполнить понижения                               | Заполнение ложных ям (Планшона-Дарбу).                                                          | вкл.                 |
| Epsilon уклона, м (0: только ямы)                 | Минимальный уклон на плоскостях. 0 = поднять ямы до слива, больше нуля = сквозной уклон для D8. | 0.001                |
| Сглаживание: окно нормалей, ячеек (доп.)          | Сторона окна фильтра нормалей, нечётная.                                                        | 11                   |
| Сглаживание: порог различия нормалей, град (доп.) | Строгость сохранения граней: меньше - агрессивнее.                                              | 15                   |
| Сглаживание: число проходов (доп.)                | Внешних шагов пересборки высот.                                                                 | 2                    |
| Подготовленная ЦМР                                | Выходной растр float32.                                                                         | -                    |

Порядок: сначала сглаживание, потом заполнение. Обе модификации независимы, каждая своим флажком.

**Сгладить рельеф (FPDEMS)** убирает избыточную шероховатость спутниковых моделей. Спутниковые ЦМР зашумлены, и обычные фильтры - среднее, медиана, гаусс - режут шум вместе с бровками, стенками террас и берегами: перегибы заваливаются. FPDEMS (Lindsay, Francioni, Cockburn, 2019) работает иначе. Он оперирует не высотами напрямую, а полем нормалей поверхности: сначала считает нормаль каждой ячейки, затем сглаживает поле нормалей так, что сосед входит в среднее с весом тем большим, чем ближе его нормаль к центральной. На бровке нормали соседей резко расходятся, вес падает, грань сохраняется. После этого высоты подтягиваются под сглаженное поле нормалей. В итоге плоское выглаживается, структурные линии стоят. **Порог различия нормалей** (в **Дополнительно**) управляет строгостью: меньше значение - агрессивнее сохранение граней, больше - сильнее общее сглаживание. Метод изначально предложен для лидарных ЦМР, но одинаково полезен для спутниковых.

**Заполнить понижения** методом Планшона-Дарбу поднимает ложные ямы, чтобы поток не останавливался. Понижения в растровых моделях чаще всего артефакты интерполяции и шума, гидрологический анализ без заполнения обрывается в первой же яме. **Epsilon уклона** управляет режимом: при нулевом значении поднимаются только настоящие ямы ровно до уровня слива, плоские участки остаются плоскими. При положительном значении (по умолчанию 0.001 м) через плоскости дополнительно строится сквозной уклон, и D8 на них становится определён. Для стока и аккумуляции нужен положительный epsilon. Ячейки на границе грида и рядом с nodata считаются стоками. В отчёт печатается число поднятых ячеек и максимальный подъём - удобный индикатор качества исходной ЦМР.

Та же галочка сглаживания есть в загрузке ЦМР (2.01) для быстрого пути прямо при скачивании. Отдельный инструмент 2.04 нужен, когда рельеф пришёл не из 2.01, а из своих данных.

## 2.05 Сток и аккумуляция (D8)

Считает направления стока по восьми соседям (D8, Jenson-Domingue) и аккумуляцию: сколько ячеек стекает в каждую, включая её саму. Направления кодируются как в ArcGIS: E=1, SE=2, S=4, SW=8, W=16, NW=32, N=64, NE=128, сток=0, nodata=255.

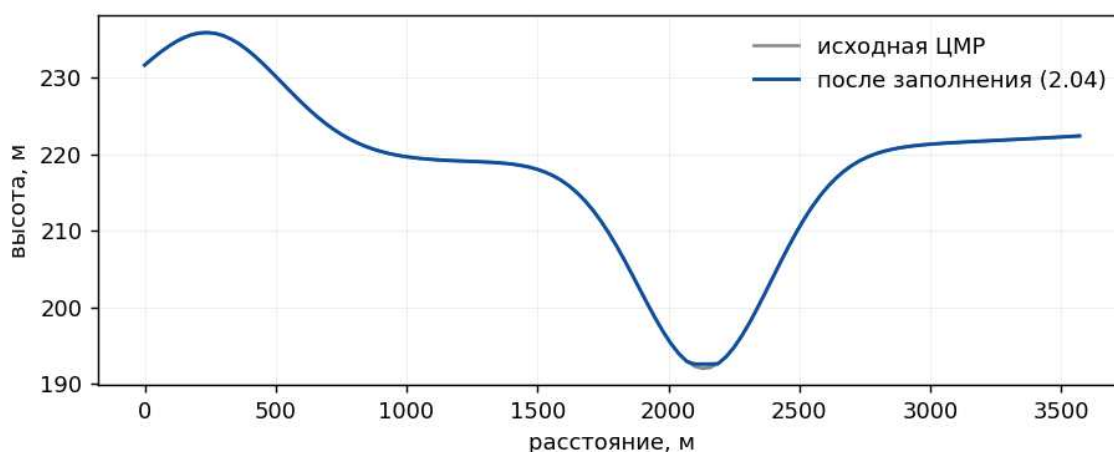


Рис. 19: Профиль через понижение: исходная поверхность и результат заполнения. Закрашена поднятая часть.

| Параметр                                | Что задаёт                                                                                  | По умолчанию / совет |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Входная ЦМР                             | Растр рельефа.                                                                              | -                    |
| Заполнить понижения перед расчётом      | Гидрологическая коррекция до D8, иначе поток встанет в ямах.                                | вкл.                 |
| Epsilon уклона при заполнении, м (доп.) | Минимальный уклон на плоскостях.                                                            | 0.001                |
| Направления стока (коды ESRI)           | Выход: байтовый растр направлений. E=1, SE=2, S=4, SW=8, W=16, NW=32, N=64, NE=128, сток=0. | -                    |
| Аккумуляция, ячеек                      | Выход: float32, число ячеек выше по течению.                                                | -                    |

Семантика границ выбрана осознанно. Ячейка на рамке грида уходит наружу только когда у неё нет более низкого соседа внутри, иначе рвались бы потоки, идущие вдоль края. Береговая ячейка, наоборот, льёт в соседний nodata (море, вырез) даже при наличии более низкого соседа на суше.

Флажок **Заполнить понижения перед расчётом** включён по умолчанию: на сырой ЦМР поток останавливается в ямах и аккумуляция обрывается. Расчёт векторизован полностью, грид 2000×2000 считается за секунды.

## 2.06 Речная сеть

Извлекает речную сеть из ЦМР: ячейки с аккумуляцией не ниже порога связываются в звенья от истоков и узлов слияния вниз по течению.

| Параметр                 | Что задаёт                                                                                             | По умолчанию / совет |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Входная ЦМР              | Растр рельефа.                                                                                         | -                    |
| Порог аккумуляции, ячеек | Минимум ячеек водосбора для начала русла. Гуще сеть - меньше порог. 1000 при 30 м примерно 0.9 кв. км. | 1000                 |

| Параметр                                | Что задаёт                                                                                    | По умолчанию / совет |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Заполнить понижения перед расчётом      | Гидрологическая коррекция до трассировки.                                                     | вкл.                 |
| Epsilon уклона при заполнении, м (доп.) | Минимальный уклон на плоскостях.                                                              | 0.001                |
| Речная сеть                             | Выход: линии с полями order (Стралер), acc_out, length_m. Вершины направлены вниз по течению. | -                    |

**Порог аккумуляции** задаётся в ячейках и означает площадь водосбора, с которой начинается река: площадь водосбора истока, делённая на площадь ячейки. Для ЦМР 30 м порог 1000 даёт начало рек с водосбора около 0.9 кв. км. Меньший порог даёт гуще сеть.

Поля выхода: **order** - порядок Стралера (у истоков 1, при слиянии двух равных порядок растёт), **acc\_out** - аккумуляция в замыкании звена, **length\_m** - длина. Вершины линий идут вниз по течению, поэтому слой без подготовки подходит тальвегами в 2.03 и сравнивается с водотоками OSM из 2.02: наложение извлечённой сети на реальную - быстрая проверка качества ЦМР.

## 2.07 Бассейны и водоразделы

Делит территорию на бассейны стока, границы полигонов - водоразделы.

| Параметр                                | Что задаёт                                                            | По умолчанию / совет |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Входная ЦМР                             | Растр рельефа.                                                        | -                    |
| Точки замыкания                         | Точки-створы бассейнов.<br>Пусто = бассейны от устьев по порогу.      | пусто                |
| Порог аккумуляции устья, ячеек          | Порог для устьев, когда точки не заданы.                              | 1000                 |
| Заполнить понижения перед расчётом      | Гидрологическая коррекция до расчёта.                                 | вкл.                 |
| Радиус притяжки точек, м (доп.)         | Точка замыкания притягивается к максимуму аккумуляции в этом радиусе. | 150                  |
| Epsilon уклона при заполнении, м (доп.) | Минимальный уклон на плоскостях.                                      | 0.001                |
| Бассейны (полигоны)                     | Выход: полигоны с полями basin, area_m2.                              | -                    |
| Бассейны (растр меток)                  | Выход: растр целочисленных меток бассейнов.                           | -                    |

Два режима. С **точками замыкания** каждая точка притягивается к ячейке с наибольшей аккумуляцией в радиусе притяжки (иначе точка, поставленная на глаз рядом с рекой, соберёт крошечный склоновый бассейн) и собирает весь водосбор выше себя. Без точек бассейны строятся автоматически от устьев: ячеек, откуда поток покидает грид, с аккумуляцией не ниже порога. Ячейки, не попавшие ни в один бассейн, получают метку 0 и в полигоны не выводятся.

Поля выхода: **basin** - номер бассейна, **area\_m2** - площадь по числу ячеек. Дополнительно можно записать растр меток. Разметка идёт прыжками указателей по графу стока, поэтому даже длинные извилистые водосборы считаются за доли секунды.

## 2.08 Уклон и экспозиция

Уклон в градусах и экспозиция по ядру Horn 3×3, как в gdaldem. Экспозиция - азимут направления спуска в градусах от севера по часовой стрелке: север 0, восток 90. У плоских ячеек экспозиция равна -1, чтобы не путать её с северной. Ячейки nodata и их соседи получают nodata: ядро 3×3 через дыры не считается.

| Параметр            | Что задаёт                                   | По умолчанию / совет |
|---------------------|----------------------------------------------|----------------------|
| Входная ЦМР         | Растр рельефа.                               | -                    |
| Уклон, градусы      | Выход: растр уклона (Horn 3x3, как gdaldem). | -                    |
| Экспозиция, градусы | Выход: азимут спуска, плоские участки = -1.  | -                    |

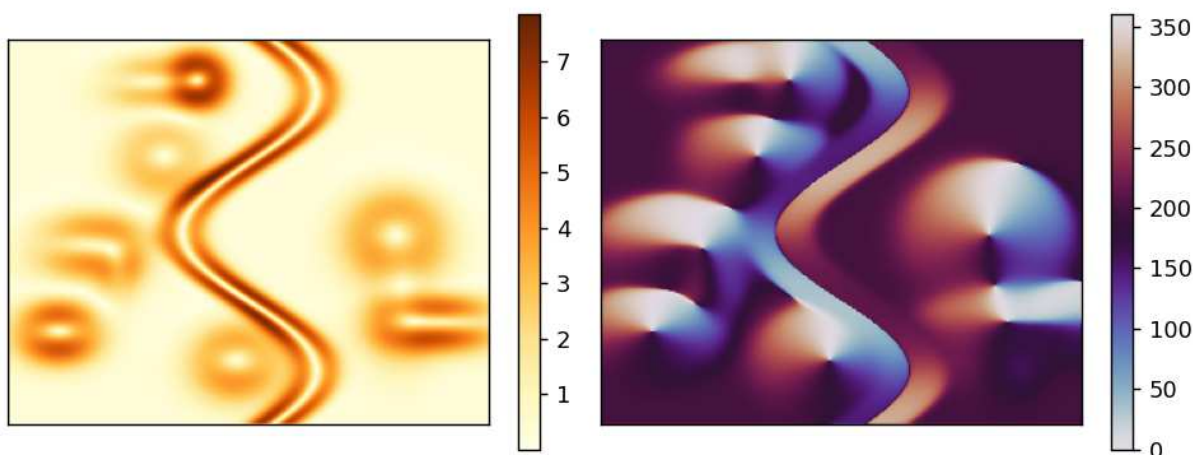


Рис. 20: Уклон (слева) и экспозиция (справа) демо-рельефа. Циклическая палитра экспозиции сшивает 0 и 360 градусов.

## 2.09 Вершины

Находит вершины: ячейки, самые высокие в квадратном окне заданного радиуса, с превышением над минимумом окна не меньше порога.

| Параметр                  | Что задаёт                                                                                 | По умолчанию / совет |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Входная ЦМР               | Растр рельефа.                                                                             | -                    |
| Радиус окна, м            | Подавление второстепенных вершин в этом радиусе.                                           | 500                  |
| Минимальное превышение, м | Отсекает мелкие бугры ниже порога над окружением.                                          | 20                   |
| Вершины (точки)           | Выход: точки с полями z, drop. Лекарство для макушек выше последней замкнутой горизонтали. | -                    |

Два фильтра работают в паре. **Радиус окна** отсекает второстепенные макушки рядом с главной: из двух вершин ближе радиуса остаётся более высокая. **Минимальное превышение**

отсекает кочки на равнине: локальный максимум, поднимающийся над окрестностью на метр, вершиной не считается. Плоские макушки дают одну вершину, а не россыпь.

Поля выхода: **z** - высота, **drop** - превышение над минимумом окна. Слой сравнивается с вершинами OSM из 2.02: совпадение отметок *ele* с высотами ЦМР - ещё одна быстрая проверка данных.

## 2.10 Демо-рельеф

Служебный генератор: синтетический рельеф из наклонной равнины, холмов и извилистой долины с постоянным падением. Рельеф детерминирован по зерну, между холмами осознанно остаются локальные понижения, чтобы инструменту заполнения было что показывать. Все иллюстрации этой главы построены на нём.

| Параметр                              | Что задаёт                                          | По умолчанию / совет |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------|
| Ширина, ячеек                         | Размер демо-грида по X.                             | 300                  |
| Высота, ячеек                         | Размер демо-грида по Y.                             | 300                  |
| Размер ячейки, м                      | Шаг демо-грида.                                     | 30                   |
| Зерно генератора                      | Воспроизводимость случайного рельефа.               | 42                   |
| СК выхода (метрическая)               | Система координат демо-растра.                      | EPSG:32640           |
| Компактный int16 (доп.)               | Целочисленный выход для поставки демо.              | выкл.                |
| Демо-рельеф                           | Выходной растр.                                     | -                    |
| Точки створов (демо)                  | Три точки у тальвегов для инструмента 2.15.         | создаётся            |
| Трассы канав (демо)                   | Две ломаные поперёк тальвегов для инструмента 2.16. | создаётся            |
| Доля площади под область работ (доп.) | Размер области под проектную площадку.              | 0.4                  |
| Сдвиг отметки площадки, м (доп.)      | Уводит баланс в привозной или вывозной грунт.       | 0                    |
| Проектная поверхность (демо)          | Пара к рельефу для инструмента 2.18.                | выкл.                |
| Участки работ (демо)                  | Три полигона для разбивки ведомости 2.18.           | выкл.                |

Инструмент существует для примеров руководства, тестов и работы без сети. Живые данные даёт 2.01. Флажок **Компактный int16** отдаёт растр в целых метрах для поставки демо-фрагментов.

### Пара поверхностей для объёмов

Два выхода, по умолчанию выключенных, дают готовую пару для инструмента **2.18 Насыпи и выемки**: проектную площадку и полигоны участков работ. Площадка горизонтальная, снаружи области работ остаётся натуральный рельеф.

Отметка площадки берётся средним рельефа внутри области, и это не вкусовщина, а точный ответ. Объём есть сумма разностей, умноженная на площадь ячейки, и нетто обращается в ноль ровно тогда, когда отметка равна среднему. Медиана делит пополам ячейки, а не кубометры, и баланс при ней не сходится. Поэтому демо сразу даёт сошедшийся баланс, а сдвиг отметки в дополнительных параметрах уводит его в привозной или вывозной грунт: все три вердикта 2.18 проверяются в два прогона.

Вместе с рельефом выдаются три демо-точки створов и две демо-трассы канав: нагорная канава выше самого сильного тальвега и кювет ниже по склону, обе ломаные с изломом, чтобы проверялась и растеризация трассы с поворотом. Они ставятся у самых сильных тальвегов, разнесённых по гриду, и нарочно сдвигаются на несколько ячеек в сторону от водотока: так видно, как притяжка в инструменте 2.15 возвращает створ на водоток. Точки детерминированы тем же зерном, что и рельеф.

## Овражно-балочная сеть

Флажок **Овражно-балочная сеть** врезает в рельеф тальвеги с крутыми бортами и отвершками, входящими под острым углом. Врез углубляется вниз по течению, как у настоящего оврага: вершина мелкая, устье глубокое.

Нужен этот режим для проверочных наборов. Узкий врез между соседними горизонталями это самое тяжёлое место для любой интерполяции: горизонтали его почти не описывают, и поверхность, построенная по ним, срезает овраг. На профиле поперёк это видно сразу, а инструменты 2.11 и 2.12 дают этому число.

## Куда ложится демо

Если охват не задан, демо ложится к слоям проекта: их общий охват приводится к выбранной системе координат и берётся за место укладки. В пустом проекте деваться некуда, и демо создаётся в условном месте, одном и том же, чтобы примеры руководства воспроизводились. В местной системе координат, например рудничной, условное место оказывается далеко от рабочих данных, поэтому в пустом проекте задавайте параметр **Куда положить (охват)**: рельеф ляжет туда, а размер грида посчитается от охвата и размера ячейки.

## 2.11 Разделить горизонтали для проверки

Инструмент делит набор горизонталей на два: по одному строят рельеф, по второму проверяют результат. Нужен он затем, чтобы получить цифру, которую можно предъявить.

### Зачем разделять

Соблазн проверить рельеф прост: взять исходные горизонтали, снять с построенной ЦМР значения в их точках и посчитать невязку. Цифра выйдет хорошая, но она измеряет не то, что кажется. Интерполятор эти точки видел, они были входными данными, и воспроизвести их он почти обязан. Это проверка воспроизведения входа, а не точности предсказания.

Настоящая проверка требует данных, которых модель не видела. Их и создаёт этот инструмент.

### Почему делим по отметкам, а не по объектам

Убрать из построения отдельные звенья одной горизонтали бессмысленно: соседние звенья того же уровня подскажут ответ, и проверка окажется завышенной. Поэтому отложенный уровень исчезает целиком, со всеми своими звеньями. Восстановить его интерполятор может только по соседним уровням, а это и есть предсказание.

Крайние отметки набора всегда остаются в построении. За пределами набора интерполятор экстраполирует, и невязка там измеряла бы не то, ради чего проверка затевалась.

### Что на выходе

Два слоя, **Горизонталы для построения** и **Горизонталы для проверки**. Оба получают поле **hold**: 0 для построения, 1 для проверки. Инструмент **Невязка горизонталей против ЦМР**

это поле узнаёт сам и печатает две цифры отдельно, поэтому проще подать ему объединённый набор, чем считать дважды.

## Рабочий порядок

Разделить горизонтالي. Построить рельеф по набору для построения, например через **Topo2Raster**. Измерить невязку по обоим наборам сразу. Сравнить две цифры.

## Параметры

| Параметр                       | Что задаёт                                                                        | По умолчанию / совет |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Горизонтали (линии)            | Исходный набор.                                                                   | -                    |
| Поле отметки                   | Числовое поле высоты горизонтالي.                                                 | -                    |
| Откладывать каждую N-ю отметку | Шаг прореживания по уровням. 4 означает, что в проверку уходит примерно четверть. | 4                    |
| Сдвиг выбора (Доп.)            | Смещает выбор уровней, чтобы прогнать проверку по разным подмножествам.           | 0                    |

## 2.12 Невязка горизонталей против ЦМР

Инструмент измеряет, насколько построенная ЦМР воспроизводит исходные горизонтали. В точках вдоль горизонтали берётся значение раstra и сравнивается с отметкой самой горизонтالي. Невязка положительна там, где ЦМР лежит ниже горизонтали.

### Какие числа выдаются

Среднее это смещение: ненулевое означает, что поверхность в целом сдвинута по высоте. СКО и RMSE это разброс. Медиана модуля устойчива к единичным выбросам, максимум показывает худшее место на площади.

Отдельно считается доля точек, промахнувшихся больше чем на половину сечения рельефа. Это практическая величина: если она заметна, горизонталь, проведённая по такой ЦМР, встанет не там, где была исходная, и карта перестанет совпадать сама с собой.

Сечение рельефа инструмент определяет по набору отметок сам, как наименьшую разность между соседними уровнями. Если набор собран из разных источников, задайте сечение вручную.

### Две цифры вместо одной

Если в слое есть поле **hold** от инструмента 2.11, невязка считается отдельно для построения и для проверки, и в журнал уходят обе строки. Первая говорит, как модель воспроизводит вход, вторая - как она предсказывает. Вторая всегда хуже первой, и это нормально. Смотреть надо на разрыв между ними: если он велик, модель хорошо запоминает и плохо обобщает, то есть форма рельефа между горизонталями восстанавливается неверно.

Без поля **hold** инструмент считает одну цифру и предупреждает в журнале, что это воспроизведение входа.

## Отчёт

HTML-отчёт содержит таблицу чисел по наборам, гистограмму невязок с отмеченными границами в половину сечения, разброс средней невязки по отметкам и короткий разбор: есть ли систематическое смещение, велик ли разброс относительно сечения, заметна ли доля промахов, есть ли разрыв между воспроизведением и предсказанием.

Разброс по отметкам стоит смотреть внимательно. Если невязка растёт к вершинам или к тальвегам, это говорит о срезании форм, а не о случайном шуме.

## Слой точек

Выдаётся точечный слой невязок с полями: **fid\_src** (объект исходной горизонтали), **elev** (отметка), **z\_dem** (значение ЦМР), **resid** и **abs\_resid**, **hold**. Раскрасьте его по **resid** расходящейся шкалой - и места, где поверхность систематически уходит вниз или вверх, видны сразу, без всякой статистики.

## Параметры

| Параметр                          | Что задаёт                                                                  | По умолчанию / совет |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Горизонтالي (линии)               | Слой с отметками. Годится объединённый набор с полем hold.                  | -                    |
| Поле отметки                      | Числовое поле высоты.                                                       | -                    |
| ЦМР (построенный рельеф)          | Растр, который проверяем.                                                   | -                    |
| Канал ЦМР (Доп.)                  | Канал раstra.                                                               | 1                    |
| Шаг опробования вдоль горизонтали | 0 - только вершины. Больше нуля добавляет точки на длинных прямых участках. | 0                    |
| Выборка раstra (Доп.)             | Билинейно или ближайший. Для гладкой поверхности точнее билинейно.          | билинейно            |
| Сечение рельефа (Доп.)            | 0 - определить по отметкам.                                                 | 0                    |
| Точки невязок                     | Выходной точечный слой.                                                     | создаётся            |
| Отчёт о невязках (HTML)           | Таблица, гистограмма, разбор.                                               | создаётся            |

## 2.13 Диагностика террасинга ЦМР

Инструмент ищет террасинг: характерную болезнь рельефа, построенного по горизонталям. Склон идёт ступенями, возле уровня горизонтали полка, между уровнями резкий сброс. На отмывке это выглядит как свадебный торт, на профиле как лесенка. Уклоны в таком рельефе неверны, а расчёты стока по нему рвутся.

### Два независимых признака

**Вертикальная кривизна** это вторая производная вдоль склона. У ступенчатой поверхности она даёт всплески на сбросах и почти нули на полках, а вся картина полосами повторяет рисунок горизонталей. Растр кривизны выдаётся на выход, и террасинг на нём виден глазами, без всякой статистики.

**Притяжение отметок к уровням** это прямая проверка по самим значениям, без производных. У здоровой поверхности отметки между соседними уровнями распределены более-менее равномерно, поэтому доля ячеек в узкой полосе вокруг уровня близка к ширине

этой полосы, и отношение выходит около единицы. У террасированной поверхности отметки липнут к уровням, и отношение растёт.

Читается отношение так. Около единицы - признаков нет. Полтора - повод посмотреть растр кривизны глазами. Два и выше - террасинг.

Два признака стоит смотреть вместе. Кривизна убедительна визуально, но её всплески бывают и от настоящих форм рельефа, например от бровок. Притяжение к уровням даёт число, но не показывает, где именно беда. Вместе они отвечают и на вопрос «есть ли», и на вопрос «где».

## Сечение рельефа

Инструмент считает фазу отметки внутри сечения, поэтому сечение ему необходимо. Его можно задать вручную или подать слой горизонталей: тогда берутся и сечение, и базовая отметка от реального набора. Второй путь надёжнее, если отметки не начинаются от круглого числа.

## Плоские участки в счёт не идут

Ячейки с околонулевым уклоном исключаются из индекса притяжения. Порог задаётся долей сечения: ячейка не учитывается, если перепад высот на ней меньше сотой доли сечения. При сечении 0.5 м это 5 мм на ячейку. Параметр **Не учитывать ячейки с перепадом меньше, доля сечения** лежит в дополнительных, ноль его отключает.

Без этого отсева индекс врёт на любой реальной матрице с водоёмом. Отметки водной глади стоят на одном месте и все попадают в одну фазу внутри сечения, из-за чего распределение перекашивается, а индекс уезжает вниз и показывает ложное благополучие. На матрице, где водохранилище занимало 44.5 процента площади, индекс без отсева давал 0.50 вместо 0.97, а по одной суше выходило 1.00.

Доля исключённых ячеек печатается в журнал и попадает в отчёт. Это важно видеть: если инструмент выбросил половину площади, вы должны знать об этом, а не гадать, почему цифра изменилась.

## Отчёт

HTML-отчёт содержит таблицу чисел и гистограмму фазы, то есть распределение отметок внутри сечения. Ровная гистограмма означает, что террасинга нет. Пик в нуле означает, что отметки собираются у уровней, и поверхность ступенчатая.

## Чем лечить

Террасинг лечится структурными линиями (тальвеги, бровки, водоразделы) и уплотнением исходных данных, а не сглаживанием. Сглаживание уберёт ступени вместе с формами рельефа, и цифры станут лучше при том, что карта станет хуже.

## Параметры

| Параметр                            | Что задаёт                                                      | По умолчанию / совет |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------|
| ЦМР (проверяемый рельеф)            | Растр, который проверяем.                                       | -                    |
| Канал ЦМР (Доп.)                    | Канал раstra.                                                   | 1                    |
| Сечение рельефа                     | 0 - взять из слоя горизонталей.                                 | 0                    |
| Горизонталы для определения сечения | Необязательный слой, из него берутся сечение и базовая отметка. | -                    |

| Параметр                               | Что задаёт                                              | По умолчанию / совет |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------|
| Поле отметки горизонталей              | Числовое поле высоты.                                   | -                    |
| Базовая отметка уровней (Доп.)         | Отсчёт уровней, если сечение задано вручную.            | 0                    |
| Полуширина полосы вокруг уровня (Доп.) | Доля сечения. Ожидаемая доля равна удвоенному значению. | 0.1                  |
| Вертикальная кривизна                  | Выходной растр.                                         | создаётся            |
| Отчёт о террасинге (HTML)              | Таблица, гистограмма фазы, разбор.                      | создаётся            |

## 2.14 Убрать ступени (сглаживание с ограничением)

Инструмент лечит террасинг: убирает ступени со склонов, не сдвигая сами горизонталей.

### Как это возможно

Поверхность сглаживается итеративно, но каждой точке запрещено уходить от исходного значения дальше заданной доли сечения. По умолчанию это половина сечения, то есть ровно ошибка квантования: поверхность, построенная по горизонталям с шагом сечения, и так известна не точнее.

Отсюда два свойства, ради которых всё и делается. Метод не может выдумать формы тоньше, чем позволяет исходное сечение, потому что размах правки ограничен сверху. И он не может перекинуть точку через горизонталь, так как сдвиг меньше половины шага между уровнями.

На эталонном ступенчатом рельефе индекс притяжения падает с 5.00 до 1.13, а средняя ошибка против истинной поверхности с 1.25 м до 0.12 м.

### Лечение самопроверяемое

Индекс притяжения к уровням считается до и после правки, обе цифры уходят в журнал вместе с наибольшим фактическим сдвигом поверхности. Если после лечения индекс остался выше двойки, инструмент прямо говорит, что ступени не ушли, и советует добавить итераций или проверить сечение.

Отчёт HTML содержит таблицу чисел до и после, две гистограммы фазы рядом и разбор. Это готовый документ для заказчика или рецензента: видно, что было, что стало и какой ценой.

### Чего инструмент не делает

Он не возвращает того, чего в данных нет. Если узкий врез срезан при построении рельефа, сглаживание его не восстановит: правка ограничена половиной сечения, а врез глубже. На водной глади он тоже не поможет, там нужна маска, а не сглаживание.

### Параметры

| Параметр                             | Что задаёт                                | По умолчанию / совет |
|--------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|
| ЦМР со ступенями                     | Проверяемый растр.                        | -                    |
| Канал ЦМР (Доп.)                     | Канал растра.                             | 1                    |
| Сечение рельефа                      | 0 - взять из слоя горизонталей.           | 0                    |
| Горизонталей для определения сечения | Необязательный слой, из него берётся шаг. | -                    |

| Параметр                              | Что задаёт                                             | По умолчанию / совет |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------|
| Поле отметки горизонталей             | Числовое поле высоты.                                  | -                    |
| Итераций сглаживания                  | Больше значит глаже.<br>Полсотни хватает почти всегда. | 50                   |
| Допустимый сдвиг, доля сечения (Доп.) | Ноль запрещает правку вовсе.                           | 0.5                  |
| Рельеф без ступеней                   | Выходной растр.                                        | создаётся            |
| Отчёт до и после (HTML)               | Таблица, гистограммы, разбор.                          | создаётся            |

## 2.15 Отчёт по створу

Инструмент считает морфометрию водосбора от **створа** - точки замыкания на водотоке. Это классическая задача инженерной гидрологии и изысканий: характеристики бассейна от заданной точки. Инструменты 2.05 - 2.07 дают сток, речную сеть и бассейны по территории в целом, а 2.15 отвечает на вопрос про конкретный створ.

### Как это работает

Каждая точка створа притягивается к ячейке с наибольшей аккумуляцией в радиусе притяжки, поэтому створ можно ставить на глаз рядом с тальвегом, а не попадать в ячейку водотока мышью. От притянутой ячейки собирается полный водосбор, по нему считается зональная статистика, а главный водоток трассируется вверх по решётке: из каждой ячейки шаг в соседа с наибольшей аккумуляцией, до ячейки без притоков.

Водосборы соседних створов на одном водотоке вкладываются друг в друга: каждый створ получает свой полный бассейн, а не остаток после вышележащего. Это отличает 2.15 от 2.07, где территория делится на непересекающиеся бассейны.

### Что считается

| Показатель              | Поле      | Единицы            |
|-------------------------|-----------|--------------------|
| Площадь бассейна        | area_km2  | км <sup>2</sup>    |
| Средняя высота          | z_mean    | м                  |
| Минимальная высота      | z_min     | м                  |
| Максимальная высота     | z_max     | м                  |
| Средний уклон бассейна  | slope_deg | градусы (Horn 3x3) |
| Отметка створа          | z_gauge   | м                  |
| Длина главного водотока | stream_km | км                 |
| Падение водотока        | fall_m    | м                  |
| Средний уклон водотока  | slope_ppm | промилле           |
| Ячеек в бассейне        | cells     | шт.                |

Величина, которую посчитать не из чего, пишется пустым значением, а не нулём: ноль это измерение, пусто это его отсутствие.

### Параметры

| Параметр                     | Что задаёт                               | По умолчанию / совет |
|------------------------------|------------------------------------------|----------------------|
| Входная ЦМР                  | Рельеф в метрах в метрической СК.        | -                    |
| Точки створов                | Точечный слой, по точке на створ.        | -                    |
| Радиус притяжки, м (доп.)    | Окно поиска максимальной аккумуляции.    | 150                  |
| Заполнить понижения          | Подготовка рельефа перед расчётом стока. | вкл.                 |
| Epsilon уклона, м (доп.)     | Наклон засыпки при заполнении.           | как в 2.04           |
| Водосборы створов (полигоны) | Полигоны с атрибутами по таблице выше.   | создаётся            |
| Отчёт по створам (HTML)      | Таблица на каждый створ.                 | создаётся            |

Ключевые цифры по каждому створу дублируются в журнал Processing двумя строками, чтобы результат читался без открытия таблицы атрибутов.

## Быстрая проверка на демо

Запустите **2.10 Демо-рельеф**: кроме раstra он выдаст слой **Точки створов (демо)** - три точки у тальвегов, сдвинутые в сторону от водотока. Подайте рельеф и эти точки в 2.15 с радиусом притяжки по умолчанию. Полигоны лягут по водоразделам, а в отчёте у створов одного водотока совпадёт падение и будет расти уклон вверх по течению.

## Границы применимости

Инструмент считает морфометрию бассейна и только её. Расходы, модули стока, гидравлика и снеготаяние сознательно не входят в задачу: это расчётная гидрология по нормативам, отдельная тема. Единицы предполагаются метрическими, ЦМР в метрах в метрической системе координат.

Водосборы строятся по топологии рельефа. На территориях без чётких границ стока - плоских поймах, при гидравлических перетоках и подпорах - результат следует проверять гидродинамическим моделированием.

## 2.16 Водосбор. Линии и контуры (канавы, карьеры)

Инструмент считает площадь водосбора приёмника: нагорной канавы, лотка, кювета дороги или контура карьера. Вопрос ставится так: какую площадь перехватывает приёмник, если самого приёмника на ЦМР ещё нет.

### Как это работает

Врезать трассу в рельеф для этого не нужно. Трасса растеризуется в ячейки грида, все они берутся приёмниками, и водосбор собирается как множество ячеек, чей путь стока приходит в любую ячейку трассы. Трасса может быть ломаной, может пересекать водораздел, может выходить за рамку ЦМР - наружная часть просто не участвует.

Растеризация идёт с шагом поля ячейки, поэтому на изломах и диагоналях трассы нет пропусков, через которые вода «протекала» бы мимо приёмника.

Водосборы соседних трасс вкладываются друг в друга: нижняя по склону канава получает и то, что перехватывает верхняя. Это то же поведение, что у створов в 2.15, и оно правильное - каждая трасса получает свой полный водосбор, а не остаток.

## Контур вместо линии

Входом принимаются и линии, и полигоны. Полигон считается приёмником целиком: и контур, и вся площадь внутри.

Для карьера это принципиально. Внутри он депрессия, после заполнения понижений направления стока там становятся условными - порядок обхода плоской залитой поверхности назначает их произвольно. Если приёмником взять только линию борта, часть внутренних ячеек «стечёт» мимо неё по этим условным направлениям и утащит за собой внешние. Опора на всю внутренность снимает вопрос: что бы ни творилось с направлениями в яме, вся её площадь уже в водосборе, а снаружи вода трассируется по реальному рельефу.

Дырки полигона входят в приёмник наравне с остальной площадью - внешнего рельефа внутри контура нет. Мультиполигон обрабатывается по частям. Обводить борт линией больше не нужно, подаётся готовый контур.

## Врезка трассы

Отдельная галочка **Врезать трассу в рельеф** отвечает на другой вопрос: удержит ли канава поток, если она мельче местных форм рельефа. Врезка опускает рельеф вдоль трассы на заданную глубину, и дальше сток считается уже по изменённому рельефу.

Врезка меняет гидрологию намеренно, поэтому по умолчанию выключена, а результат зависит от заданной глубины. Факт врезки и глубина печатаются в журнал и попадают в HTML-отчёт, чтобы цифру нельзя было принять за расчёт по исходному рельефу.

## Что считается

| Показатель               | Поле        | Единицы            |
|--------------------------|-------------|--------------------|
| Площадь водосбора        | area_km2    | км <sup>2</sup>    |
| Средняя высота           | z_mean      | м                  |
| Минимальная высота       | z_min       | м                  |
| Максимальная высота      | z_max       | м                  |
| Средний уклон водосбора  | slope_deg   | градусы (Horn 3x3) |
| Длина трассы или контура | trace_km    | км                 |
| Площадь приёмника        | seed_km2    | км <sup>2</sup>    |
| Ячеек приёмника          | trace_cells | шт.                |
| Ячеек в водосборе        | cells       | шт.                |

## Параметры

| Параметр                      | Что задаёт                                  | По умолчанию / совет |
|-------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|
| Входная ЦМР                   | Рельеф в метрах в метрической СК.           | -                    |
| Трассы и контуры              | Линии или полигоны, по объекту на приёмник. | -                    |
| Все объекты как один водосбор | Общий водосбор вместо отдельных.            | выкл.                |
| Врезать трассу в рельеф       | Проверка удержания потока.                  | выкл.                |
| Глубина врезки, м (доп.)      | Насколько опустить рельеф вдоль трассы.     | 2.0                  |
| Заполнить понижения           | Подготовка рельефа перед расчётом стока.    | вкл.                 |
| Epsilon уклона, м (доп.)      | Наклон засыпки при заполнении.              | как в 2.04           |

| Параметр                   | Что задаёт                             | По умолчанию / совет |
|----------------------------|----------------------------------------|----------------------|
| Водосборы трасс (полигоны) | Полигоны с атрибутами по таблице выше. | создаётся            |
| Отчёт по трассам (HTML)    | Таблица на каждую трассу.              | создаётся            |

## Быстрая проверка на демо

**2.10 Демо-рельеф** выдаёт слой **Трассы канав (демо)**: нагорную канаву выше сильного тальвега и кювет ниже по склону, обе ломанные с изломом. Подайте рельеф и этот слой в 2.16. Водосбор должен лечь выше трасс по стоку и упереться в водоразделы, а не в рамку грида.

## Границы применимости

Инструмент отвечает на вопрос о площади, а не о расходе. Расходы, модули стока и пропускная способность канавы - расчётная гидрология по нормативам, и в задачу не входят. Единицы предполагаются метрическими.

Водосборы строятся по топологии рельефа. На территориях без чётких границ стока - плоских поймах, при гидравлических перетоках и подпорах - результат следует проверять гидродинамическим моделированием.

## 2.18 Насыпи и выемки (объёмы работ)

Инструмент считает объёмы земляных работ между двумя поверхностями: что насыпано, что снято и сходится ли баланс. Он нужен везде, где есть съёмка до и после или проектная поверхность: площадка под планировку, отвал, карьер, заиление пруда, оседания земной поверхности.

Формула проста до неприличия: разность отметок по ячейкам, умноженная на площадь ячейки. Вся сложность лежит не в ней, а вокруг неё, и об этом остальные разделы.

## Знак и поверхность сравнения

Разность считается «стало минус было». Положительная разность это насыпь, материал добавлен. Отрицательная это выемка, материал снят. В ArcGIS в инструменте Cut/Fill знак обратный, при сверке цифр это стоит помнить.

Поверхность сравнения задаётся растром или, если её нет, одной отметкой числом. Отметка удобна для площадки под планировку и для подсчёта от уреза воды: подавать растр постоянной высоты ради этого не нужно.

## Приведение к одной сетке

Две матрицы почти никогда не лежат на одной сетке. Хозяином сетки берётся первая поверхность, вторая приводится к ней билинейно. Ближайший сосед здесь не годится: он возвращает ступени, ровно те, что ловит диагностика террасинга. За краем данных объём не считается, высоты не экстраполируются.

В журнал печатаются начало сетки, шаг и число ячеек обеих матриц, а также было ли приведение. Это не украшение, а рабочий инструмент, см. следующий раздел.

## Почему цифры расходятся с другими программами

Почти никогда не из-за формулы. Билинейное приведение объём сохраняет: веса билинейки в сумме дают единицу, поэтому сдвиг сетки сам по себе ничего не меняет. Это закреплено тестом.

Расхождение даёт состав ячеек: чуть иначе обрезанная рамка, другая маска, полшага на границе участка работ. Поэтому при сверке с Civil, Кредо или любой другой программой сначала сравнивайте описание сетки из журнала и число учтённых ячеек, и только потом объёмы. В девяти случаях из десяти на этом разбирательство и заканчивается.

## Мёртвая зона

Две поверхности, полученные разными способами, всегда шумят на сантиметры. Без отсечки весь этот фон попадает то в насыпь, то в выемку и раздувает обе цифры, не меняя нетто.

Мёртвая зона задаётся в метрах: ячейки, где модуль разности меньше этого числа, считаются неизменными. По умолчанию отсечки нет. Задавайте её осознанно и указывайте в отчёте: она входит в ведомость отдельной строкой именно для этого.

## Участки и баланс

Полигоны участков считаются отдельно, каждый со своими числами. Поле названия участка может быть числовым или текстовым. В ведомости по участкам есть строка итога, и она должна сходиться с шапкой: это простая и надёжная проверка того, что растеризация участков не потеряла и не задвоила ячейки.

Вердикт по балансу смотрит на долю нетто в обороте, а не на его величину. Сто кубов невязки при обороте в сто тысяч это баланс, а при обороте в двести кубов это вывоз половины. Допуск задаётся долей оборота, по умолчанию пять процентов.

## Выходы

Растр разности в метрах, положительное это насыпь. Ведомость HTML с итогом, разбивкой по участкам и описанием сетки. Слой **Участки с объёмами**: те же полигоны, что подали на вход, плюс объёмы в атрибутах (fill\_vol, cut\_vol, net\_vol, площади, наибольшие отметки, число ячеек и вердикт). Ведомость нужна для согласования, а подписать участки прямо на карте можно только атрибутами, поэтому выход отдельный.

Флажок **Обрезать растр разности по участкам** гасит разность за контуром работ. За контуром она складывается из шума съёмки, а растянутая на неё цветовая шкала прячет то, ради чего растр и смотрят. На числа обрезка не влияет: статистика считается до неё, и в ведомости остаются оба итога, по всей площади и по участкам.

Линия нулевых работ отдельным инструментом не строится, и это осознанно: это изолиния нуля по растру разности, стройте её инструментом **1.04 Изолинии из растра**.

## Параметры

| Параметр                            | Что задаёт                                      | По умолчанию / совет |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------|
| Поверхность «стало»                 | Проектная или новая съёмка. Задаёт сетку.       | обязательна          |
| Поверхность «было»                  | Исходная съёмка. Пусто - сравнение с отметкой.  | пусто                |
| Отметка сравнения, м                | Работает, когда растра «было» нет.              | 0                    |
| Участки работ (полигоны)            | Разбивка ведомости по участкам.                 | пусто                |
| Поле названия участка               | Числовое или текстовое.                         | пусто                |
| Мёртвая зона по высоте, м           | Отсечка фоновых шума.                           | 0                    |
| Обрезать растр разности по участкам | Гасит разность за контуром. На числа не влияет. | выкл.                |

| Параметр                      | Что задаёт                                | По умолчанию / совет |
|-------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|
| Участки с объёмами (полигоны) | Полигоны участков с объёмами в атрибутах. | создаётся            |
| Допуск баланса (доп.)         | Доля оборота для вердикта.                | 0.05                 |
| Растр разности                | Выходной растр, насыпь положительна.      | создаётся            |
| Ведомость объёмов (HTML)      | Отчёт с итогом и участками.               | создаётся            |

## Быстрая проверка на демо

**2.10 Демо-рельеф** выдаёт готовую пару: включите выходы **Проектная поверхность (демо)** и **Участки работ (демо)**. Подайте площадку как «стало», рельеф как «было», участки полигонами. Насыпь и выемка обязаны выйти равными число в число, нетто нулевым, вердикт про сошедшийся баланс. Сдвиг отметки площадки в дополнительных параметрах 2.10 уводит баланс в привозной или вывозной грунт, так что все три вердикта проверяются в два прогона.

Совпадение насыпи с выемкой при нулевом сдвиге это ещё и независимая проверка самого инструмента: ошибка в формуле или в приведении сеток здесь бы и вылезла.

## Границы применимости

Объём геометрический. Разрыхление, уплотнение и послойные грунты здесь не применяются, это работа проектировщика.

Точность у границы работ определяется размером ячейки: объём вдоль контура всегда смещён на величину порядка полуячейки на погонный метр границы. На мелком контуре при крупной ячейке это смещение может превысить сам объём, поэтому мелкие площадки считайте на сетке, соразмерной их размеру.

Инструмент не строит откосы с заложением, бермы, послойные ведомости и не сажает проектную поверхность на рельеф. Это работа систем автоматизированного проектирования.

## 2.19 Кандидаты бровок и подошв

Находит места, где уклон меняется быстрее всего, и трассирует их в линии: бровки и подошвы уступов, борта карьеров, кромки насыпей и врезов.

| Параметр                           | Что задаёт                                                                                              | По умолчанию / совет |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Входная ЦМР                        | Растр рельефа по грунту, не DSM. Ячейка из плотности съёмки: 20-25 см при 20 точках на квадратный метр. | -                    |
| Минимальный перепад, м             | Отсечка шума: гребень признака обязан набрать этот перепад рельефа в базе замера.                       | 0.5                  |
| Минимальная длина линии, ячеек     | Отсекает обрывки.                                                                                       | 10                   |
| База замера перепада, ячеек (Доп.) | Полуширина окна, в котором меряется перепад поперёк линии.                                              | 8                    |

**Признак излома - это градиент уклона, а не уклон.** На ровном откосе, даже отвесном, уклон постоянен и признак мал. Признак велик там, где уклон меняется, то есть на самой

бровке и на самой подошве. Знак профильной кривизны делит найденные линии: выпуклый излом даёт бровку, вогнутый подошву, и это уходит в поле **kind** значениями brow и toe.

**Излом без перепада не излом.** Гребень признака отбрасывается до всяких порогов, если в его окрестности нет заданного перепада рельефа. Шум плотной съёмки в сантиметры не набирает его никогда, окрестность настоящей бровки набирает всегда. Это главный фильтр, и он физический, а не статистический: пороги внутренней математики подбираются сами и наружу не вынесены.

**Перепад меряется в базе замера, а не по всей ширине уступа.** Это первое, обо что спотыкаются: у десятиметрового уступа при базе в три ячейки поле **drop** покажет три метра, а не десять. База по умолчанию 8 ячеек в каждую сторону, на метровой ячейке это  $\pm 8$  м, чего хватает на карьерный уступ. Ширина откоса известна вам, а не инструменту, поэтому базу задавайте по ней. В журнал база печатается и в ячейках, и в метрах.

Поля выхода: **kind**, **drop** (перепад, м), **length\_m**, **slope\_deg** (средний уклон сторон). Слой приходит раскрашенным по перепаду, бровки тёплым, подошвы холодным. Классы появляются, только когда перепад действительно разный: на карьере с одинаковыми уступами разброс единицы процентов, и деление на классы резало бы шум, поэтому там остаётся один класс на вид.

**Порог значимости остаётся человеку.** Формального признака бровки не существует, распознавание держится на опыте топографа. Существует перепад, который вы готовы считать уступом, и он разный на карьере, дорожной насыпи и береговом уступе. Поэтому инструмент нарочно отдаёт больше, чем нужно, вместе с числами для отбора, а в журнал печатает проценты перепада - готовую подсказку, где резать. Отбирайте фильтром слоя по полю drop, глядя на карту: пересчитывать при этом ничего не надо.

## 2.20 Бровки и подошвы в работу

Превращает кандидатов из 2.19 в рабочие структурные линии: снимает отметки с ЦМР, собирает формы бровка-подошва и раскладывает их по двум слоям.

| Параметр                   | Что задаёт                                                               | По умолчанию / совет |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Кандидаты (выход 2.19)     | Линейный слой с полем вида.                                              | -                    |
| ЦМР                        | Та же, что подавалась в 2.19.                                            | -                    |
| Поле вида                  | Поле со значениями brow и toe.                                           | kind                 |
| Отсечка по перепаду, м     | Повторяет фильтр 2.19, чтобы не заводить отдельный отфильтрованный слой. | 0 (взять всё)        |
| Предел пути спуска, м      | Дальше этого спуск прекращается, и бровка уходит в непарные.             | 50                   |
| Доля согласных проб (Доп.) | Ниже этой доли форма не собирается.                                      | 0.4                  |

**Формы собираются спуском по склону, а не по близости.** От пробных вершин бровки идёт спуск по направлениям стока, пока не встретится подошва, и подошвы голосуют. Так работает физика уступа: вода с бровки скатывается по откосу ровно к его подошве. На кривом борту с узкими бермами ближайшая по расстоянию подошва часто принадлежит соседнему уступу, и выбор по близости ошибается там, где спуск прав. Предел пути держите близким к заложению откоса: слишком большой предел позволит бровке добежать до чужой подошвы и составить с ней правдоподобную ложную пару.

**Форма это одна подошва и множество бровок при ней.** Трассировка режет длинную бровку на куски: съезд разрывает контур, признак прерывается на пологих участках. Все

куски честно спускаются к той же подошве, поэтому результат группируется по подошве, а не выписывается парами: подошва попадает в выход один раз, а её бровки получают общее поле **link**. Это тот же взгляд, что и в построении поверхности между структурными линиями, где стороны - множества, а не отдельные линии.

**Непарные линии не пропадают молча.** Третий слой собирает их с причиной в атрибуте: спуск не дошёл до подошвы (мал предел пути или бровка ложная) либо спуск разошёлся по разным подошвам (линия склеила два уступа). Наименьшая доля согласных проб печатается в журнал и служит указателем на такую склейку.

Выходы **Верх** и **Низ** идут LineStringZ с полями kind и link, отметки сняты с ЦМР в геометрию. Это готовые входы для построения поверхности и для выгрузки трёхмерными линиями в АвтоКАД и Кредо.

## 2.21 Создать пример карьера (демо)

Строит демо-карьер и, что важнее, истинные структурные линии к нему. Пара растр-линии служит эталоном для 2.19, входом для построения поверхности и учебным примером, и всё это без закрытых данных.

| Параметр                        | Что задаёт                                           | По умолчанию / совет |
|---------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------|
| Ширина, Высота, ячеек           | Размер грида.                                        | 400 x 300            |
| Размер ячейки, м                | Шаг грида.                                           | 1                    |
| Зерно генератора                | Повторяемость: одно зерно - один и тот же карьер.    | 7                    |
| СК выхода                       | Метрическая. При местной СК проекта выбирайте её же. | EPSG:32640           |
| Число уступов                   | Сколько уступов в борту.                             | 3                    |
| Высота уступа, м (Доп.)         | Превышение одного уступа.                            | 10                   |
| Шум съёмки, м (Доп.)            | Имитация погрешности плотной съёмки.                 | 0.03                 |
| Отвал, Сходящаяся канава (Доп.) | Дополнительные формы.                                | включены             |
| Куда положить (охват)           | Кладёт демо на место, размер не меняет.              | по слоям проекта     |

Состав рельефа подобран так, чтобы каждая форма проверяла свою сторону детектора. Эллиптический карьер с уступами и бермами даёт правильные пары. Съезд, прорезающий уступы, даёт **честный разрыв**: на его дуге истинные линии обрываются, и кандидаты обязаны обрываться там же. Отвал с плоским верхом даёт замкнутую пару. Сходящаяся нагорная канава даёт три линии, сходящиеся в точку, - тот случай, где вес поверхности между линиями вырождается, а отметка остаётся верной.

**Охват кладёт демо на место и не меняет его размер.** Формы карьера физичны: уступ 10 м при откосе 7 м. Растянутый до километров карьер превращается в блин, на котором детектору нечего искать, поэтому размер задают только «Ширина» и «Высота». И отдельно про систему координат: если у проекта она местная или неизвестная, выберите её же в «СК выхода». Пересчёт охвата из неизвестной системы в UTM даёт бессмыслицу, и демо уедет неизвестно куда.

Второй выход, **истинные линии**, несёт поля kind (brow, toe, thalweg) и link, а отметки лежат в геометрии Z. По нему полнота и точность детектора меряются числом, а не глазами: положите кандидатов из 2.19 поверх истинных линий и посмотрите, где они разошлись.

### 3.01 Категориальный индикаторный кригинг

Инструмент **Категориальный индикаторный кригинг** строит карту вероятности по категориальному полю: минеральному типу, литотипу, любому текстовому классу. В отличие от обычного кригинга, который интерполирует величину, здесь оценивается, насколько вероятен каждый класс в каждой точке площади. Это нужно там, где важна не величина, а принадлежность к типу: где ожидать замещение, где сменяется состав пласта, где проходит граница между разностями.

Параметры:

| Параметр                                              | Что задаёт                                                                    | По умолчанию / совет |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Точечный слой                                         | Исходные точки.                                                               | -                    |
| Категориальное поле (класс)                           | Поле класса (минтип, литотип). Пустые и NULL не идут.                         | -                    |
| Радиус поиска, мин./макс. точек, размер ячейки, охват | Поиск и сетка - как в «2D Kriging».                                           | как у «2D Kriging»   |
| Доля самородка                                        | Доля самородка в подобранной вариограмме, от 0 до 1. Пусто - как подобралось. | пусто                |
| Вероятности по классам (многополосный)                | Растр: одна полоса на класс, имя класса в описании полосы.                    | -                    |
| Карта зон (самый вероятный класс)                     | Растр кода самого вероятного класса, соответствие кодов в Журнал.             | -                    |
| Уверенность (макс. вероятность)                       | Растр максимума вероятности: где класс уверенный, где спорный.                | необязательный       |
| Уровни вероятности                                    | Уровни для векторных границ, доли от 0 до 1.                                  | 0.25 0.5 0.75        |
| Класс для контуров                                    | Имя класса ровно как в поле классов. Пусто = все классы.                      | пусто                |
| Бикубическое сглаживание границ (доп.)                | Сгущение грида перед контурингом, как в 1.04.                                 | ×2                   |
| Скругление границ (Chaikin), итераций (доп.)          | Дополнительное лёгкое скругление.                                             | 2                    |
| Границы уровней вероятности (линии)                   | Линии уровней с классом и уровнем.                                            | необязательный       |
| Полосы вероятности (полигоны)                         | Полосы между уровнями с готовой раскраской.                                   | необязательный       |

#### Как считается

Кодировать классы числами 1, 2, 3 и интерполировать этот код нельзя. У категорий нет порядка, класс 3 не «дальше» класса 1, и среднее между ними бессмысленно. Поэтому инструмент идёт индикаторным путём. На каждый класс строится индикатор: единица там, где скважина этого класса, ноль везде иначе. Каждый индикатор кригуется отдельно ординарным кригингом, как обычное поле, и даёт поверхность от нуля до единицы, это и есть вероятность класса. Вариограмма индикатора подбирается автоматически сферической моделью по экспериментальной.

Раздельные индикаторы в сумме не дают ровно единицу и могут немного выходить за диапазон,

Индикаторный кригинг: вероятность зоны замещения

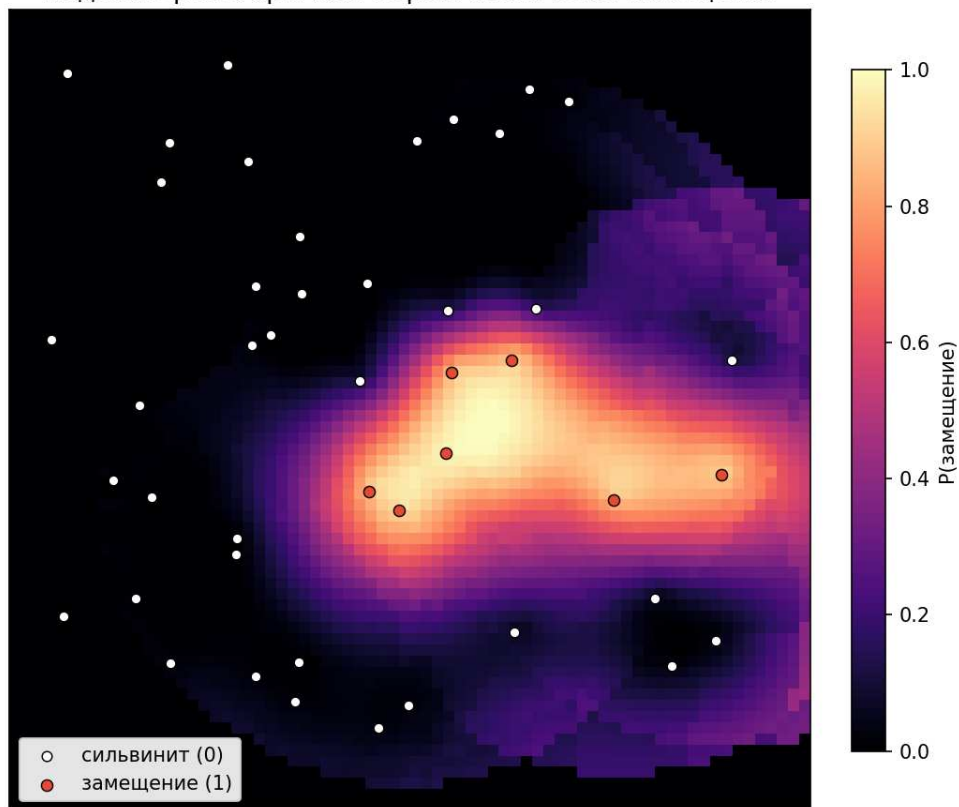


Рис. 21: Индикаторный кригинг на синтетике: скважины с категорией (красные - замещение, белые - сильвинит) превращаются в карту вероятности класса. Порогом 0.5 из неё режется контур домена.

это известное свойство метода. Поэтому оценка каждого класса обрезается в ноль один, а затем вероятности по классам нормируются так, чтобы в каждой ячейке их сумма равнялась единице.

### **Когда скважина не попала в свою зону**

Обычная жалоба: скважина опасного класса нарисовалась вне опасной зоны. Это не сбой подбора, а свойство самородка, и разобраться в нём стоит до того, как крутить остальные параметры.

Ровно в точке замера кригинг точен при любом самородке: оценка в узле, который лёг на устье, равна самому индикатору. Но узел сетки почти никогда не садится на устье. При ненулевом самородке поверхность около точки терпит разрыв, и уже в нескольких метрах от скважины оценка проваливается к местному среднему. На синтетическом примере с самородком 0.5 в пяти метрах от одиночной скважины класса «В» вероятность падает до 0.47, то есть под порог 0.5, а при обнулённом самородке остаётся 0.97.

Отсюда параметр **Доля самородка**. Пустое поле оставляет автоподбор как есть. Ноль делает поверхность гладкой у данных, и скважина удерживает свой класс в своей ячейке. Общая дисперсия при переносе доли сохраняется, меняется только гладкость, поэтому масштаб вероятностей не плывёт. Подобранные доли по классам печатаются в Журнал, так что сначала имеет смысл просто посмотреть на них: большой самородок означает, что классы перемешаны на коротких расстояниях, и это содержательный факт о данных, а не помеха.

Обнулять самородок нужно с открытыми глазами. Он не выдумка подбора: он измеряет, насколько соседние скважины расходятся в классе. Ноль означает решение считать каждый замер точным и обязательным к исполнению. Для карт опасности это часто правильно, потому что цена пропуска и цена ложной тревоги несимметричны, но карта после этого становится жёстче и пятнистее.

Второе, от чего зависит попадание, - ячейка. Оценка считается в центре ячейки, и если в одну ячейку попали скважины разных классов, никакой самородок их не разведёт. Ячейку задавайте мельче расстояния между соседними скважинами. Третье - граница полигона: полосы вероятности строятся из раstra со сглаживанием и скруглением, оба немного двигают линию уровня относительно ячеек. Если точка вышла за полосу на волосок, проверьте сначала это, сняв оба сглаживания.

### **Что на выходе**

Три результата. Многополосный растр вероятностей, одна полоса на класс, имя класса записано в описание полосы. Карта зон, код самого вероятного класса в ячейке, соответствие кодов и классов печатается в Журнал. Необязательный растр уверенности, максимум вероятности в ячейке, по нему видно, где класс уверенный, а где зоны спорят и проходит граница.

Ещё одно достоинство обнаруживается на данных с выбросами. Обычный кригинг вынужден интерполировать величину, и одна аномальная проба ломает вариограмму: пара близких точек с несопоставимыми значениями поднимает нагет, и карта вырождается в среднее. Индикатор работает не с величиной, а с фактом принадлежности к классу, поэтому аномальное значение в нём неотличимо от любого другого по ту же сторону порога. Там, где показатель ведёт себя дико, а вопрос по сути двоичный, индикаторный путь надёжнее прямой интерполяции.

Категориальный подход удобен тем, что не требует заранее проводить границу. Не нужно решать, считать ли частичное замещение опасным. Картируются все типы как есть, а нужную комбинацию классов собирают потом из вероятностей. Редкие классы с малым числом скважин дают шумную вариограмму, инструмент предупреждает об этом в Журнал, вероятность по такому классу читайте осторожно.

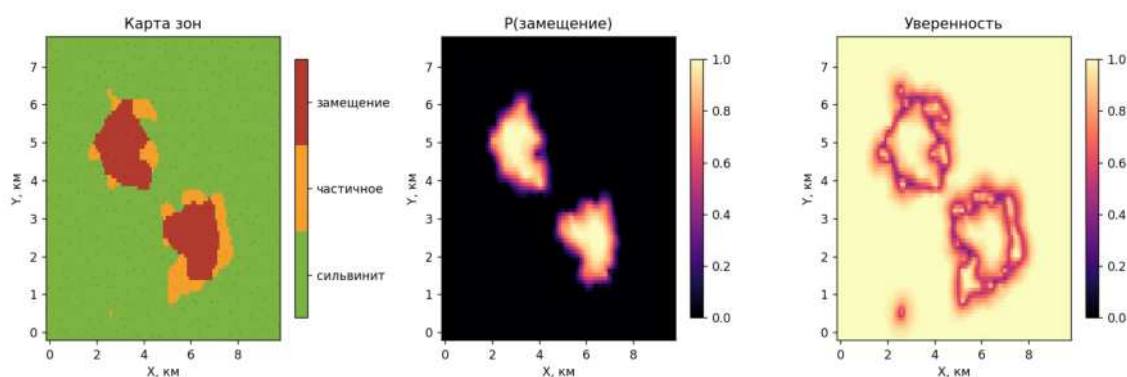


Рис. 22: Результат категориального индикаторного кригинга: карта самого вероятного класса по минеральному типу, фон сильвинита с очагами замещения, сверху нанесены точки скважин.

Чтобы освоить инструмент без реальных данных, включите в **Создать пример скважин (демо)** галку **Добавить категориальное поле минтипа**. В слой добавится поле `mintype` с фоном сильвинита и очагами замещения по образцу рудника, на нём инструмент можно сразу прогнать.

При неравномерной сети можно задать необязательное поле весов **wt** из инструмента **1.01 Декластеризация**. Тогда индикатор каждого класса кригуется к его декластеризованной доле, а не к нулю, поэтому вдали от данных вероятность стремится к представительной доле класса. Без весов поведение прежнее.

## Векторные границы по вероятностям

Карта зон отвечает на вопрос «кто победил в ячейке», и этого часто мало. Для планирования нужнее полоса перехода: где класс уверенный, где спорный, где уверенно другой. Это дают два необязательных векторных выхода, по умолчанию выключенных.

Уровни задаются параметром, по умолчанию 0.25, 0.5 и 0.75, то есть четыре полосы: уверенно нет, две спорные и уверенно да. Линии несут класс и уровень. Полигоны несут класс, границы полосы в полях **P\_MIN** и **P\_MAX** и готовую подпись полосы в поле **band** вида «0.25 - 0.5». По этой подписи слой сразу раскрашивается категориями от зелёного к красному, настраивать легенду руками не нужно.

Одна полоса может приехать несколькими объектами, если она разбита на отдельные участки площади. Это нормально и удобно: площади считаются по каждому участку отдельно. В легенде при этом ровно столько строк, сколько полос, потому что раскраска идёт по полосе, а не по одной её границе.

Границы строятся по каналу вероятностей, а не по карте зон, и это не мелочь. Карта зон хранит только победителя в ячейке, а где именно внутри ячейки прошла граница, в ней уже потеряно, и контур такой карты идёт ступенями по краям ячеек. Сглаживать такую лесенку значит выдумывать положение границы. Поле вероятностей эту информацию держит, и контур по нему ложится туда, куда его ставит сама модель.

При двух классах уровень 0.5 совпадает с границей зон: класс побеждает ровно там, где его вероятность выше половины. Поэтому один уровень 0.5 даёт обычную бинарную карту, только с гладкой границей вместо ступенчатой. При трёх и более классах это уже разные вещи, победить можно и с 0.4, и здесь строится именно вероятность быть данным классом, а не граница победителя.

При двух классах вписывайте в **Класс для контуров** интересующий. Вероятности дополняют друг друга до единицы, и второй набор будет зеркальным дублем первого.

## 3.02 Кригинг с внешним дрейфом (External Drift)

Инструмент **Кригинг с внешним дрейфом (External Drift)** оценивает поле по точкам, когда оно закономерно связано с величиной, которая уже известна всюду в виде растра. Такой растр называют дрейфом. Им может быть структурная поверхность соседнего пласта, грубая региональная модель, поверхность по редкой сетке или сейсмический атрибут. Обычный кригинг видит только сами скважины, а здесь к ним добавляется знание о форме поля между ними, и оценка опирается на эту форму там, где скважин нет.

Инструмент стоит в группе **Дополнительные инструменты анализа** и опирается на то же ядро, что и **2D Kriging**. Математика кригинга не меняется. Меняется только то, по чему снимается региональная составляющая.

Параметры:

| Параметр                                           | Что задаёт                                                                          | По умолчанию / совет |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Точечный слой                                      | Исходные точки.                                                                     | -                    |
| Поле значения (Z)                                  | Интерполируемый атрибут.                                                            | -                    |
| Растр внешнего дрейфа                              | Сторонняя поверхность s, известная всюду. В одной CRS с точками, покрывает область. | -                    |
| Канал растра дрейфа (Доп.)                         | Полоса многополосного растра дрейфа.                                                | 1                    |
| Степень дрейфа                                     | Линейная ( $a_0 + a_1 \cdot s$ ) или квадратичная связь.                            | 1 (линейный)         |
| Тип кригинга, радиус, мин./макс., нагет, структуры | Кригинг остатков - как в «2D Kriging».                                              | как у «2D Kriging»   |
| Сгладить грид (Гаусс), радиус сглаживания          | Необязательное сглаживание результата.                                              | выкл. / 1            |
| Растр кригинга с дрейфом                           | Выходная оценка (дрейф + кригинг остатков).                                         | -                    |
| Стандартная ошибка кригинга                        | Необязательный растр стандартной ошибки остатков.                                   | пропущен             |

### В чём отличие от снятия тренда

Флажок **Снять полиномиальный тренд** у **2D Kriging** описывает региональную составляющую полиномом от координат, то есть наклонной или изогнутой плоскостью. Это годится, когда падение пласта однородно и его форма проста. Но если у поля есть выраженная структура, повторяющая известную поверхность, плоскость её не опишет.

Внешний дрейф снимает региональную составляющую не по координатам, а по стороннему растру. Если, например, кровля интересующего пласта повторяет рельеф подстилающего, для которого поверхность уже построена, эту связь снимают регрессией на подстилающую поверхность, а кригуют уже отклонения от неё. Дрейф здесь не функция места на карте, а функция значения внешнего растра в той же точке. Всё остальное совпадает со снятием полиномиального тренда. Это та же схема регрессия-кригинг.

### Как считается

Сначала растр дрейфа считывается в каждой скважине, билинейно по четырём соседним ячейкам. Затем значение поля регрессируется на это считанное значение методом наименьших квадратов. **Степень дрейфа** задаёт вид связи. Степень 1 это линейный дрейф вида значение равно  $a_0$  плюс  $a_1$  на дрейф, обычный выбор для External Drift. Степень 2

описывает изогнутую связь с квадратом дрейфа, но может вобрать в себя часть реальной структуры, поэтому после неё стоит посмотреть на вариограмму остатков.

Дальше кригуются остатки регрессии, ровно как обычное поле в **2D Kriging**, со своей вариограммой, поиском и анизотропией. На последнем шаге растр дрейфа пересчитывается на сетку кригинга, и дрейф добавляется к кригованной оценке остатков обратно. Итоговая оценка в каждой ячейке равна дрейфу плюс кригинг остатка. Поскольку дрейф известен всюду, оценка между скважинами тянется не к локальному среднему, а к форме внешней поверхности.

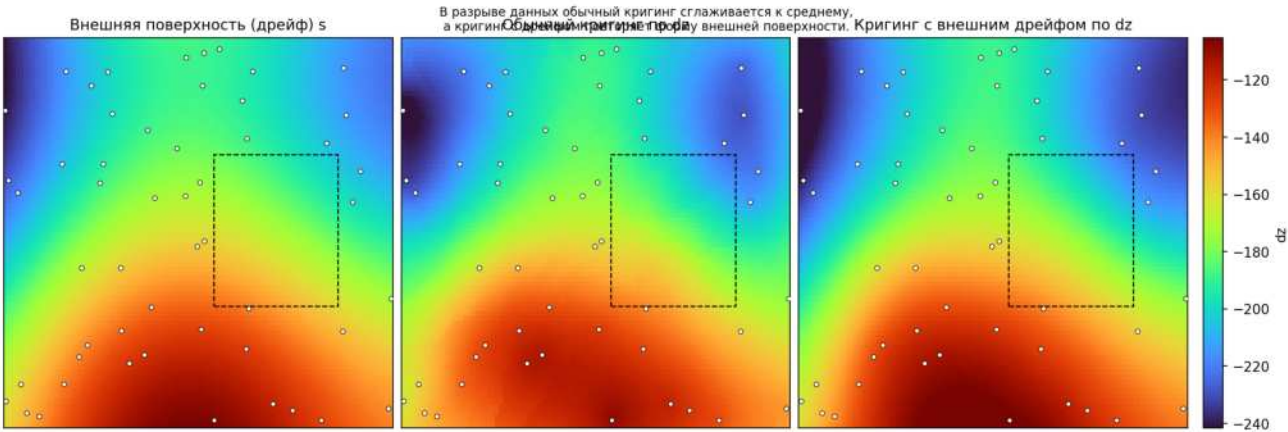


Рис. 23: Кригинг с внешним дрейфом на разреженных скважинах (расчёт ядром Isoliner). Слева - внешняя поверхность s (дрейф). В центре обычный кригинг по dz: в разрыве данных оценка сглаживается к среднему. Справа кригинг с внешним дрейфом по dz повторяет форму внешней поверхности там, где скважин нет. Пунктиром обведён разрыв данных.

Скважины, которые попали за пределы растра дрейфа, в подбор не идут, инструмент сообщает в Журнал, сколько их отброшено. Ячейки сетки, не покрытые растром дрейфа, достроить нечем, поэтому они остаются пустыми вместе со стандартной ошибкой в них.

### Атрибуты сгенерированного слоя

| Поле    | Тип   | Что содержит                                           |
|---------|-------|--------------------------------------------------------|
| well    | текст | Имя скважины.                                          |
| roof    | число | Отметка кровли, м.                                     |
| thick   | число | Мощность пласта, м.                                    |
| X       | число | Содержание полезного компонента, проценты.             |
| head    | число | Напор (гидрогеологический вариант данных), м.          |
| K       | число | Коэффициент фильтрации, м/сут.                         |
| T       | число | Водопроводимость, м <sup>2</sup> /сут.                 |
| mintype | текст | Минеральный тип (класс для индикаторного кригинга).    |
| dz      | число | Погрешность отметки - для взвешивания и экспериментов. |

Набор полей закрывает все инструменты плагина: интерполируйте roof и thick обычным кригингом, X - с трендом, mintype - индикаторным, head/K/T - гидрогеологическими инструментами.

## Параметры

**Точечный слой** и **поле значения Z** задаются как в **2D Kriging**. Параметр **Растр внешнего дрейфа** это и есть сторонняя поверхность, известная всюду. Необязательный **канал растра дрейфа** выбирает полосу многополосного растра. Поиск, размер ячейки, охват, обрезка по контуру скважин, наггет и структуры вариограммы, отсев ураганных проб и сглаживание грида работают и описаны так же, как у **2D Kriging**, с теми же умолчаниями.

Важное условие. Растр дрейфа и точечный слой должны быть в одной системе координат, иначе значение дрейфа снимется не в той точке. При несовпадении CRS инструмент предупреждает в Журнал. Растр дрейфа должен покрывать всю область оценки, иначе по краям появятся пустые ячейки.

## Вариограмма по остаткам

Как и при снятии тренда, вариограмму здесь задают по остаткам регрессии, а не по сырому значению. После снятия дрейфа вариограмма остатков возвращается к нормальному виду, выходит на порог с наггетом, и радиус отражает истинный масштаб локальной корреляции. Растр стандартной ошибки в этом режиме это ошибка кригинга остатков. Дрейф считается детерминированным и собственной погрешности к ней не добавляет.

Удобный способ подобрать вариограмму остатков, не выходя из инструмента вариограммы, пока не предусмотрен, поэтому остатки оценивают по доле снятой дисперсии, которую инструмент печатает в Журнал. Если дрейф убрал заметную часть разброса, связь с внешней поверхностью реальна и дрейф уместен. Если почти ничего не убрал, поле с этим растром не связано, и обычный **2D Kriging** даст тот же результат проще.

## 3.03 Карта вероятности превышения

Инструмент **Карта вероятности превышения** отвечает на вопрос не «сколько», а «какова вероятность, что значение превысит порог». Из растра оценки кригинга и растра его стандартной ошибки он строит растр вероятности от 0 до 1: в каждой ячейке вероятность того, что истинное значение выше заданного порога.

Инструмент стоит в группе **Дополнительные инструменты анализа** и работает как постобработка, подобно гидравлическому градиенту. Своего кригинга он не выполняет и окно **2D Kriging** не трогает, а берёт уже готовые растры. Поэтому он одинаково работает с выходом обычного кригинга и кригинга с внешним дрейфом.

### Как считается

Кригинг даёт в каждой ячейке оценку и её стандартную ошибку. Если принять локальное распределение значения нормальным, то есть величину в ячейке считать нормальной со средним равным оценке и стандартным отклонением равным ошибке кригинга, вероятность превышения порога считается одной формулой через функцию нормального распределения. Где оценка заметно выше порога, вероятность близка к единице, где ниже, близка к нулю, а на самом пороге равна половине. Чем больше стандартная ошибка, тем более плавным становится переход: вдали от скважин уверенности меньше, и вероятность тянется к 0.5.

Отдельного кригинга для этого не нужно, поэтому карта строится мгновенно. Допущение о нормальности местами грубовато, особенно для сильно скошенных полей вроде содержаний с длинным правым хвостом. Там, где это важно, точнее работает индикаторный кригинг по порогам, который не опирается на форму распределения.

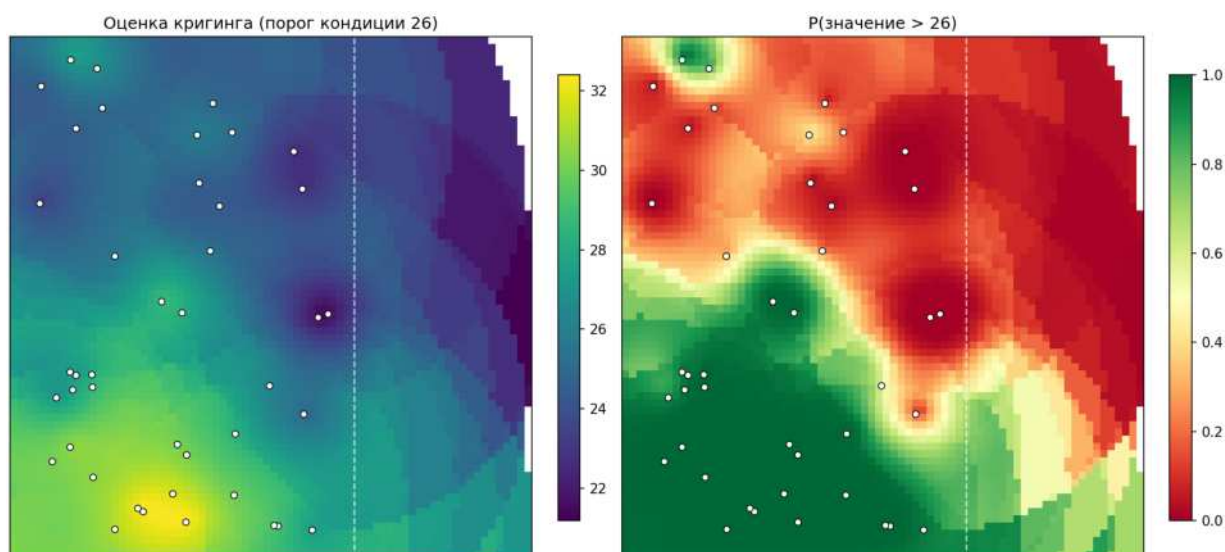


Рис. 24: Слева оценка кригинга с порогом кондиции, справа карта вероятности его превышения. Зелёное - берём уверенно, красное - уверенно не берём, за границей разбуренности карта сходится к 0.5.

## Как получить входы

Запустите **2D Kriging** (или **Кригинг с внешним дрейфом**) по своему полю и включите необязательный вывод **Стандартная ошибка кригинга**. Получите два растра, оценку и ошибку, и подайте их сюда. Решётки у них совпадают, так как они из одного запуска, но если подать растры с разной сеткой, ошибка будет приведена к сетке оценки билинейно.

## Параметры

| Параметр                                        | Что задаёт                                                                             | По умолчанию / совет |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Растр оценки (кригинг)                          | Растр оценки поля (результат кригинга).                                                | -                    |
| Растр стандартной ошибки кригинга               | Растр стандартной ошибки того же запуска.                                              | -                    |
| Сторона                                         | Считать вероятность выше порога $P(Z > \text{порог})$ или ниже $P(Z < \text{порог})$ . | выше                 |
| Порог                                           | Значение, относительно которого считается вероятность.                                 | 0                    |
| Канал растра оценки, канал растра ошибки (Доп.) | Полосы многополосных растров.                                                          | 1                    |
| Растр вероятности (0...1)                       | Выходной растр вероятности.                                                            | -                    |

## Применение

Бортовые содержания: порог равен кондиции, и карта показывает вероятность того, что содержание выше кондиции. Это нагляднее одной линии по оценке, потому что у границы рудного тела уверенность падает, и карта вероятности это показывает. Зоны риска по любому порогу: мощность ниже критической, отметка выше или ниже опасной. Карта вероятности дополняет карту оценки там, где важна не только величина, но и уверенность в ней.

## 3.04 Гидравлический градиент и направление потока

Инструмент **Гидравлический градиент и направление потока** работает с полем напора, то есть с пьезометрической поверхностью, и показывает, куда и насколько круто течёт подземная вода. На вход подаётся растр напора, обычно результат **2D Kriging** по уровням в

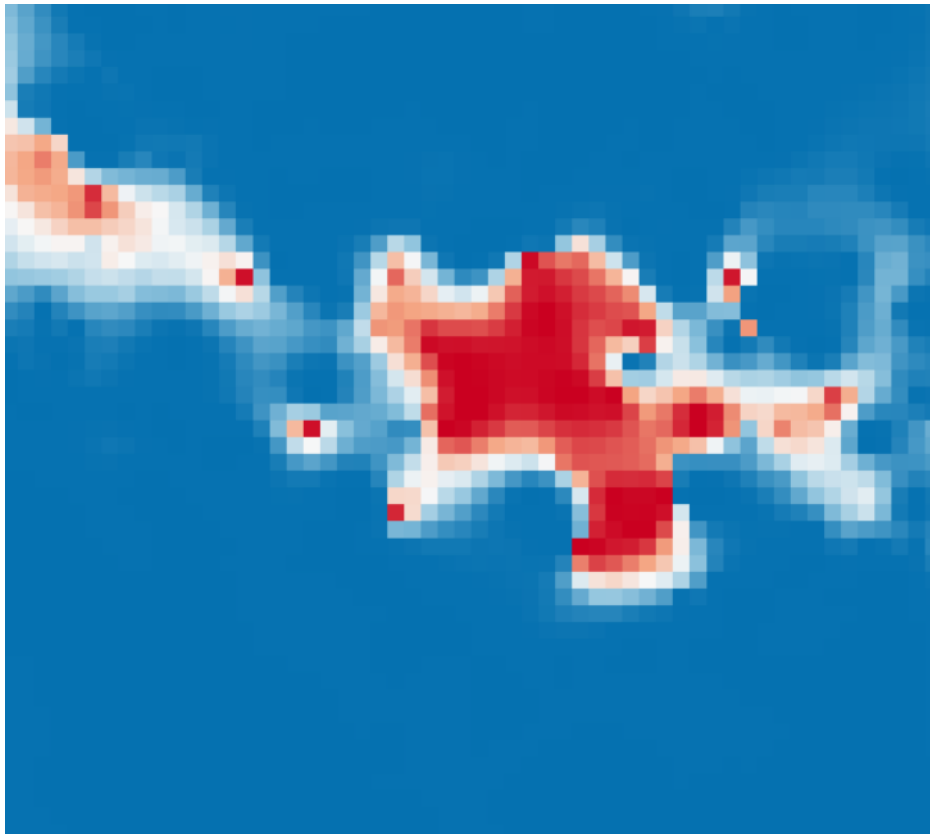


Рис. 25: Карта вероятности превышения с расходящейся шкалой и переломом на 0.5. Красное - значение уверенно выше порога, синее - уверенно ниже, белый поясok по линии  $P=0.5$  - зона неопределённости (спорные значения). Чем дальше от скважин, тем шире поясok.

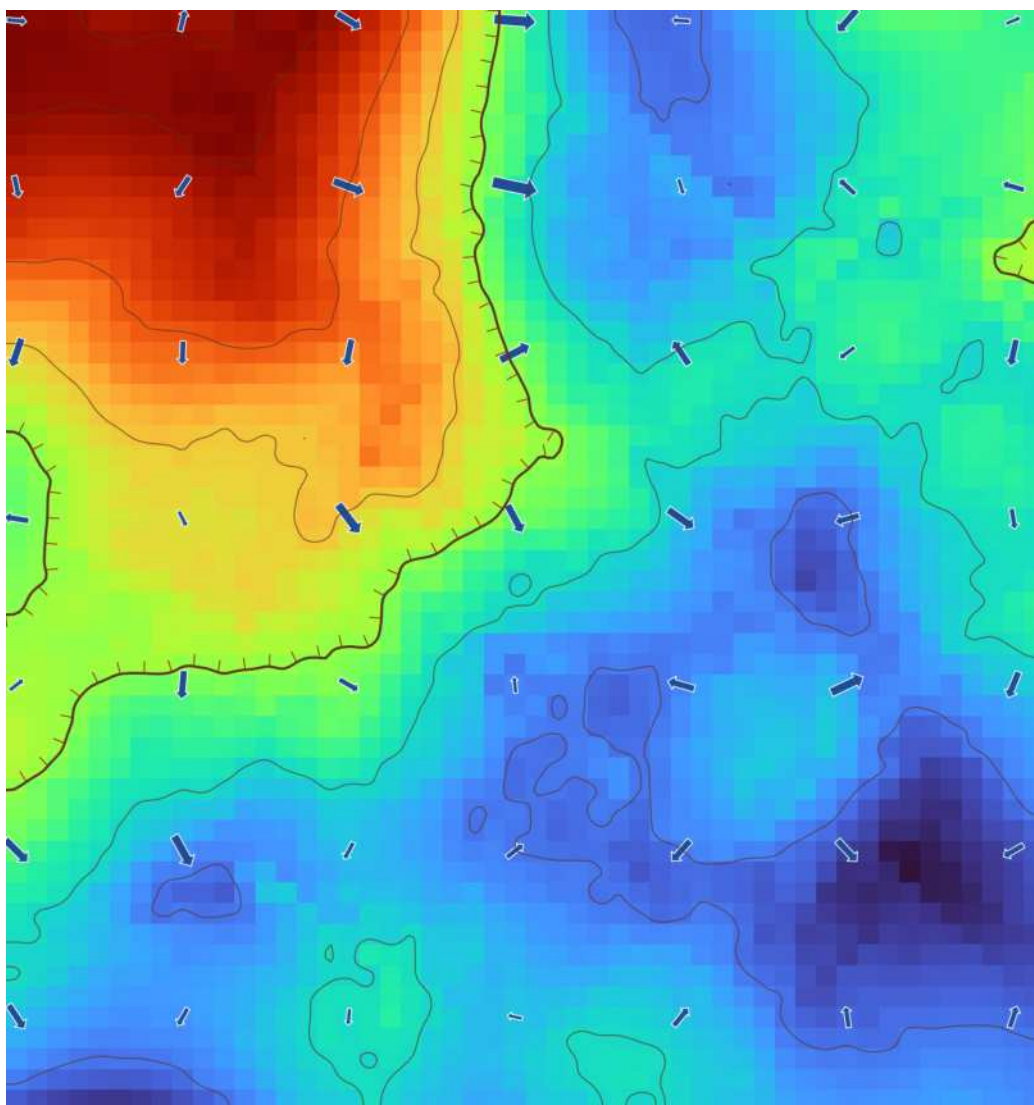


Рис. 26: Векторы потока на поверхности напора: стрелки идут вниз по градиенту, от высокого напора (тёплые тона) к низкому (холодные), поверх изолиний напора. Длина стрелки растёт с крутизной градиента.

сам коэффициент К, который инструмент не запрашивает и не считает. Иначе говоря, карта отвечает на вопрос куда и насколько круто, но не как быстро. Когда есть К (или водопроводимость Т) по площади, скорость фильтрации и расход считает соседний инструмент «Удельный расход (закон Дарси)»: он домножает этот градиент на свойства пласта.

## Параметры и сглаживание

Вход это **растр напора** и его **канал**. Параметр **векторы потока, шаг прореживания** задаёт, через сколько ячеек ставить стрелку, чтобы они не сливались, по умолчанию восемь. Параметр **сглаживание напора перед расчётом** убирает мелкую рябь грида, задаётся в ячейках, по умолчанию выключен.

| Параметр                                 | Что задаёт                                                            | По умолчанию / совет   |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Растр напора                             | Входная пьезометрическая поверхность (обычно результат «2D Kriging»). | -                      |
| Канал (Доп.)                             | Полоса входного растра.                                               | 1                      |
| Сглаживание напора перед расчётом, ячеек | Гасит шум грида перед дифференцированием. 0 = без.                    | 0                      |
| Векторы потока: шаг прореживания, ячеек  | Через сколько ячеек ставить стрелку.                                  | 8                      |
| Гидравлический градиент (модуль)         | Выходной растр $ \nabla h $ .                                         | -                      |
| Направление потока (азимут)              | Выходной растр азимута (вниз по градиенту).                           | создаётся по умолчанию |
| Векторы потока (точки)                   | Точечный слой стрелок (поля $az$ , $grad$ ).                          | создаётся по умолчанию |

Сглаживание включают не для красоты, а по существу. Дифференцирование усиливает шум, поэтому даже аккуратный грид кригинга способен дать пятнистое поле градиента с дёргаными стрелками. Лёгкое сглаживание возвращает картину к читаемому виду. Того же эффекта можно добиться, сгладив сам напор ещё в **2D Kriging**.

## Стрелки из точек

Слой векторов это точки, а стрелки рисует символика. Пресет накладывается автоматически. Маркер-стрелка поворачивается по полю **az**, поэтому показывает направление потока, а размер масштабируется по полю **grad**, поэтому стрелка длиннее там, где градиент круче. Размер задан в миллиметрах и не зависит от масштаба карты. Символику можно поменять в свойствах слоя. Если нужна классическая квивер-диаграмма, где длина стрелки отложена в единицах карты, маркер заменяют генератором геометрии, рецепт лежит в папке стилей рядом с пресетом.

Поля слоя векторов потока:

| Поле   | Тип   | Что содержит                                                                           |
|--------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $az$   | число | Азимут направления потока, градусы (0 = север, по часовой стрелке, вниз по градиенту). |
| $grad$ | число | Модуль гидравлического градиента \                                                     |

## Учебный цикл

Чтобы пройти весь путь без реальных данных, включите в **Создать пример скважин (демо)** галку **Добавить поле напора**. В слой добавится поле head с выраженным региональным уклоном. Постройте по нему грид в **2D Kriging**, подайте растр сюда, и стрелки пойдут вниз по склону напора. Тот же сквозной сценарий, что и для остальных инструментов, только про гидрогеологию.

## 3.05 Удельный расход (закон Дарси)

Инструмент **Удельный расход** добавляет к геометрии потока проницаемость. Гидравлический градиент показывает, куда и насколько круто падает напор, но не сколько воды течёт. Закон Дарси связывает эти величины через свойства пласта: чем выше проницаемость и круче градиент, тем больше расход. Из раstra напора и растров свойств пласта инструмент строит физический поток, а не безразмерный градиент.

Инструмент стоит в группе **Дополнительные инструменты анализа** и работает как постобработка. Свой кригинг не выполняется: растры свойств готовят отдельно кригингом по точкам испытаний.

### Что считается

Скорость фильтрации (удельный расход) по закону Дарси равна произведению коэффициента фильтрации на гидравлический градиент:  $q = K \cdot |\nabla h|$ , размерность метр в сутки. Это объём воды через единицу площади сечения в единицу времени. Если вместо коэффициента фильтрации задан растр водопроницаемости, инструмент считает расход через единицу ширины потока  $Q = T \cdot |\nabla h|$ , размерность квадратный метр в сутки. Водопроницаемость это коэффициент фильтрации, умноженный на мощность, поэтому расход через ширину уже учитывает мощность пласта и не требует её отдельно. Направление обоих потоков совпадает с направлением градиента, вниз по склону напора.

Истинная скорость движения воды получается делением удельного расхода на эффективную пористость,  $v = q/n$ . Пористости в данных обычно нет, поэтому инструмент её не запрашивает и истинную скорость не считает: при необходимости разделите растр  $q$  на пористость в растровом калькуляторе.

### Как получить растры K и T

Свойства пласта известны в точках испытаний (откачки, наливов), а нужны всюду. Их интерполируют кригингом, как любое поле. Важная тонкость: коэффициент фильтрации и водопроницаемость почти всегда лог-нормальны, их значения разбросаны на порядки. Кригинг по самим значениям исказит результат, поэтому кригуют логарифм. Проще всего включить в «2D Kriging» преобразование **ln**: тогда кригуется  $\ln$ , а растр возвращается уже в исходных единицах, и здесь галка **ln** не нужна. Если же вы кригуете заранее залогарифмированное поле, включите в этом инструменте **Растры K и T заданы как ln**, и значения вернуться экспонированием. Напорные и безнапорные пласты разумнее криговать отдельно, у них разная физика мощности.

### Параметры

| Параметр     | Что задаёт                                                    | По умолчанию / совет |
|--------------|---------------------------------------------------------------|----------------------|
| Растр напора | Пьезометрическая поверхность (результат кригинга по уровням). | -                    |

| Параметр                                       | Что задаёт                                                                               | По умолчанию / совет    |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Растр коэффициента фильтрации К (м/сут)        | Свойство пласта для скорости фильтрации.<br>Необязателен, но нужен хотя бы один из К, Т. | -                       |
| Растр водопроводимости Т (м <sup>2</sup> /сут) | Свойство пласта для расхода через ширину.                                                | -                       |
| Растры К и Т заданы как ln                     | Применить ехр к входным растрам (для лог-кригинга К и Т).                                | выкл.                   |
| Сглаживание напора, ячеек                      | Гасит шум напора перед дифференцированием.                                               | 0                       |
| Векторы потока: шаг прореживания               | Через сколько ячеек ставить стрелку.                                                     | 8                       |
| Каналы растров (Доп.)                          | Полосы многополосных растров напора, К, Т.                                               | 1                       |
| Скорость фильтрации q (м/сут)                  | Выходной растр $q = K \cdot  \nabla h $ .                                                | создаётся, если задан К |
| Расход через ширину Q (м <sup>2</sup> /сут)    | Выходной растр $Q = T \cdot  \nabla h $ .                                                | создаётся, если задан Т |
| Направление потока (азимут)                    | Выходной растр азимута.                                                                  | необязательный          |
| Векторы потока (точки)                         | Слой стрелок (поворот по аз, размер по удельному расходу).                               | создаётся по умолчанию  |

## Применение

Где вода движется быстрее и где медленнее, оценка притоков к выработкам, зоны повышенной фильтрации вдоль проницаемых пачек. Совместно с картой вероятности превышения можно показать не только ожидаемый расход, но и уверенность в нём там, где точек испытаний мало.

## 3.06 Гауссова симуляция (SGS)

Кригинг даёт одну сглаженную поверхность и дисперсию оценки. Последовательная гауссова симуляция отвечает на другой вопрос - какова неопределённость. Она строит ансамбль равновероятных реализаций: каждая воспроизводит гистограмму и вариограмму данных, проходит через скважины и потому остаётся шершавой, а не сглаженной. По набору реализаций в каждом узле набирается распределение значений, и отсюда видно, где оценка надёжна, а где данные молчат.

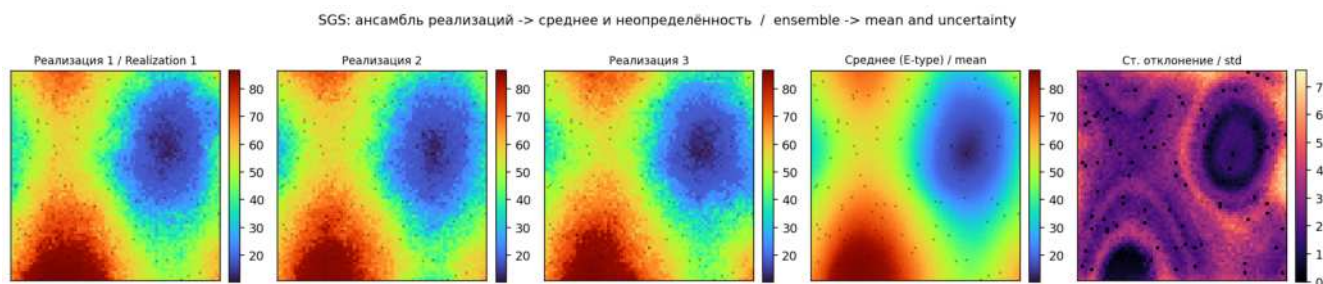


Рис. 27: Ансамбль реализаций SGS и производные от него среднее и неопределённость.

Как это работает. Значения переводятся в нормальные баллы (normal score), и симуляция идёт в гауссовом пространстве. Узлы грида обходятся в случайном порядке, в каждом узле

простой кригинг по соседям и уже симулированным точкам даёт локальное среднее и дисперсию, из этого нормального распределения разыгрывается значение, которое тут же становится обуславливающим для следующих узлов. Скважины привязываются к ближайшим узлам и фиксируются во всех реализациях. В конце каждая реализация переводится обратно в исходные единицы. Вариограмма нормальных баллов подбирается автоматически, её порог близок к единице.

## Параметры

| Параметр                                | Что задаёт                                                 | По умолчанию / совет |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------|
| Точки (скважины)                        | Точечный слой с данными.                                   | -                    |
| Поле значения                           | Числовой атрибут для симуляции.                            | -                    |
| Размер ячейки                           | Шаг грида. 0 - авто, min(охват)/50.                        | 0                    |
| Количество реализаций                   | Сколько прогонов усреднять.                                | 60 (50-100)          |
| Порог отсечки                           | Включает карту вероятности превышения.                     | не задан             |
| Вероятность ВЫШЕ порога                 | Направление вероятности.                                   | да                   |
| Охват раstra                            | Прямоугольник результата.                                  | по слою              |
| Модель вариограммы баллов (Доп.)        | Модель для нормальных баллов.                              | авто                 |
| Макс. количество соседей на узел (Доп.) | Сколько точек в простом кригинге узла.                     | 16                   |
| Радиус поиска (Доп.)                    | 0 - авто, 3 радиуса вариограммы.                           | 0                    |
| Зерно ГСЧ (Доп.)                        | Для воспроизводимости. 0 - случайно.                       | 0                    |
| Поле весов декластеризации (Доп.)       | Веса <b>wt</b> из инструмента <b>1.01</b> , необязательно. | нет                  |

Выходы это растры по ансамблю. **Среднее (E-type)** похоже на кригинг. **Стандартное отклонение** показывает неопределённость, малую у скважин и большую вдали от них. Квантили **P10, P50, P90** очерчивают вероятный диапазон, а **Вероятность превышения** при заданном пороге даёт непараметрическую альтернативу карте из инструмента вероятности. Время растёт с размером грида и числом реализаций, поэтому начинайте с грубой ячейки.

Если данные сгущены неравномерно, подайте поле весов **wt** из инструмента **1.01 Декластеризация**. Тогда нормально-балльное преобразование строит функцию распределения с весами, и гистограмма ансамбля не перекошена в сторону переразведанных богатых участков.

## Виды кригинга: какой выбрать

Под словом «кригинг» в плагине живёт семейство методов, и выбор между ними влияет на результат сильнее, чем тонкая настройка вариограммы. Все виды решают одну и ту же систему уравнений с ковариациями из вариограммы. Различаются они тем, что считается известным про среднее поле и что именно оценивается - точка, блок или вероятность. Эта глава - навигатор. Параметры каждого инструмента описаны в своих главах.

**Простой кригинг (SK)** предполагает, что среднее поля известно заранее и постоянно по площади. Вблизи скважин оценка следует данным, по мере удаления стягивается к заданному среднему. Берите его, когда среднее подтверждено статистикой по представительной выборке того же домена, среднее «на глаз» уводит все недоразбуренные края в сторону ошибки. Включается выбором типа в **2D Kriging**.

**Ординарный кригинг (ОК)** среднего не знает и оценивает его локально в каждой окрестности - за это отвечает дополнительное уравнение с условием «сумма весов равна единице». Вдали от скважин оценка тянется к среднему ближайшей окрестности, а не к глобальному. Это выбор по умолчанию: не знаете, с чего начать, - начните с ОК.

**Кригинг с трендом** (галка снятия тренда в **2D Kriging**) - для полей с закономерным региональным уклоном: кровля на моноклинали, крыло складки. Полином 1-й или 2-й степени снимается МНК, кригуются остатки, тренд возвращается к оценке. Два правила: вариограмму задавайте по остаткам (плагин печатает долю снятой дисперсии - если она мала, тренд не нужен), и не экстраполируйте квадратичный тренд далеко за облако скважин.

**Кригинг с внешним дрейфом** (глава 3.02) - когда тренд известен не как формула, а как поле: структурная поверхность соседнего пласта, региональная модель, сейсмический атрибут. Схема та же - регрессия на дрейф, кригинг остатков, возврат регрессии.

**Блочный кригинг** (параметр дискретизации в **2D Kriging**) оценивает среднее по блоку, а не значение в точке: правая часть системы усредняется по дискретизации, дисперсия ошибки падает, выбросы гасятся. Берите его для подсчёта запасов по сетке блоков и помните про эффект носителя: грид блочного кригинга закономерно глаже точечного, сравнивать содержание пробы и содержание блока напрямую нельзя.

**Индикаторный кригинг** (глава 3.01) - для категорий: минтип, фация, зона замещения. Категория превращается в индикатор 0/1, кригуется обычным ОК, результат - вероятность класса в точке, порогом из неё получают домены. Вариограмма индикаторов своя и обычно короче вариограммы содержания.

**Гауссова симуляция** (глава 3.06) - не кригинг, а его дополнение: вместо одной сглаженной поверхности ансамбль равновероятных шершавых реализаций, из которого неопределённость видна напрямую.

## Шпаргалка

| Задача                                    | Вид               | Где включается               |
|-------------------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Универсальный случай, старт любой задачи  | Ординарный (ОК)   | 2D Kriging, тип по умолчанию |
| Данных много, среднее домена обосновано   | Простой (SK)      | 2D Kriging, тип SK + среднее |
| Кровля или подошва с региональным уклоном | С трендом         | 2D Kriging, снятие тренда    |
| Тренд известен как растр                  | С внешним дрейфом | глава 3.02                   |
| Запасы по сетке блоков                    | Блочный           | 2D Kriging, дискретизация    |
| Минтип, замещение, категории              | Индикаторный      | глава 3.01                   |
| Оценка неопределённости                   | Симуляция SGS     | глава 3.06                   |

Окрестность поиска общая для всех видов, и три правила снимают большинство проблем: радиус порядка радиуса вариограммы, максимум соседей 12-16, анизотропия окрестности согласована с анизотропией вариограммы из вариограммной карты.

## 3.07 Плотность по замерам (переменная опора)

Инструмент строит карту плотности, где замер задан не точкой, а носителем конечного размера: точка с сигмой неопределённости, отрезок линии (коридор полуширины) или полигон. Единичная масса замера размазывается по своему носителю. Масса сохраняется, а плотность обратна площади носителя, поэтому грубые привязки самоослабляются

геометрически, без порогов и фильтров. Это оценка плотности (сколько и где), а не интерполяция значения - для значений остаётся кригинг.

Тип геометрии один на запуск. Смешать точки, линии и полигоны можно серией запусков в один растр (режим дописывания). По каждому типу масса раскладывается по-своему:

- **Точка** - гауссово пятно с сигмой из поля точности, обрезка на три сигмы. Сигма ниже полуячейки поднимается до полуячейки.
- **Линия** - коридор мягких краёв: полилиния уплотняется, масса делится по длине, каждая подточка - гауссов профиль с сигмой-полушириной. Поля from\_m/to\_m вырезают интервал по линейной привязке.
- **Полигон** - масса делится по площади равномерно либо, в дазиметрическом режиме, пропорционально вспомогательному растру (население, застройка). При пустом растре внутри полигона - откат на равномерное.

## Выход и инвариант

Основной выход - трёхканальный растр. Канал 1 - плотность в массе на км<sup>2</sup> (не зависит от размера ячейки). Каналы 2 и 3 служебные ( $\Sigma m \cdot \sigma$  и  $\Sigma m$ ), чтобы дописывание сериями и карта эффективной сигмы оставались точными. Необязательный второй растр - средневзвешенная сигма по ячейке, карта эффективной точности: она отделяет плотность, обеспеченную точными привязками, от размазанной. Это аналог кригинговой дисперсии для этажа плотности.

Инвариант: интеграл плотности по растру равен сумме масс входа. Считается всегда и пишется в лог. Расхождение - признак того, что носители вышли за область, поведение задаёт переключатель края (донормировать внутри или потерять массу с предупреждением).

## Как читать

Плотность показывает, где сгущаются замеры с учётом их надёжности. Точная привязка даёт компактное пятно, грубая - размытое и низкое. По карте эффективной сигмы видно, где плотность набрана точными носителями, а где размазанными - там доверия меньше.

| Параметр                  | Что задаёт                                                              | По умолчанию       |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Замеры                    | Точки, линии или полигоны (один тип).                                   | -                  |
| Поле массы                | Масса объекта.                                                          | 1                  |
| Поле точности             | Сигма точки или полуширина линии.                                       | сигма по умолчанию |
| Размер ячейки, м          | Шаг сетки.                                                              | 50                 |
| Область                   | Экстент.                                                                | по слою            |
| Носитель за краем         | Донормировать внутри или потерять массу.                                | донормировать      |
| Сигма по умолчанию (Доп.) | Когда поле точности пусто.                                              | полуячейка         |
| from_m / to_m (Доп.)      | Вырезка интервала линии.                                                | вся линия          |
| Вспом. растр (Доп.)       | Дазиметрия для полигонов.                                               | -                  |
| Дописать в растр (Доп.)   | Существующий трёхканальный растр.                                       | -                  |
| Плотность                 | Трёхканальный растр (плотность, $\Sigma m \cdot \sigma$ , $\Sigma m$ ). | -                  |
| Эффективная сигма         | Карта эффективной точности (необязательно).                             | -                  |

## Окно «Карта плотности» (живой предпросмотр)

Лицом инструмента служит отдельное окно **Карта плотности** на панели **Isoliner**. Слева задаются слой и поля, справа идёт предпросмотр на грубой сетке: он считается за миллисекунды, поэтому сигма и размер ячейки меняют картинку сразу, а не после запуска. Внизу постоянно горит инвариант: масса входа, масса на сетке и доля, потерянная на краю.

Кнопка **Демо** создаёт учебный набор инструментом 3.08. Кнопка **Записать растр** запускает полный расчёт тем же алгоритмом 3.07 и кладёт результат на карту уже одетым: псевдоцвет с прозрачными нулями, изолинии плотности и слой эффективной сигмы как карта доверия. Форма Processing остаётся для моделей и пакетных прогонов, ядро расчёта у них общее.

## 3.08 Создать пример для плотности (демо)

Инструмент создаёт синтетический набор для 3.07 с известной суммарной массой, чтобы проверить инвариант глазами. Десять точек с разными сигмами (от долей ячейки до крупных, масса 500), две линии (масса 200, у одной вырезка интервала from\_m/to\_m), два полигона (масса 300, один под дазиметрию) и вспомогательный растр. Итого масса 1000.

Прогоните 3.07 на слое точек - интеграл плотности в логе должен дать 500, на линиях 200, на полигонах 300. Поля слоёв: **mass, prec, from\_m, to\_m**.

| Параметр                      | Что задаёт                   | По умолчанию |
|-------------------------------|------------------------------|--------------|
| Область (экстент)             | Границы генерации.           | -            |
| Ячейка вспом. растра, м       | Шаг вспомогательного растра. | 50           |
| Зерно ГСЧ (Доп.)              | Повторяемость примера.       | 1            |
| Демо-точки / линии / полигоны | Три слоя замеров.            | -            |
| Вспом. растр                  | Растр для дазиметрии.        | -            |

Полный перечень полей выходных слоёв - в приложении **Плотность (демо)** (раздел «Поля демо-слоёв» в конце руководства).

## 4.01 Разрез по линии

Инструмент **Разрез по линии** строит геологический разрез из набора поверхностей. Это не просто кривая профиля, а пласты как залитые полосы между кровлей и подошвой. Поверхности обычно получают кригингом, а инструмент собирает их в разрез вдоль заданной линии.

Инструмент стоит в группе **Разрез** и работает как постобработка готовых растров. Свой кригинг он не выполняет.

### Как задаются пласты

Поверхности подаются списком и упорядочиваются сверху вниз: кровля, подошва, при необходимости следующая кровля и так далее. Пласты строятся как полосы между соседними поверхностями, поэтому из N поверхностей получается N минус один пласт. Для одного пласта достаточно двух поверхностей, кровли и подошвы. Для пачки пластов добавляйте поверхности по порядку залегания. Одна поверхность тоже допустима, это разрез по рельефу без пластов, см. следующий раздел.

### Разрез по одной поверхности

Одна поверхность это законный случай, а не ошибка. Пластов при ней не будет по определению, зато строятся линия рельефа, рамка, оси с отметками, угловые точки и

определение разреза. С этого геологический разрез обычно и начинается: сначала профиль по ЦМР, поверх него пересечения с плановой геологией инструментом **4.05**, а геология вниз рисуется вручную.

Полосы пластов и забор 3D в таком прогоне не строятся, и слои для них не создаются вовсе. Пустой слой в проекте выглядит полумкой, хотя всё построено верно, поэтому его лучше не создавать, чем создавать и прятать.

Рельеф выходит слоем **Линии поверхностей на чертеже**. Задайте ему свой стиль линии и подписи: чертёж дооформляется поверх этого слоя.

Низ рамки в таком разрезе задавайте отметкой в дополнительных параметрах. Без неё рамка обжимает данные с небольшим отступом, и рисовать под рельефом негде. Отметка учитывается до расчёта вертикального масштаба, поэтому в режиме отношения габаритов чертёж выходит в масштабе именно той рамки, которую вы увидите. Отметка выше данных игнорируется: это низ рамки, а не обрезка сверху.

## Порядок поверхностей задаёт дерево слоёв

Это главное, что нужно знать про инструмент. Порядок поверхностей не второстепенная деталь оформления, а исходные данные наравне с самими гридами. Именно он определяет, какая полоса чей пласт.

По умолчанию порядок берётся из дерева слоёв проекта, сверху вниз, ровно как показано в панели **Слои**. Что видите в панели, то и получите на чертеже. Отметки в мультиселекте задают, какие поверхности участвуют, но не в каком они порядке.

Отсюда простое правило работы. Прежде чем строить разрез, разложите поверхности в панели слоёв по залеганию: кровля верхней вмещающей вверх, подошва нижней вниз. Перетащите слои мышью, если они пришли вперемешку. Это займёт полминуты и избавит от разбирательств.

Если порядок нарушен, инструмент не выдаст ошибку. Он построит полосы между теми парами, которые вы ему дали. Часть пар окажется перевёрнутой, у них подошва выше кровли, такие полосы отбрасываются молча. Внешне это выглядит так: пластов на чертеже меньше, чем ожидалось, или они лежат в неправдоподобной последовательности. Увидели такое - первым делом проверьте порядок в панели слоёв, а не параметры кригинга.

Когда порядок в дереве по каким-то причинам не годится, снимите галочку **Порядок поверхностей из дерева слоёв проекта**. Тогда порядок берётся из последовательности отметок в списке, как в прежних версиях. Слои, которых нет в дереве проекта (добавленные файлом прямо в виджете), уходят в конец списка, сохраняя взаимный порядок.

Генератор примера (4.10) сам раскладывает шесть поверхностей в дереве по залеганию, поэтому на демо-данных ничего перекладывать не нужно.

## Выходы

Чертёж разреза это полигоны в осях расстояние вдоль линии и высота. Высоту можно растянуть вертикальным преувеличением, чтобы тонкие пласты читались. Этот слой кладут в макет печати как готовый разрез. Система координат у него условная, расстояние и высота в единицах карты.

Линии поверхностей это каждая поданная поверхность отдельной линией в осях чертежа, с полями **sec**, **sec\_id**, **num** и **name**. Разрывы по отсутствию данных сохраняются. При работе с пластами слой необязателен, кровля и подошва и так видны как края полос, но он позволяет подписать и оформить линию кровли отдельно от заливки. При одной поверхности это единственный слой с рельефом.

Забор 3D это те же полосы, но как вертикальные стенки PolygonZ в реальных координатах. Их смотрят в 3D Map View рядом с поверхностями кригинга: грид задаётся рельефом, а стенки

разреза показывают пласты в пространстве.

## Вертикальный масштаб

Горизонталь разреза (длина линии) и вертикаль (десятки метров пластов) несопоставимы, поэтому без растяжения по высоте чертёж выглядит плоским. Масштаб задаётся тремя способами.

Режим **отношение масштабов Г:В (1:N)** это привычная чертёжная запись. Значение 50 означает  $G:B = 1:50$ , то есть вертикальный масштаб крупнее горизонтального в пятьдесят раз. Так задают масштаб на калийных разрезах, где горизонталь идёт километрами, а мощности измеряются метрами. Множитель растяжения равен N.

Режим **множитель** это то же число, поданное напрямую, без чертёжной формулировки.

Режим **отношение Г:В (ширина:высота чертежа)** работает от габаритов: вы задаёте желаемое отношение ширины листа к высоте (например 10), а множитель инструмент считает сам по длине линии и размаху высот. Удобен, когда важно вписать разрез в лист, а не выдержать заданный масштаб.

Фактический множитель печатается в журнал. Для точного наложения слоёв он должен совпадать у разреза, скважин и состава. В режиме Г:В разрез (4.01) видит весь разрез по высоте. Скважины (4.02) берут множитель из определения и совмещаются сами. Состав (4.03) считает отношение по одному пласту, поэтому для наложения возьмите множитель, напечатанный 4.01, и задайте его в 4.03 в режиме **множитель**.

## Несколько разрезов за один прогон

По умолчанию инструмент строит разрез по каждой линии слоя. Это обычный режим работы: линейный слой с профилями обрабатывается целиком, запускать инструмент по разу на линию не нужно. Если нужны не все линии, выделите нужные на карте и включите **Только выделенные объекты** у параметра линии. Снятая галочка **Разрез по каждой линии слоя** возвращает прежнее поведение, разрез по первой линии.

Все разрезы попадают в один комплект слоёв и различаются атрибутами, а не отдельными слоями на каждый створ. Так их удобно подписывать и фильтровать выражением, а стили не приходится назначать заново. Имя разреза берётся из поля линейного слоя, если оно задано параметром **Поле имени разреза**, иначе разрезы нумеруются по порядку.

На чертеже разрезы разводятся раскладкой в общей чертёжной системе координат. **Стопкой сверху вниз** ставит их один под другим с общим нулём расстояний, и левый край у всех совпадает. **В ряд слева направо** ставит их бок о бок с общей отметкой высоты, тогда шкала высот сквозная для всего листа. **Сеткой** сочетает оба правила: строка держит общую отметку, столбец - общий ноль расстояний, число столбцов задаётся в дополнительных параметрах. Шаг решётки берётся от самого крупного чертежа плюс зазор, поэтому чертежи не пересекаются, как бы ни различались длины створов. Зазор задаётся долей от габарита, по умолчанию 0.15.

Вертикальный масштаб на весь прогон один. Иначе короткий створ и длинный вышли бы в разном растяжении и стали бы несопоставимы на одном листе. В режимах отношения масштабов и множителя это просто заданное число. В режиме отношения габаритов множитель считается по самой длинной линии и общему по набору размаху высот, поэтому заданную пропорцию точно получает самый широкий чертёж, а остальные выходят выше него, но в том же масштабе.

Забор 3D раскладкой не смещается. Он стоит в реальных координатах, каждая стенка на своём створе, и в 3D Map View набор разрезов выглядит как настоящий забор по площади.

Первый разрез всегда получает нулевое смещение, поэтому прогон по одной линии даёт ровно тот же чертёж, что и раньше.

## Цвет полос: справочник пластов

Полосы пластов красятся по имени кровли. Без справочника цвет считается от самого имени: он не пляшет между прогонами, но он условный.

Необязательный вход **Справочник пластов (таблица)** делает цвет осмысленным. Справочник это обычный слой проекта, GeoPackage или таблица Excel, где на каждый пласт и каждое междупластье приходится одна строка сверху вниз по разрезу. Обязательных колонок три: код тела, номер сверху вниз и тело. Цвет необязателен, но именно ради него справочник чаще всего и подают.

Колонка **тело** содержит слово «пласт» или «междупластье», и это закон, а не догадка. Вывести тело из кода нельзя. Пласт **АБ** по написанию выглядит как «А плюс Б», но это цельный пласт, внутри которого лежат А, Б, корж А-А' и А'. Междупластье **Б-В** по коду не выводится вовсе, потому что пласта Б в списке нет, есть АБ. Определяет тело геолог, машина не пересчитывает.

Порядок сверху вниз даёт справочнику вторую способность: находить тело между двумя границами. Если на разрезе идут кровли КрII и КрIIIa, то между ними по порядку лежит междупластье КрII-КрIII, и полоса получает его имя и цвет. Пласты, которых на разрезе не оказалось, помечаются серым, а их перечень печатается в журнал - по нему сразу видно, чего не хватает в наборе поверхностей.

Имена слоёв обычно не совпадают с кодами дословно, поэтому поиск идёт лестницей от строгого к терпимому: точный код, затем без учёта регистра и крайних пробелов, затем приведённый вид (снят хвост роли \_top, \_bottom, \_кровля, \_подошва, латинские двойники букв сложены в кириллицу), и наконец тот же вид без апострофов. Так КрII\_top находит код КрII, а А'Б\_top находит АБ. Строгие шаги идут первыми, поэтому если в справочнике есть и АБ, и А'Б как разные тела, каждый получит своё.

Тот же справочник подаётся в 4.02, и тогда полосы и колонки скважин говорят на одном языке кодов и совпадают по цвету.

Готовый образец для Верхнекамского месторождения лежит в папке **templates** внутри каталога плагина: 36 строк от покровных отложений до нижней каменной соли, с цветами и телами. Файл есть в двух видах, plast\_reference\_vkms.xls и plast\_reference\_vkms.csv. Возьмите его за основу и правьте под своё месторождение: колонки **толща** и **примечание** необязательные, они читаются, но пока не используются, и оставлены под будущее развитие.

## Атрибуты выходных слоёв

Все слои разреза несут два общих поля: **sec** с именем разреза и **sec\_id** с номером объекта исходной линии. По ним подписывают чертежи, фильтруют слой на один створ и раскрашивают разрезы по-разному.

**Определение разреза** - по линии на каждый разрез, с исходной геометрией створа и полями, которые читают последующие инструменты группы:

| Поле        | Что содержит                                                   |
|-------------|----------------------------------------------------------------|
| sec, sec_id | Имя разреза и номер исходной линии.                            |
| vex         | Вертикальное преувеличение чертежа.                            |
| step        | Шаг пикетажа, м (вершины ломаной включаются в пикетаж всегда). |
| zmin, zmax  | Диапазон отметок чертежа.                                      |
| ox, oy      | Смещение чертежа в раскладке. Ноль у одиночного разреза.       |

**Разрез (3D-забор)** - вертикальные полигоны PolygonZ вдоль створа, по одному на пласт:

| Поле        | Что содержит                             |
|-------------|------------------------------------------|
| sec, sec_id | Имя разреза и номер исходной линии.      |
| bed         | Номер пласта сверху вниз.                |
| top, bot    | Имена поверхностей кровли и подошвы.     |
| t_mean      | Средняя мощность пласта вдоль створа, м. |
| seclen      | Длина створа, м.                         |

**Угловые точки разреза:** sec и sec\_id, num (номер угла), name (имя УГ-1, УГ-2, ...), pos (верх или низ), d (пикет, м), x и y (координаты на карте), az (азимут следующего колена), label (готовая подпись). **Горизонтальные оси:** sec, sec\_id, elev (отметка оси, м) и label. **Таблица углов:** sec, sec\_id, kind (тип строки) и text (содержимое ячейки).

## Параметры

| Параметр                                     | Что задаёт                                                                                             | По умолчанию / совет |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Линия разреза                                | Линейный слой. Годится галочка <b>Только выделенные объекты</b> .                                      | -                    |
| Поверхности сверху вниз                      | Список растров-поверхностей. Нужно минимум две.                                                        | -                    |
| Порядок поверхностей из дерева слоёв проекта | Порядок берётся из панели <b>Слои</b> сверху вниз. Снятая галочка возвращает порядок отметок в списке. | включено             |
| Разрез по каждой линии слоя                  | Пакетный режим. Снятая галочка строит разрез по первой линии.                                          | включено             |
| Поле имени разреза                           | Поле линейного слоя, из которого берётся имя. Пусто - нумерация по порядку.                            | -                    |
| Раскладка нескольких разрезов                | Стопкой, в ряд или сеткой.                                                                             | стопкой              |
| Шаг выборки вдоль линии                      | Через сколько единиц карты брать отсчёт. 0 - по размеру ячейки.                                        | 0                    |
| Вертикальный масштаб                         | Режим: отношение габаритов, множитель или отношение масштабов Г:В.                                     | отношение габаритов  |
| Значение масштаба                            | Отношение ширина:высота, множитель или N из записи 1:N.                                                | 10                   |
| Столбцов в сетке (Доп.)                      | Число столбцов для раскладки сеткой.                                                                   | 2                    |
| Зазор между разрезами (Доп.)                 | Доля от габарита чертежа.                                                                              | 0.15                 |
| Выборка раstra (Доп.)                        | Билинейно или ближайший.                                                                               | билинейно            |
| Справочник пластов (таблица)                 | Цвет, тело и порядок из данных.                                                                        | пусто                |
| Низ рамки, отметка (доп.)                    | Опускает рамку, чтобы было где рисовать. Пусто - по данным.                                            | пусто                |

| Параметр                             | Что задаёт                                                                                    | По умолчанию / совет |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Линии поверхностей на чертеже        | Выходной линейный слой, по линии на поверхность.                                              | создаётся            |
| Чертёж разреза (расстояние × высота) | Выходной полигональный слой для макета. Не создаётся при одной поверхности.                   | создаётся            |
| Забор 3D (PolygonZ)                  | Выходной слой вертикальных стенок в реальных координатах. Не создаётся при одной поверхности. | создаётся            |

Каждый пласт получает атрибуты: номер, имена кровли и подошвы, среднюю мощность и длину разреза. Раскрашивайте слой по номеру пласта или по мощности. Там, где поверхность не определена (nodata), полоса разрывается, и пласт распадается на несколько полигонов.

## Как попробовать на демо

Готовый учебный набор даёт инструмент **Создать пример для разреза** (4.10): шесть поверхностей сверху вниз, три линии разрезов, пара слоёв модели бурения collar и interval и многоканальные гриды пластов. Поверхности он раскладывает в дереве по залеганию сам, а три линии разной длины и с разным числом изломов удобны, чтобы посмотреть раскладку и общий вертикальный масштаб. Запустите его, затем подайте поверхности и линию сюда, пару collar и interval с определением в **Скважины на разрезе**, а грид пласта (каналы 1/2/3) в **Состав пласта на разрезе**. Полный состав набора в разделе 4.10.

## Связь с QGIS

Простую кривую профиля по одному гриду строит штатная панель **Elevation Profile**, отдельный инструмент для этого не нужен. Разрез же показывает именно пласты между поверхностями, чего штатные средства не делают. Поверхность кригинга в 3D можно посмотреть и без разреза: в 3D Map View задайте грид рельефом.

## 4.02 Скважины на разрезе (модель бурения)

Инструмент **Скважины на разрезе** кладёт скважины на чертежи разрезов из пары слоёв модели бурения. Он стоит в группе **Разрез** и работает пакетно: один прогон обслуживает все разрезы определения.

### Модель бурения

Скважины описываются двумя таблицами по минимальной модели горных пакетов (Leapfrog, Micromine, Datamine, Surpac). **collar** это точечный слой устьев с полями **hole\_id** (идентификатор, строка), **z** (отметка устья) и **eah** (глубина забоя по стволу). **interval** это обычная таблица интервалов с полями **hole\_id**, **from**, **to** и **code** (чем красим: индекс пласта, литотип, класс). Глубины считаются по стволу от устья, вниз положительные, не отметками, поэтому наклонные скважины модель не ломают. Любые прочие колонки таблицы интервалов едут в атрибуты чертежа как есть.

Такую пару выдаёт **Создать пример для разреза** (4.10) и корпоративная выгрузка. Поля обеих таблиц инструмент находит сам по контрактным именам и распространённым синонимам (Hole\_ID, elev, depth\_from, litho), регистр не важен. Выбор полей спрятан в дополнительные параметры и нужен только для нестандартных слоёв. Что нашлось, печатается в журнал одной строкой.

## Терпимый читатель

Данные читаются без предварительной чистки. Пустые и нечисловые глубины пропускаются, перепутанные from и to меняются местами, интервалы за забоем рисуются как есть, перехлёсты не разрешаются и не прячутся, разрывы между соседними интервалами не заполняются, интервалы без устья пропускаются. Всё пропущенное и принятое с оговоркой считается и выводится в журнал короткой сводкой. На чистых данных сводка состоит из одной строки. Разрыв в колонке на чертеже означает, что на эти глубины в таблице интервалов нет строк: инструмент рисует данные и ничего не додумывает, а число разрывов печатает в сводке.

## Пакетность и совмещение

Линии, вертикальный масштаб и раскладка берутся из определения разреза, которое выдаёт **Разрез по линии**. Каждая скважина проецируется на каждую линию и попадает на те чертежи, к которым она ближе коридора (0 - на все). Глубины переводятся в отметки вычитанием из z, множитель vех общий из определения, поэтому колонки ложатся на пласты по высоте без подгонки.

Слой устьий может лежать в другой системе координат, чем определение, например при выгрузке из корпоративной базы в рабочей системе предприятия. Инструмент переводит устья в систему определения сам и печатает об этом строку в журнал вместе с координатами первого устья. Если коридор оказался пуст, журнал сообщает удаление ближайшего устья от линии, и по этому числу сразу видно, узок ли коридор или слои живут в разных местах.

## Раскраска и легенда

Слой интервалов сразу выходит раскрашенным: категория на каждый код в порядке первого появления сверху вниз, цвет детерминирован от самого кода и не меняется между прогонами и машинами. Легенда «код - цвет» появляется в дереве слоёв сама. Последней стоит серая категория **прочее**, в неё попадает всё, что не сопоставилось с известными кодами, поэтому ничего не исчезает молча. Колонки обведены тонким чёрным контуром и читаются поверх полос разреза. Полосы пластов в **Разрез по линии** красятся тем же механизмом по имени кровли, поэтому пласт, названный тем же кодом, что в таблице интервалов, совпадает по цвету с колонками сам собой. Стволы рисуются тонкой серой линией от устья до забоя, устья точками с короткой подписью. Подпись берётся из поля **number** слоя устьий (синонимы name и label), а без него из hole\_id, составной идентификатор при этом остаётся в атрибутах для стыковки.

## Обрезка по чертежу и рамке

По умолчанию колонки обрезаются рамкой чертежа - интервалом отметок zmin и zmax из определения. Интервал на кромке подрезается до кромки, интервал целиком за рамкой пропускается, ствол и подпись зажимаются рамкой, скважина целиком за рамкой выпадает из чертежа. Галочка выключает обрезку совсем.

Рамка одна на весь чертёж, а кровля верхней толщи в каждой точке своя, поэтому для среза по пластам подайте необязательный вход **Чертёж разреза** - полигоны полос из **Разрез по линии**. Колонки режутся по верхней и нижней огибающей полос в своей позиции, скважины не вылезают за чертёж, как в горных пакетах. За краем полос этот вход не действует, там продолжает работать рамка.

Допуск в дополнительных параметрах расширяет рамку и полосы наружу, в единицах отметки. Обрезается только геометрия, в атрибутах ztop и zbot остаются настоящие отметки интервала.

## Цвет колонок: справочник пластов

По умолчанию цвет интервала считается от его кода и не меняется между прогонами. Необязательный вход **Справочник пластов (таблица)** заменяет эти цвета на цвета справочника: найденные коды красятся из него, порядок категорий в легенде идёт по залеганию сверху вниз, коды вне справочника сохраняют прежний цвет. В журнале появляются сводка чтения и строка о том, сколько кодов нашлось.

Справочник у 4.01 и 4.02 может быть один и тот же, и это его сильная сторона. Полосы чертежа несут код пласта, а интервалы скважин часто несут породу. Если в таблице интервалов есть поле с индексом пласта, укажите его как поле кода и подайте тот же справочник, что в 4.01 - тогда колонки сольются с полосами по цвету, и на чертеже останется видно только расхождение скважины с построенной поверхностью. Если же интервалы несут литологию, справочник пластов ей не поможет, там нужна своя легенда.

## Параметры

| Параметр                            | Что задаёт                                             | По умолчанию   |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------|
| Определение разреза                 | Линии, vex и раскладка от <b>Разрез по линии.</b>      | -              |
| Устья скважин (collar)              | Точечный слой устьев.                                  | -              |
| Интервалы скважин (interval)        | Таблица интервалов.                                    | -              |
| Коридор от линии                    | Буфер, единицы карты. 0 - все скважины на все разрезы. | 0              |
| Обрезать интервалы по рамке чертежа | Рамка zmin и zmax из определения.                      | включено       |
| Чертёж разреза (для обрезки)        | Полигоны полос из 4.01, срез по огибающим.             | пусто          |
| Поля collar и interval (Доп.)       | Переопределение автопоиска полей.                      | находятся сами |
| Поле подписи устья (Доп.)           | Откуда короткая подпись устья.                         | number         |
| Допуск обрезки (Доп.)               | Расширение рамки и полос, единицы отметки.             | 0              |
| Справочник пластов (таблица)        | Цвет и порядок кодов из данных.                        | пусто          |
| Интервалы скважин (чертёж)          | Вертикальные отрезки с раскраской по коду.             | создаётся      |
| Стволы скважин (чертёж)             | Линии от устья до забоя.                               | создаётся      |
| Устья на чертеже                    | Точки с подписью из number.                            | создаётся      |
| Интервалы скважин (3D)              | LineStringZ в реальных координатах, глубина в Z.       | по запросу     |

Выбранные слои и коридор запоминаются, следующий запуск в том же проекте открывается с уже подставленными входами.

## 4.03 Состав пласта на разрезе

Инструмент **Состав пласта на разрезе** красит полосу одного пласта по гриду состава вдоль линии. Он берёт кровлю, подошву и грид состава, свой кригинг не делает, и работает по одному пласту за раз. Он стоит в группе **Разрез**.

Так показывают смену литологического состава внутри промышленного пласта вдоль разреза. Грид состава готовят отдельно: содержание обычным кригингом, минеральный тип - индикаторным (инструмент **Категориальный индикаторный кригинг**).

## Два режима

Непрерывное содержание (KCl, нерастворимый остаток): полоса режется на тонкие вертикальные срезы, каждый со средним значением. Стиль слоя ставьте градиентный (по полю **value**), тогда вдоль полосы виден плавный переход содержания.

Категориальный минеральный тип или фации (сильвинит, замещение, галит): смежные срезы одного класса сливаются в фациальные зоны. Стиль ставьте по категориям (по полю **class**). Зоны замещения видны как смена цвета вдоль линии.

## Параметры

| Параметр                | Что задаёт                                             | По умолчанию |
|-------------------------|--------------------------------------------------------|--------------|
| Линия разреза           | Та же линия, что и для разреза.                        | -            |
| Кровля пласта           | Растр кровли.                                          | -            |
| Подошва пласта          | Растр подошвы.                                         | -            |
| Грид состава            | Растр содержания или класса.                           | -            |
| Состав                  | Непрерывное или категориальное.                        | непрерывное  |
| Шаг выборки вдоль линии | Через сколько единиц брать отсчёт. 0 - по ячейке.      | 0            |
| Вертикальный масштаб    | Режим: отношение Г:В или множитель.                    | Г:В          |
| Значение масштаба       | Отношение Г:В или множитель.                           | 10           |
| Выборка раstra (Доп.)   | Билинейно или ближайший (для класса всегда ближайший). | билинейно    |
| Состав пласта (чертёж)  | Выходные полигоны в осях расстояние×высота.            | создаётся    |
| Состав пласта (3D)      | Полигоны PolygonZ в реальных координатах.              | по запросу   |

Запускайте инструмент по каждому промышленному пласту отдельно, со своим гридом состава. Полосу состава кладите поверх чертежа разреза. Для точного наложения возьмите множитель, напечатанный инструментом **Разрез по линии**, и задайте его здесь в режиме **множитель** (отношение Г:В считается по одному пласту и для наложения не годится).

## Определение разреза и общие параметры

Геометрически разрез задают две вещи - линия в реальной системе координат и вертикальный масштаб vex. Инструмент **Разрез по линии** выдаёт их вместе как слой **Определение разреза**: по линии на каждый разрез, с полями sec, sec\_id, vex, step, zmin, zmax, ox и oy. Это общий источник правды.

Инструменты пересечения, проекции, обратной проекции читают линию и vex из этого определения, поэтому их результаты ложатся на разрез без ручной подгонки масштаба. Постройте разрез один раз, определение переносится вместе с проектом и подаётся в остальные инструменты группы.

Когда разрезов несколько, определение несёт их все. Инструменты **Пересечение поверхностей с разрезом** (4.04), **Пересечение векторов с разрезом** (4.05) и **Пересечение TIN с разрезом** (4.06) обрабатывают весь набор за один прогон: каждый результат ложится на

свой чертёж по смещению из полей `ox` и `oy` и получает поля `sec` и `sec_id`. Нужен один разрез - поставьте фильтр на слой определения или выделите нужную линию, порядок объектов сохраняется. Если в определении окажутся разрезы с разным `vex` (такое бывает, если склеить определения от разных запусков), инструмент предупредит, что чертежи несопоставимы, и посоветует пересобрать их одним прогоном.

Инструменты **Состав пласта на разрезе** (4.03), 4.07 и 4.08 пока работают по одному разрезу и берут из определения первый. **Скважины на разрезе** (4.02) обрабатывают весь набор пакетно. При нескольких разрезах подавайте им определение, отфильтрованное на нужный створ.

Слои определения, сделанные прежними версиями плагина, читаются по-старому. Полей `sec` и `ox` в них нет, поэтому имя выходит пустым, смещение нулевым, и результат ложится ровно так же, как раньше.

Инструмент **Состав пласта на разрезе** принимает определение разреза необязательным входом: если оно задано, вертикальный масштаб берётся из него, и полоса состава точно ложится на пласты по высоте. **Скважины на разрезе** работают только от определения, отдельного выбора масштаба у них нет.

Разрез также обрезает выклинивания: где кровля опускается до подошвы, пласт пропадает, полоса не строится. Так в демо второй промышленный пласт выклинивается к востоку.

Для ломаной линии «Разрез по линии» по запросу выдаёт три служебных слоя в осях чертежа. Угловые точки ставятся на каждом узле ломаной, сверху и снизу разреза. У точки поля: номер, имя (УГ-1, УГ-2 ...), сторона (верх или низ), расстояние вдоль линии, плановые `X` и `Y`, азимут отрезка и готовая подпись. Сверху подписывается имя, снизу - плановые координаты `X` и `Y`, округление до сотых. Азимут и расстояние остаются полями слоя - их удобно вынести в таблицу макета. Прилагается стиль: вверху треугольник вершиной вверх, внизу полка.

Опционально выдаётся таблица углов - слой-полигоны под разрезом. Ячейки лежат между угловыми вертикалями, границы проходят под ними, две строки: длина и азимут отрезка между соседними углами, подпись по центру, заливка белая. Она рисуется прямо на холсте и уезжает в макет вместе с разрезом. Угловые вертикали - линии на узлах ломаной на всю высоту разреза. Горизонтальные оси - линии равной высоты с отметками (по умолчанию пять, с хорошим округлением) для шкалы высот. Поля чертежа расширены на пять процентов вверх и вниз, угловые точки сидят на этих краях.

## 4.04 Пересечение поверхностей с разрезом

Инструмент **Пересечение поверхностей с разрезом** наносит поверхности-гриды на разрез линиями в осях расстояние-высота. Каждый грид выбирается вдоль линии определения, и его сечение ложится на чертёж рядом с пластами. Линия и `vex` берутся из определения разреза, поэтому совпадение с разрезом автоматическое.

Так на разрез наносят водоносные горизонты, маркирующие поверхности, кровлю соли, поверхности аномалий. На вход - определение разреза и список гридов, на выходе линии в осях разреза (и при желании 3D-линии в реальных координатах).

Проекция объектов и обратная проекция проверены на реальных данных и метку **(бета)** больше не несут. Развёртка стенки ствола остаётся помеченной: она рабочая, но её интерфейс и набор примеров ещё уточняются.

### Параметры

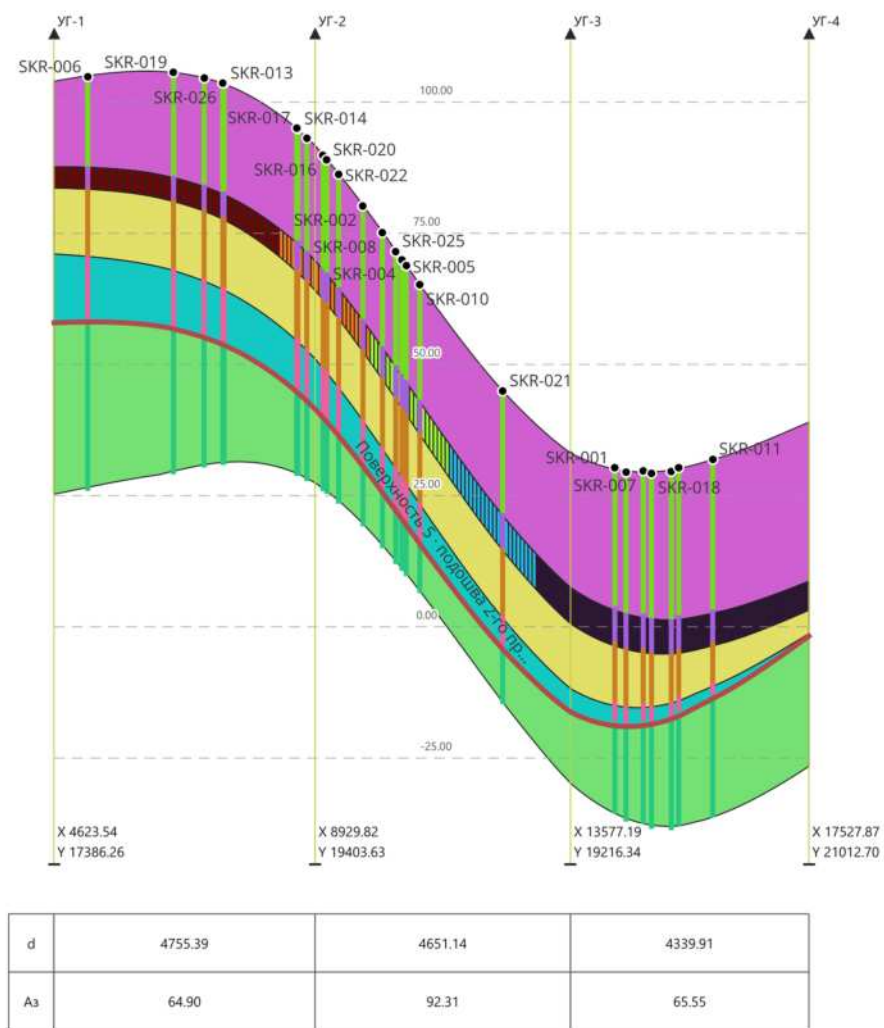


Рис. 28: Оформление разреза: рамка с угловыми вертикалями и треугольниками, горизонтальные оси с отметками слева и таблица углов под разрезом.

| Параметр                               | Что задаёт                                                                                 | По умолчанию / совет |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Определение разреза                    | Слой определения от 4.01: линия с полями vех и step. Задаёт линию, масштаб и высоту рамки. | -                    |
| Поверхности-гриды                      | Список растров, чьи сечения наносятся на разрез линиями.                                   | -                    |
| Шаг выборки вдоль линии (Доп.)         | Через сколько единиц карты брать отсчёт. 0 - по размеру ячейки.                            | 0                    |
| Выборка раstra (Доп.)                  | Билинейно или ближайший.                                                                   | билинейно            |
| Линии поверхностей на разрезе (чертёж) | Выходные линии в осях расстояние × высота.                                                 | создаётся            |
| Линии поверхностей (3D)                | Выходные 3D-линии в реальных координатах.                                                  | по запросу           |

## 4.05 Пересечение векторов с разрезом

Если поверхности 4.04 наносятся гридами, то этот инструмент наносит на разрез **векторные** объекты по точному пересечению с линией разреза. Тип результата зависит от объекта.

Линия **без отметки высоты** (плоская в плане - разлом, граница, контур) даёт **вертикаль на всю высоту** в станции пересечения. Известно, где разрез её пересекает по горизонтали, но не на какой глубине, поэтому метка идёт через всю рамку. Линия **с отметкой Z** (3D-объект, наклонный, контур поверхности) даёт **точку** на реальной высоте в месте пересечения - например, контур кровли с отметкой ложится точкой ровно на пласт. Полигон (зона в плане - замещение, шахтное поле, лицензия) даёт **вертикальную полосу** на интервале, где разрез идёт сквозь зону.

Линия, вех и высота рамки берутся из определения разреза - его пишет **Разрез по линии**, и в нём теперь хранится вертикальный размах. Поэтому для объектов без Z подавать ничего не нужно. Для старых определений без высоты остаётся запасной путь: **Чертёж разреза** необязательным входом или диапазон Z в дополнительных. Когда у объекта есть Z, высота не нужна - точка ставится по отметке. Пустые выходы не создаются: разлом даёт только вертикали, маркер - только точки, зона - только полосы.

В отличие от **Проекция объектов на разрез** (приблизительной, по коридору) это точное пересечение - метка появляется только там, где геометрия реально режет линию разреза. На вход можно подать **сразу несколько слоёв** (линии и полигоны вперемешку) - все обработаются за один прогон, как список поверхностей в 4.04, а в выходах поле **src** хранит слой-источник каждой метки. Демо-генератор выдаёт разлом, маркер с Z и зону замещения, пересекающие демо-разрез, - на них инструмент пробуете сразу.

### Параметры

| Параметр            | Что задаёт                                                                                | По умолчанию / совет |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Определение разреза | Слой определения от 4.01: линия, вех и высота рамки. Для объектов без Z этого достаточно. | -                    |

| Параметр                                      | Что задаёт                                                                                          | По умолчанию / совет |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Слои для пересечения                          | Линии и полигоны<br>вперемешку, за один прогон.<br>В выходах поле src хранит<br>слой-источник.      | -                    |
| Чертёж разреза                                | Запасной источник высоты<br>рамки для старых<br>определений без zmin/zmax.                          | по желанию           |
| Переносить атрибуты<br>объектов на разрез     | Поля исходных объектов<br>уходят в выходы, чтобы<br>красить и подписывать метки<br>по своим данным. | включено             |
| Сохранять имя исходного<br>слоя               | Выход называется по<br>исходному слою, когда он<br>один.                                            | выключено            |
| Сохранять стиль исходного<br>слоя             | Оформление берётся у<br>исходного слоя, а не из<br>штатного стиля модуля.                           | выключено            |
| Линия рельефа на чертеже                      | Слой линий поверхностей от<br>4.01. Верх зон и разломов<br>ложится по рельефу, а не по<br>рамке.    | по желанию           |
| Линия низа на чертеже                         | Тот же слой или его часть.<br>Низ зон и разломов ложится<br>по подошве, а не по рамке.              | по желанию           |
| Поле нижней отметки полос<br>и вертикалей     | Низ каждого объекта из его<br>собственного атрибута.                                                | по желанию           |
| Нижняя отметка это глубина<br>от верха (Доп.) | Переключает чтение поля с<br>абсолютной отметки на<br>глубину.                                      | выключено            |
| Низ диапазона Z (Доп.)                        | Нижняя отметка рамки, если<br>нет ни определения с<br>высотой, ни чертежа.                          | 0                    |
| Верх диапазона Z (Доп.)                       | Верхняя отметка рамки в том<br>же случае.                                                           | 0                    |
| Вертикали на разрезе                          | Выход для линий без Z<br>(разлом, граница): вертикаль<br>на всю высоту.                             | создаётся            |
| Точки пересечения                             | Выход для линий с Z (контур<br>с отметкой): точка на<br>реальной высоте.                            | создаётся            |
| Полосы зон на разрезе                         | Выход для полигонов (зона в<br>плане): вертикальная полоса<br>на интервале.                         | создаётся            |

Пустые выходы не создаются: каждый тип объекта идёт только в свой слой.

## Имя и стиль исходного слоя

Две галочки для случая, когда на вход подан один слой. Обе по умолчанию выключены, поэтому прежние прогоны воспроизводятся без изменений.

**Сохранять имя исходного слоя.** Выход называется по источнику: слой геологии даёт «Геология на разрезе» вместо универсального «Полосы зон на разрезе». Если один слой родил сразу несколько видов объектов, к имени добавляется вид, иначе три слоя в дереве

назывались бы одинаково.

**Сохранять стиль исходного слоя.** Оформление берётся у самого слоя, а не из штатного стиля модуля. Вместе с переносом атрибутов это снимает главную ручную работу на разрезе: категорийная раскраска геологии по полю ложится на полосы как есть, повторять палитру вручную не нужно. Стиль переносится, когда тип геометрии совпадает: полигоны в полосы, линии без отметки в вертикали. Линия с отметкой Z даёт точку, линейный стиль на неё не встанет, и там остаётся штатный.

Слоёв подано несколько - обе галочки молчат, потому что выходы сводят все источники в один слой, и в журнал уходит строка почему.

## Обрезка по рельефу и линии низа

Зоны и разломы по умолчанию рисуются на всю высоту рамки: известно, где объект пересекает линию, и неизвестно, на какой он глубине. Три необязательных параметра снимают это ограничение по краям.

**Линия рельефа на чертеже** обрезает объекты сверху. Подавайте слой линий рельефа, который выдаёт **4.01 Разрез по линии**. Верх зон и разломов ляжет по рельефу, а кромка полосы повторит его переломы, а не останется прямой.

Обрезка идёт именно по линии с чертежа, а не по растру ЦМР, и это осознанно. Разрез мог строиться по другой поверхности, и тогда растр с чертежом разойдутся. Обрезать надо по тому, что человек видит перед собой. Разрезы сопоставляются по полю **sec\_id**, поэтому в пакетном прогоне каждый чертёж режется своим профилем.

**Линия низа на чертеже** обрезает объекты снизу и устроена так же. Подавайте подошву, почву пласта или любую нижнюю поверхность с того же чертежа. Линии нет, низ остаётся по рамке.

Если в слое несколько поверхностей, обрезка идёт по огибающей: сверху по самой высокой, снизу по самой низкой. Поэтому выход **Линии поверхностей на чертеже** годится как есть, подавать его можно сразу в оба входа. Когда нужна одна конкретная поверхность, подайте слой, отфильтрованный по полю **name**.

Кромки считаются в одних и тех же станциях, узлы обеих линий сводятся в общий набор. Иначе верх и низ, посчитанные каждый по своим станциям, пересеклись бы между узлами и полоса вышла бы вывернутой. Низ не поднимается выше верха: там, где линия низа прошла над рельефом, полоса схлопывается и объект не выдаётся вовсе. Число срезанных целиком печатается в журнал, обычно это зоны, лежащие выше рельефа.

**Поле нижней отметки** задаёт низ полос и вертикалей поштучно, из атрибута самого объекта. По умолчанию значение читается как абсолютная отметка. Флажок в дополнительных параметрах переключает его на глубину от верха объекта: это удобно, когда в данных записана мощность зоны, а не её подошва. Ниже рамки низ не опускается ни в каком случае.

## Атрибуты объектов на разрезе

Флажок **Переносить атрибуты объектов на разрез** включён по умолчанию. Смысл простой: полосы и вертикали на чертеже красятся и подписываются по вашим же полям, без ручного связывания с исходным слоем.

Слоёв подаётся несколько, схемы у них разные, поэтому колонки сводятся в один общий набор. Поле, которого у слоя нет, остаётся пустым. Одинаковое имя в разных слоях считается одной колонкой, тип берётся от первого слоя, где оно встретилось.

Имена, совпадающие со служебными (**sec, src, label, d, z, d1, d2**), переименовываются с суффиксом. Это не косметика: колонка **d** несёт расстояние вдоль разреза, и атрибут объекта с тем же именем молча подменил бы координату, а заметили бы это уже на чертеже.

Число собранных колонок печатается в журнал.

## 4.06 Пересечение TIN с разрезом

Растровый грид (4.04) - это  $z = f(x, y)$ , одно значение высоты на точку плана. Опрокинутую складку он передать не может в принципе: над одной точкой у неё несколько отметок одной поверхности. Этот инструмент режет разрезом **TIN** - поверхность из настоящих 3D-треугольников, которая умеет нависать.

Механика чисто геометрическая. Разрез - вертикальная штора вдоль ломаной. Каждый треугольник TIN пересекается с вертикальной плоскостью своего сегмента, даёт отрезок (станция вдоль линии, реальная высота), и все отрезки собираются в трассу поверхности. Нависание выходит само собой: над одной станцией оказывается несколько отрезков по высоте, и трасса заворачивается - крылья опрокинутой складки ложатся как есть.

На вход - слои **3D-полигонов** (PolygonZ, грани TIN, при этом не-треугольники разбиваются веером на треугольники) и при желании **меш-слой**. Линия и vех берутся из определения разреза, высота - с самих граней, поэтому для TIN задавать ничего не нужно. Кроме чертёжной трассы можно получить её и в реальных 3D-координатах.

Важное ограничение: **меш QGIS - это 2.5D**, высота в нём скаляр на вершине, над точкой снова одно значение, опрокинутое в меше не сохраняется. Поэтому нависание дают только настоящие 3D-грани от геоделлера (Leapfrog, Micromine и подобные). Меш принимается для общности, на однозначных поверхностях. Демо-генератор выдаёт опрокинутую TIN-складку - на ней заворот трассы виден сразу.

### Параметры

| Параметр                       | Что задаёт                                                                            | По умолчанию / совет |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Определение разреза            | Слой определения от 4.01: линия и vех. Высота берётся с самих граней.                 | -                    |
| Грани TIN (PolygonZ)           | Слой 3D-полигонов - грани TIN от геоделлера. Нависание и опрокинутое воспроизводятся. | необязательно        |
| Меш-слой (2.5D)                | Меш QGIS для общности. Над точкой одно значение, опрокинутое в меше не сохраняется.   | необязательно        |
| Трасса TIN на разрезе (чертёж) | Выходная 2D-трасса в осях разреза, может заворачиваться.                              | создаётся            |
| Трасса TIN (3D)                | Выходная трасса в реальных 3D-координатах.                                            | по запросу           |

Подайте хотя бы один из двух входов - грани TIN или меш.

## 4.07 Проекция объектов на разрез

Инструмент **Проекция объектов на разрез** проецирует точки, линии и полигоны на линию разреза. Для каждой вершины горизонталь это расстояние вдоль линии до её проекции, высота - отметка из 3D-геометрии или из выбранного поля. Дальние объекты отсекаются коридором.

| Параметр                    | Что задаёт                                                | По умолчанию / совет |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------|
| Определение разреза         | Линия разреза с полем vех (вертикальное преувеличение).   | -                    |
| Объекты для проекции        | Слой, объекты которого проецируются на плоскость разреза. | -                    |
| Поле отметки                | Атрибут Z, если геометрия объектов без Z.                 | -                    |
| Коридор от линии            | Ширина полосы захвата от линии разреза. 0 = все объекты.  | 0                    |
| Объекты на разрезе (чертёж) | Выход: объекты в координатах чертежа разреза.             | -                    |

Это обобщение проекции скважин на любые объекты: аномалии, точки опробования, трассы, контуры. Результат в осях разреза, кладётся поверх чертежа.

## 4.08 Спроецировать с разреза

Инструмент **Спроецировать с разреза** делает обратное: объекты, нарисованные на чертеже разреза, возвращает в реальные координаты. Горизонталь вершины читается как расстояние вдоль линии (даёт план), высота - как отметка  $Z = \text{высота} / \text{vех}$ . Линия и vех берутся из того же определения, по которому строился чертёж.

| Параметр                       | Что задаёт                                                        | По умолчанию / совет |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Определение разреза            | Линия разреза с полем vех.                                        | -                    |
| Объекты с чертежа разреза      | Объекты в координатах чертежа для возврата в план.                | -                    |
| Объекты в плане (с отметкой Z) | Выход: объекты в плановых координатах с восстановленной отметкой. | -                    |

Так нарисованный руками на разрезе объект - контур залежи, нарушение, граница - попадает обратно в план и в 3D с отметкой Z.

## 4.09 Развёртка стенки ствола (бета)

Инструмент **Развёртка стенки ствола** строит цилиндрический разрез. Вокруг оси ствола на заданном радиусе берётся окружность с угловым шагом (по умолчанию 1 градус), и поверхности-гриды выбираются вдоль неё. Развёртка ложится в оси длина дуги по окружности - высота.

| Параметр                        | Что задаёт                                                  | По умолчанию / совет |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------|
| Ось ствола (точка устья)        | Точка устья ствола.                                         | -                    |
| Радиус ствола, ед. карты        | Радиус развёртки стенки.                                    | 4                    |
| Поверхности-гриды (маркирующие) | Гриды поверхностей, отметки которых наносятся на развёртку. | -                    |

| Параметр                         | Что задаёт                                                       | По умолчанию / совет |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Угловой шаг, градусы             | Шаг обхода стенки по азимуту.                                    | 1                    |
| Вертикальный масштаб             | Режим вертикального преувеличения (отношение Г:В или множитель). | отношение            |
| Значение масштаба                | Число преувеличения по выбранному режиму.                        | 10                   |
| Выборка раstra (доп.)            | Способ снятия значения с грида поверхности.                      | -                    |
| Развёртка стенки (дуга × высота) | Выход: развёртка стенки ствола.                                  | -                    |

Каждая маркирующая поверхность даёт линию своего пересечения со стенкой ствола - при падении пластов линии наклонены и волнисты. Ось задаётся точечным слоем устья, радиус в единицах карты, вертикальный масштаб как у разреза.

## 4.10 Создать пример для разреза

Инструмент **Создать пример для разреза** готовит полный учебный набор для группы **Разрез**, чтобы опробовать её инструменты без кригинга реальных данных. В панели он стоит в группе **Разрез** последним.

За один прогон выдаются шесть стопкой поверхностей с падением и переменной мощностью (пять пластов в переслаивании, второй и четвёртый промышленные и тонкие), три линии разрезов через площадь (ломаная с двумя изломами, короткая прямая и наклонная с одним изломом), готовая пара слоёв модели бурения и по многоканальному гриду на каждый промышленный пласт. Конвенция каналов грида пласта: канал 1 - кровля, канал 2 - подошва, каналы 3 и далее - параметры (здесь содержание и минеральный тип с зоной замещения, поля содержания у пластов независимые, стохастические). Один файл описывает пласт целиком - как блочную модель, куда новые параметры добавляются каналами. Для инструментов пересечения добавлены демонстрационные векторы: разлом без отметки высоты, маркирующий контур с Z, зона замещения и опрокинутая TIN-складка из 3D-граней PolygonZ.

## Скважины с интервалами опробования

Пара слоёв модели бурения выдаётся готовой, по тому же контракту, по которому выгружает Геоинструктор. Вместе с ней выдаётся **справочник пластов демо**: те же коды, что стоят в интервалах, с порядком залегания, телом и цветом. Поставляемый справочник из 4.11 собран по Верхнекамскому месторождению и кодов демо не знает, поэтому без своего справочника колонки демо оставались без цвета.

Полосы пластов в 4.01 демо-справочник не красит, и это не недоделка, а устройство поиска. Пласт там определяется по именам слоёв кровли и подошвы: у слоя **KpII\_top** снимается роль и остаётся код **KpII**, по нему справочник и опрашивается. Поверхности демо названы просто номерами и кода пласта не несут, поэтому полосы остаются в цветах по умолчанию. На своих данных, где слои названы кодами пластов, тот же справочник красит и полосы, и колонки. **Устья collar** это точечный слой с отметкой устья и глубиной забоя, **интервалы interval** это обычная таблица с глубинами по стволу от устья и кодом пласта.

Поэтому инструмент **4.02 Скважины на разрезе** пробуете без своих данных и без обращения к базе: запустите 4.10, затем 4.01 по любой из трёх линий, затем 4.02 с этой парой, определением разреза и демо-справочником. Колонки скважин получают цвет и порядок в легенде. Скважины стоят вдоль всех трёх линий, так что колонки лягут на любой чертёж.

Та же пара без изменений годится и для трёхмерного просмотра: там глубина уходит в Z напрямую, без вертикального масштаба и смещения раскладки.



Рис. 29: Конвенция многоканального грида пласта: каналы 1-2 несут геометрию (кровля и подошва), каналы 3 и далее - параметры. Один файл кормит инструмент 4.03.

### Слой демо и их атрибуты

| Слой                      | Геометрия  | Атрибуты                                                                                                                                           |
|---------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Линии разрезов (демо)     | линия      | name (Разрез 1, 2, 3). Три створа разной длины: ломаная с двумя изломами (вершины проверяют пикетаж), короткая прямая и наклонная с одним изломом. |
| Устья collar (демо)       | точки      | hole_id, z (отметка устья), eoh (глубина забоя), number для подписи.                                                                               |
| Интервалы interval (демо) | таблица    | hole_id, from, to (глубины по стволу от устья), code (индекс пласта).                                                                              |
| Справочник пластов (демо) | таблица    | code, order, body, color, strata. Под коды интервалов демо.                                                                                        |
| Зона (демо, полигон)      | полигон    | name. Для инструмента пересечения векторов 4.05.                                                                                                   |
| Разлом (демо, 2D)         | линия      | name. Секущая створа, смещена с излома линии.                                                                                                      |
| Маркер с Z (демо, 3D)     | линия Z    | name. Проверка 3D-геометрий в 4.05.                                                                                                                |
| Опрокинутая TIN (демо)    | полигоны Z | name. Опрокинутая складка для 4.06.                                                                                                                |
| Поверхность 1...6         | растр      | Один канал отметок.                                                                                                                                |
| Пласт 1-й/2-й пром.       | растр      | Каналы: 1 кровля, 2 подошва, 3 содержание, 4 минтип.                                                                                               |

Рабочий цикл показан в разделе 4.01: поверхности идут в **Разрез по линии**, пара collar и interval в **Скважины на разрезе**, грид состава в **Состав пласта на разрезе**, а демо-векторы и TIN в инструменты пересечения 4.05 и 4.06. Так вся группа разреза прокатывается на согласованных данных.

## Параметры

| Параметр                   | Что задаёт                                                                                    | По умолчанию / совет |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Область (экстент)          | Прямоугольник, в котором генерируется набор.                                                  | задать по проекту    |
| Зерно генератора (Доп.)    | Зерно ГСЧ для воспроизводимости. 0 - случайно при каждом запуске.                             | 0                    |
| Поверхность 1...6          | Шесть растров сверху вниз: кровли и подошвы вмещающих и двух промышленных пластов.            | создаются            |
| Линии разрезов (3 шт.)     | Три створа через площадь для подачи в 4.01. Инструмент по умолчанию строит разрез по каждому. | создаются            |
| Устья скважин collar       | Точечный слой модели бурения (hole_id, z, eoh, PointZ).                                       | создаётся            |
| Интервалы скважин interval | Таблица модели бурения (hole_id, from, to, code, kcl).                                        | создаётся            |
| Пласт 1-й пром.            | Многоканальный грид: кровля, подошва, содержание, минтип.                                     | по запросу           |
| Пласт 2-й пром.            | То же для второго промышленного пласта, поля независимые.                                     | по запросу           |
| Разлом, маркер с Z, зона   | Демо-векторы для 4.05: линия без Z, контур с Z, полигон зоны.                                 | по запросу           |
| Опрокинутая TIN            | 3D-границы опрокинутой складки для 4.06.                                                      | по запросу           |

Полный перечень полей выходных слоёв - в приложении **Данные для разреза** (раздел «Поля демо-слоёв» в конце руководства).

### 4.11 Образец справочника пластов

Инструмент кладёт в проект поставляемый образец справочника пластов - тот самый, который читают **4.01** и **4.02**. Нужен он по простой причине: образец лежит файлом в каталоге плагина, куда пользователь обычно не заглядывает. Без этого шага справочник приходится искать руками, а не найдя, подать в разрез первую попавшуюся таблицу и получить чертёж без цвета.

Параметров у инструмента нет. Один прогон - и слой **Справочник пластов (образец)** появляется в проекте и сразу виден в выпадающем списке инструментов разреза.

#### Что внутри

Таблица без геометрии, одна строка на пласт или междупластье, сверху вниз по разрезу. Колонки: код тела, номер сверху вниз, тело (пласт или междупластье), цвет, а также необязательные толщина и примечание, которые читаются, но пока не используются.

Образец собран по Верхнекамскому месторождению: 37 строк от покровных отложений до нижней каменной соли. Для другого месторождения он служит скелетом. Сохраните слой в

файл штатными средствами QGIS и правьте коды, порядок и цвета под свою стратиграфию.

## Тело заполняет геолог

Это главное, что стоит понять про справочник, и потому повторяется здесь. Тело из кода не выводится. Пласт **АБ** по написанию выглядит как «А плюс Б», но это цельный пласт, внутри которого лежат А, Б, корж А-А' и А'. Междупластье **Б-В** из кода не выводится вовсе, потому что пласта Б в списке нет, есть АБ. Инструмент значения тела не пересчитывает и в этом смысле не умнее человека, который их проставил.

## Составные тела серые

В образце есть **КрIIIa+б** - составное тело, сумма КрIIIa, междупластья КрIIIa-б и КрIIIб. Такие конгломераты в справочнике красятся серым, тем же оттенком, каким плагин помечает неопознанное. Причина в том, что цвет составного тела из цветов его частей не выводится: части могут быть разных цветов, и любой выбор был бы произволом. Серый читается как «цвет не задан», и его ставит человек.

Соседство целого с частями в одном списке имеет цену, о которой стоит знать. Порядок сверху вниз един, поэтому между **КрIIIб** и **КрIIIв** теперь лежат два тела, а не одно, и пара таких границ на разрезе даст серую полосу с перечнем вместо имени междупластья. На крупной гранулярности, между **КрIIIa+б** и **КрIIIв**, всё сходится обычным образом.

## Тот же файл вне QGIS

Образец лежит в папке **templates** внутри каталога плагина в двух видах, `plast_reference_vkms.xlsx` и `plast_reference_vkms.csv`. В книге Excel есть второй лист с правилами заполнения. Правьте любым удобным способом, инструменты разреза принимают и таблицу проекта, и GeoPackage, и CSV.

## 5.01 Фрактальная размерность

Инструмент строит карту фрактальной размерности поверхности вариограммным методом, родным для плагина. В скользящем окне считается лог-лог вариограмма по лагам от одной до N ячеек, по её наклону определяется показатель Хёрста H, а размерность вычисляется как  $D = 3 - H$ . На гладких дифференцируемых участках D около 2, на изрезанных и шумных - ближе к 3. Работают не столько сами значения, сколько их перепады: ими проявляются зоны тектонических нарушений, границы блоков и смена характера рельефа кровли.

Грид D сразу можно подать в **1.04 Изолинии из растра** и получить изолинии размерности. В дополнительных параметрах предусмотрена возможность записать H вторым каналом. Глобальные D и H по всей поверхности выводятся в журнал.

## Как читать карту

Абсолютные значения D важны меньше, чем их перепады. Линейный перепад через площадь - линеамент, кандидат в тектоническое нарушение. Пятно повышенной D - зона интенсивной складчатости или изрезанного рельефа кровли. Обширные ровные поля низкой D - спокойные блоки. Для чтения можно применить одноканальную псевдоцветную символику с контрастной палитрой и классификацией квантилями. Для отчётного плана по гриду D строятся изолинии с поясами инструментом **1.04**, и зоны нарушений оконтуриваются как изогипсы.

## Выбор окна и лагов

Малое окно (5-8 ячеек) показывает микроструктуру и локальные нарушения, большое (12-20) - региональные зоны. При сомнении можно посчитать оба и сравнить. Количество лагов 4

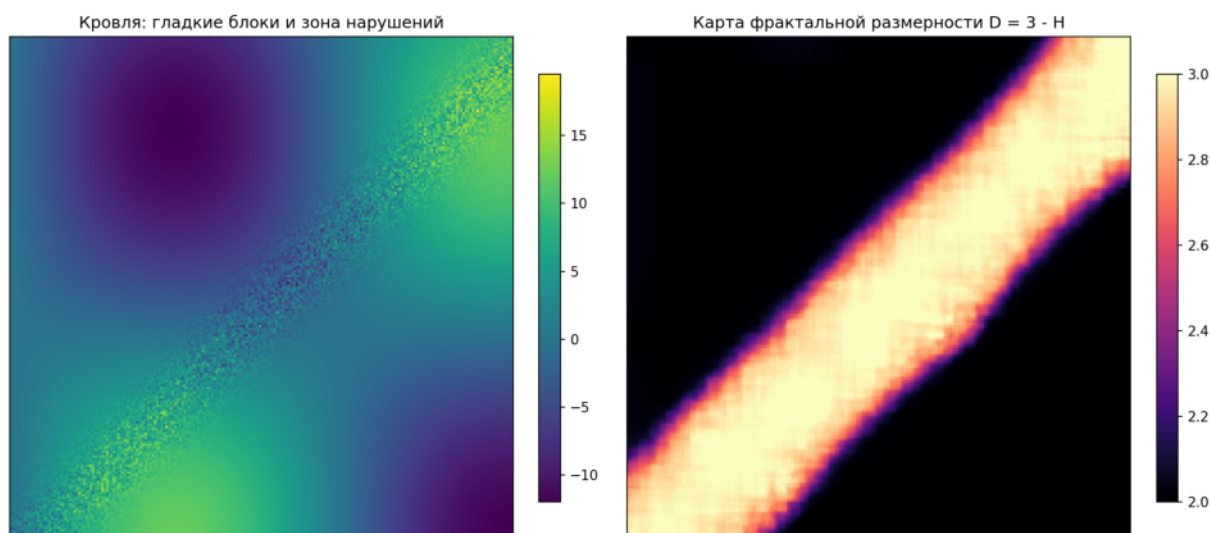


Рис. 30: Синтетическая кровля с диагональной зоной дробления и её карта D: спокойные блоки около 2, зона нарушений проявилась ярким линеаментом.

подходит почти всегда: больше лагов - устойчивее наклон, но толще минимальный масштаб, который метод способен различить. Окно и лаги ограничены размером грида, инструмент проверяет это сам.

## Рабочий цикл

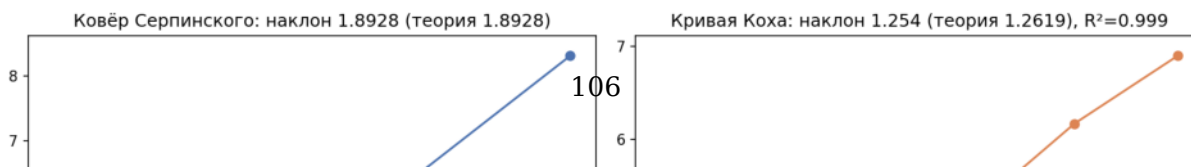
Кровля пласта из кригинга подаётся в **5.01** с окном 8, полученный грид D - в **1.04 Изолинии из растра** (канал 1), и поверх структурного плана ложатся изолинии размерности с поясами. Глобальное D из журнала - одно число на поверхность, по нему можно сравнивать участки или пласты между собой. Растр должен быть в метрической системе координат. Демо-поверхности подходят как есть.

## Параметры

| Параметр                | Что задаёт                          | По умолчанию / совет |
|-------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Поверхность (растр)     | Грид рельефа или любой поверхности. | -                    |
| Полурадиус окна, ячеек  | Размер скользящего окна.            | 8                    |
| Количество лагов (Доп.) | Лаги вариограммы 1..N ячеек.        | 4                    |
| Канал высот (Доп.)      | Канал с отметками.                  | 1                    |
| Записать H (Доп.)       | Добавить H вторым каналом.          | выкл                 |
| Фрактальная размерность | Грид D (и H при галке).             | -                    |

## 5.02 Box-counting маски

Классический box-counting для бинарных масок. Растр бинаризуется порогом (объект - значения больше порога), маска покрывается ячейками убывающего размера, наклон  $\log N$  от  $\log(1/\text{размер})$  даёт одну размерность D на всю маску. Линейный объект даёт D около 1, пятно - около 2, изрезанные контуры зон замещения или выработанных пространств ложатся между. Точность на конечных масках порядка  $\pm 0.1$ , поэтому метод пригоден для сравнения масок между собой, а не как абсолютная мера. Результат выводится в журнал вместе с таблицей размеров и счётов и возвращается числом D, которое можно использовать дальше в моделях Processing.



## Откуда берётся маска

Маску можно взять из канала минтипа грида пласта с порогом между кодами классов, из грида вероятности индикаторного кригинга с порогом 0.5, из карты вероятности превышения с порогом кондиции, из векторных контуров выработок или зон, предварительно растеризованных штатным «Растеризация (вектор в растр)». Сравнить имеет смысл D масок одной природы на одной сетке: рост изрезанности контура замещения от пласта к пласту или от года к году - содержательный сигнал.

| Параметр     | Что задаёт                                 | По умолчанию |
|--------------|--------------------------------------------|--------------|
| Растр маски  | Любой растр, маска - значения выше порога. | -            |
| Порог        | Граница «объект/фон».                      | 0.5          |
| Канал (Доп.) | Канал растра.                              | 1            |

## 5.03 Размерность линий и границ

Инструмент считает размерность каждой линии методом циркуля (Ричардсона): линия проходится хордами убывающего раствора, наклон  $\log N$  от  $\log r$  даёт D. Прямая даёт единицу, изрезанная линия - больше. Полигоны принимаются наравне с линиями, у них меряется внешнее кольцо границы, поэтому изрезанность контуров зон и водосборов считается без предварительного преобразования. Выход - те же объекты с полями D и steps, среднее D выводится в журнал. Короткие линии получают пустое D. Метод проверен на эталонах: кривая Коха даёт 1.262 при теоретических 1.2619.

### Диагностика сглаживания изолиний

Пересглаженные изолинии теряют изрезанность, и D падает к единице. Порядок работы такой: изолинии строятся дважды, без сглаживания и с рабочими параметрами, оба слоя прогоняются через инструмент, средние D из журнала сравниваются. Падение на сотые - косметика, форма сохранена. Падение на десятые - сглаживание съедает геометрию поля, и скругление стоит ослабить или оставить только денсификацию. По полю D в атрибутах можно найти и конкретные линии, пострадавшие сильнее прочих.

### Другие применения

Изрезанность контуров зон в плане, сравнение детальности оцифровки границ из разных источников, контроль генерализации при подготовке мелкомасштабных планов - везде, где «насколько извилиста линия» должно стать числом.

| Параметр             | Что задаёт                         | По умолчанию |
|----------------------|------------------------------------|--------------|
| Линии                | Линейный слой (изолинии, контуры). | -            |
| Линии с размерностью | Те же линии с полями D и steps.    | -            |

## 5.04 Размерность Минковского (векторы)

Box-counting напрямую по векторам, без растеризации: линии и границы полигонов покрываются сеткой убывающего размера, наклон  $\log N$  от  $\log(1/\text{размер})$  даёт размерность Минковского. Прямая линия и гладкая граница дают D около единицы, речная сеть - 1.1-1.5, сильно изрезанная береговая линия - до 1.3 и выше. Каждый объект получает поля D\_mink и D\_r2 (качество лог-лог аппроксимации, ниже 0.85 оценке доверять нельзя). Отдельно считается и выводится в журнал D слоя как единого множества: для речной сети это размерность сети целиком, и она закономерно выше размерности отдельных рукавов.

Метод дополняет циркуль из **5.03**: циркуль меряет извилистость одной линии, Минковский - заполнение плоскости набором объектов. Размерность возвращается и числовым выходом для моделей Processing.

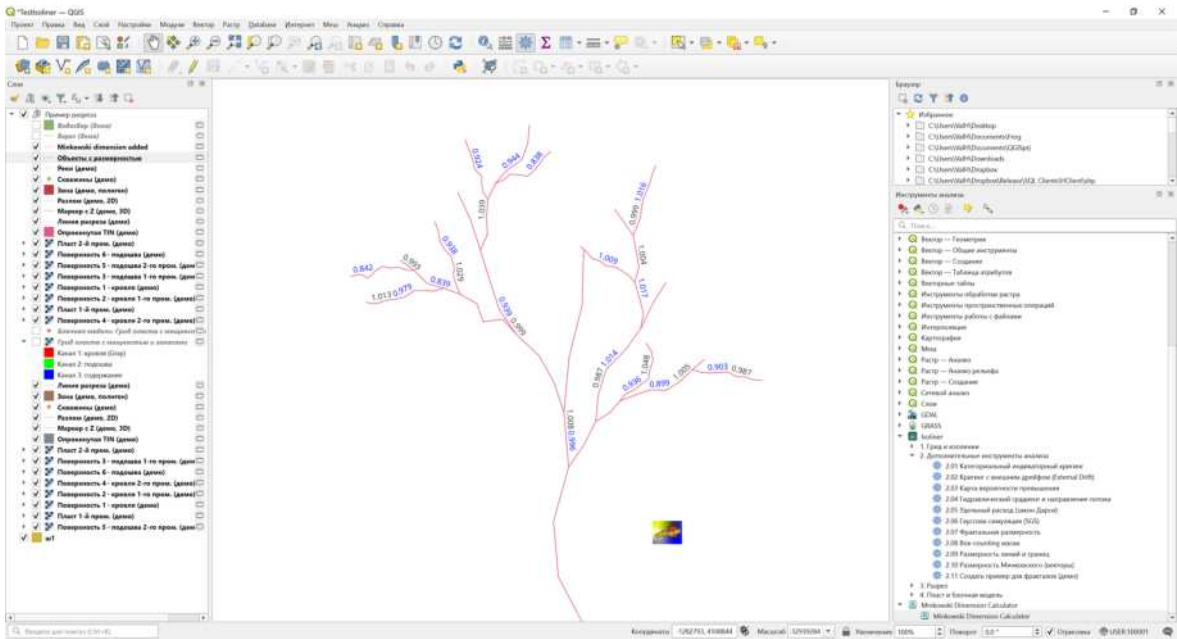


Рис. 32: Демо-реки с подписями D\_mink по рукавам: почти гладкие рукава дают значения около единицы, сеть целиком - выше.

| Параметр                            | Что задаёт                                                                             | По умолчанию |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Линии или полигоны                  | Векторный слой, у полигонов берутся кольца границ.                                     | -            |
| Количество размеров сетки, K (Доп.) | Ступеней лесенки, слишком большое K уводит ячейки ниже детальности линии и занижает D. | 8            |
| Сдвиг сетки на размер (Доп.)        | Случайные смещения, берётся минимальное покрытие, привязка к сетке снимается.          | 3            |
| Фактор уплотнения (Доп.)            | Шаг выборки вдоль сегментов в долях ячейки, 0 - только вершины.                        | 0.5          |

5.05 Создать пример для фракталов (демо)

Генератор учебных объектов для всей фрактальной группы: ветвящаяся речная сеть с полем order (порядок притока), полигон водосбора с изрезанной границей и отдельная береговая линия, построенная срединными смещениями. Реки можно подать в **5.04** и получить размерность сети. Берег и границу водосбора - в **5.03** и **5.04**, и сравнить циркуль с Минковским. Водосбор растеризуется штатным инструментом и служит примером для **5.02**.

| Параметр | Что задаёт         | По умолчанию |
|----------|--------------------|--------------|
| Охват    | Площадь генерации. | -            |

| Параметр     | Что задаёт             | По умолчанию |
|--------------|------------------------|--------------|
| Зерно (Доп.) | Повторяемость примера. | 1            |

## Типичные ситуации и решения

| Что видно                               | Причина                                                               | Решение                                                                                                                |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Концентрические «бычьи глаза», конусы   | Кригинг точно протягивает значение через скважины-выбросы (наггет 0). | Задать наггет C0 (0.2-0.4 от силла, в абсолютных единицах дисперсии). И/или включить сглаживание грида в «2D Kriging». |
| 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 идёт по полю (в «2D Kriging»). Увеличить там радиус сглаживания грида.                                     |
| Полигоны одного цвета                   | По умолчанию слой создаётся с одним символом.                         | Задать градуированную символику по ELEV_MIN.                                                                           |

## Приложение. Isoliner за 15 минут

Своих данных не нужно. В каждом сценарии первый шаг создаёт или загружает данные сам, поэтому пройти маршрут можно на пустом проекте.

Инструментов в модуле 48, и это пугает при первом знакомстве. Начните с пяти: **1.02, 1.04, 2.03, 2.13 и 4.01**. Остальное найдётся само, когда упрётесь в задачу.

После каждого шага написано, что должно получиться. Если получилось другое, значит стоит остановиться и разобраться, а не идти дальше.

### Сценарий 1. У меня точки

Пять минут. Скважины, пробы, замеры, любая нерегулярная сеть наблюдений.

**Шаг 1. 1.10 Создать пример скважин (демо)** Минимум: ничего задавать не нужно, всё по умолчанию. Если у вас есть свои точки, пропустите шаг. *Получится:* точечный слой в проекте.

**Шаг 2. 1.02 2D Kriging (точки → растр)** Минимум: **Точки, Поле значения, Размер ячейки**. Остальное по умолчанию. *Получится:* растр и слой стандартной ошибки. Ошибка растёт там, где точек мало, и это первое, на что стоит посмотреть.

**Шаг 3. 1.04 Изолинии из растра** Минимум: **Растр, Сечение, Стиль изолиний** = Структура / гипсометрия. Сечение подберите так, чтобы линий было видно, но не сплошная штриховка. *Получится:* изолинии с подписями и контурные пояса, границы которых совпадают с линиями.

Дальше по вкусу: **1.05 и 1.06** покажут, есть ли в данных анизотропия, **1.08** оценит метод перекрёстной проверкой.

## Сценарий 2. Мне нужен рельеф

Пятнадцать минут. Главный сценарий: строим рельеф, проверяем его числами и лечим найденное.

**Шаг 1. 2.01 Загрузка ЦМР по рамке** Минимум: **Источник рельефа** = GEDTM30, **Рамка загрузки** по интересующей местности. GEDTM30 это модель рельефа без леса и построек, для построения горизонталей она подходит лучше, чем Copernicus GLO-30, где высота снята по верхушкам. *Получится:* растр рельефа в системе координат проекта.

**Шаг 2. 1.04 Изолинии из растра** Минимум: **Растр, Сечение** 5 или 10 м. Остальное по умолчанию. *Получится:* слой горизонталей. Дальше он играет роль исходных данных, как если бы вам их передали.

**Шаг 3. 2.05 Сток и аккумуляция (D8)** Минимум: **ЦМР** из шага 1. Заполнение понижений оставьте включённым. *Получится:* растры направлений стока и накопленной площади.

**Шаг 4. 2.06 Речная сеть** Минимум: растр аккумуляции из шага 3, **Порог водосбора** в ячейках. Начните с тысячи и подберите так, чтобы сеть выглядела правдоподобно. *Получится:* линии водотоков, направленные вниз по течению, то есть готовые тальвеги.

**Шаг 5. 2.09 Вершины** Минимум: **ЦМР** из шага 1, **Радиус поиска** в ячейках. *Получится:* точки локальных максимумов с отметками.

**Шаг 6. 2.02 Загрузка топоосновы по рамке** Минимум: та же **Рамка**. Из OSM берите площадные водоёмы и сухие русла, а реки и вершины не берите: они уже посчитаны по рельефу в шагах 4 и 5 и согласованы с ним, тогда как из OSM они придут из другого источника и могут не совпасть с матрицей. *Получится:* до пяти слоёв в группе Топография.

**Шаг 7. 2.03 Торо2Raster (рельеф из векторов)** Минимум: **Изолинии** из шага 2 и **поле высоты, Тальвеги** из шага 4, **Точки высот** из шага 5 и поле отметки, **Озёра и урез воды** из шага 6 и поле отметки уреза, **Размер ячейки**. Обрывы подайте, если они есть в топооснове. *Получится:* новый растр рельефа, построенный по типизированным векторам, а не по одним горизонталям.

**Шаг 8. 2.12 Невязка горизонталей против ЦМР** Минимум: **Горизонтали** из шага 2, **поле высоты, ЦМР** из шага 7. *Получится:* точечный слой невязок и отчёт HTML. Смотрите на среднее смещение и на долю точек, промахнувшихся больше чем на половину сечения.

**Шаг 9. 2.13 Диагностика террасинга ЦМР** Минимум: **ЦМР** из шага 7 и **Сечение рельефа**, то же, что на шаге 2. *Получится:* индекс притяжения отметок к уровням. Около единицы означает, что ступеней нет, два и выше означает террасинг.

**Шаг 10. 2.14 Убрать ступени (сглаживание с ограничением)** Нужен, только если предыдущий шаг нашёл террасинг. Минимум: **ЦМР со ступенями, Сечение рельефа, Итераций** 50. *Получится:* исправленный рельеф и отчёт до и после. Индекс должен опуститься к единице.

Если хотите проверить не свои данные, а сам метод, замените первый шаг на **2.10 Демо-рельеф** с флажком **Овражно-балочная сеть**. Тогда истинная поверхность известна заранее, и видно, что именно теряется при построении. Овраги теряются первыми.

Сверить с истиной можно двумя способами. Наглядно: постройте изолинии по восстановленному рельефу с тем же сечением и наложите на горизонтали шага 2 другим цветом, линии должны лечь друг на друга и разойтись только на макушках выше последней горизонтали. Численно: калькулятор растров, выражение «восстановленный минус истина», и статистика разности в свойствах слоя. При сечении 5 м ожидается среднее около нуля и разброс порядка метра, а наибольшие расхождения на вершинах. Если добавить в шаг 7 точки вершин из шага 5, расхождения на макушках заметно сожмутся, и это ровно тот ответ, зачем топографы подписывают отметки вершин.

## Сценарий 3. Мне нужен разрез

Три минуты.

**Шаг 1. 4.10 Создать пример для разреза** Минимум: ничего задавать не нужно, всё по умолчанию. *Получится:* набор слоёв в группе Пример разреза.

**Шаг 2. 4.01 Разрез по линии** Минимум: **Линия разреза, Поверхности сверху вниз, Вертикальный масштаб.** *Получится:* чертёж разреза в инженерной системе координат, с осями, отметками и полосами пластов.

---

## Куда идти дальше

Руководство описывает каждый инструмент подробно, с параметрами и оговорками. Здесь намеренно нет ни опций, ни теории: задача страницы провести вас по модулю один раз, а не заменить документацию.

Данные OpenStreetMap: © участники OpenStreetMap, ODbL. Матрица Copernicus GLO-30 распространяется свободно.

## Приложение. Поля демо-слоёв

Сводка полей всех генераторов демонстрационных данных с единицами. Значения демонстрационные: там, где величина абстрактна, единицы условны.

### Выходы группы «Топография»

Слой линий **Речная сеть** (инструмент 2.06):

| Поле     | Тип     | Смысл, единицы                       |
|----------|---------|--------------------------------------|
| order    | целое   | порядок Стралера                     |
| acc_out  | дробное | аккумуляция в замыкании звена, ячеек |
| length_m | дробное | длина звена, м                       |

Слой полигонов **Бассейны** (2.07): **basin** - номер бассейна (целое), **area\_m2** - площадь, м<sup>2</sup>. Слой точек **Вершины** (2.09): **z** - высота, м, **drop** - превышение над минимумом окна, м. Слои топоосновы (2.02) несут **name** и **osm\_id**, водотоки дополнительно **waterway**, водоёмы **water**, вершины **ele** (высота, м), обрывы **kind**. Демо-рельеф (2.10) - растр без полей.

### Скважины (демо) - инструмент 1.10

Слой точек **Скважины (демо)**:

| Поле  | Тип     | Смысл, единицы                                  |
|-------|---------|-------------------------------------------------|
| well  | строка  | имя или номер скважины                          |
| roof  | дробное | абсолютная отметка кровли пласта, м             |
| thick | дробное | мощность пласта, м                              |
| X     | дробное | содержание условного компонента, процент (демо) |
| head  | дробное | напор, м (необязательное поле)                  |

| Поле    | Тип     | Смысл, единицы                                                         |
|---------|---------|------------------------------------------------------------------------|
| K       | дробное | коэффициент фильтрации, м/сут (демо, необязательное)                   |
| T       | дробное | водопроводимость, м <sup>2</sup> /сут, T = K·мощность (необязательное) |
| mintype | строка  | минтип, категория (демо замещения, необязательное)                     |
| dz      | дробное | величина, линейно связанная с дрейфом, усл. (необязательное)           |

Необязательный растр **Поверхность дрейфа (демо)** - сторонняя поверхность для кригинга с внешним дрейфом, усл. ед.

## Профили электроразведки - инструмент 1.11, режим электроразведки

Слой точек **Профили электроразведки (рк, ЕП, ВП):**

| Поле     | Тип     | Смысл, единицы                      |
|----------|---------|-------------------------------------|
| profile  | целое   | номер профиля                       |
| picket_m | дробное | пикет от начала профиля, м          |
| pk       | строка  | пикет меткой ПК (например ПК5+20)   |
| z        | дробное | отметка поверхности, м              |
| rho_k    | дробное | кажущееся сопротивление рк, Ом·м    |
| rho_true | дробное | рк без шума, Ом·м (эталон)          |
| sp       | дробное | потенциал естественного поля ЕП, мВ |
| vp       | дробное | вызванная поляризация ВП, мВ/В      |

## Профили оседаний - инструмент 1.11, режим оседаний

Слой точек **Профили оседаний (мульда, туров: N):**

| Поле        | Тип     | Смысл, единицы                 |
|-------------|---------|--------------------------------|
| profile     | целое   | номер профиля                  |
| picket_m    | дробное | пикет от начала профиля, м     |
| pk          | строка  | пикет меткой ПК                |
| tour        | целое   | номер тура наблюдений          |
| z           | дробное | отметка поверхности, м         |
| settle      | дробное | оседание, мм                   |
| settle_true | дробное | оседание без шума, мм (эталон) |

## Данные для разреза - инструмент 4.10

- **Поверхность 1...6** (растры) - отметки шести поверхностей стопкой, м. Сверху вниз: 1 кровля верхней вмещающей, 2 кровля и 3 подошва 1-го промышленного, 4 кровля и 5 подошва 2-го промышленного, 6 подошва нижней вмещающей.
- **Линии разрезов (демо)** (линия): поле **name** - имя линии (Разрез 1, 2, 3).
- **Устья collar (демо)** (точки): **hole\_id**, **z** - отметка устья, **eoH** - глубина забоя, **number** - подпись.
- **Интервалы interval (демо)** (таблица): **hole\_id**, **from**, **to** - глубины по стволу от устья, **code** - индекс пласта.

- **Пласт 1-й пром. (демо) и Пласт 2-й пром. (демо)** (многоканальные растры): канал 1 кровля (м), канал 2 подошва (м), канал 3 содержание (процент), канал 4 минтип (категория 1 или 2).
- **Разлом (демо, 2D)** (линия): **name**.
- **Маркер с Z (демо, 3D)** (линия с отметкой Z): **name**.
- **Зона (демо, полигон)** (полигон): **name**.
- **Опрокинутая TIN (демо)** (3D-граница): **name**.

## Данные для фракталов - инструмент 5.05

- **Реки (демо)** (линии): поле **order** (целое) - порядок притока в иерархии сети.
- **Водосбор (демо)** (полигон): поле **name**.
- **Берег (демо)** (линия): поле **name**.

## Плотность (демо) - инструмент 3.08

Слой точек **Демо-точки**:

| Поле | Тип     | Смысл, единицы                   |
|------|---------|----------------------------------|
| mass | дробное | масса замера (демо, 50 на точку) |
| prec | дробное | сигма неопределённости, м        |

Слой линий **Демо-линии**:

| Поле   | Тип     | Смысл, единицы                                  |
|--------|---------|-------------------------------------------------|
| mass   | дробное | масса замера (демо, 100 на линию)               |
| prec   | дробное | полуширина коридора, м                          |
| from_m | дробное | начало интервала по линии, м (может быть пусто) |
| to_m   | дробное | конец интервала по линии, м (может быть пусто)  |

Слой полигонов **Демо-полигоны**:

| Поле | Тип     | Смысл, единицы                              |
|------|---------|---------------------------------------------|
| mass | дробное | масса замера (демо, 150 на полигон)         |
| dasy | целое   | 1 - полигон под дазиметрию, 0 - равномерный |

Вспомогательный растр **Вспом. растр (дазиметрия)** - градиент значений для дазиметрического режима 3.07, усл. ед.

## Приложение. Плотность переменной опоры: пошагово

Разбор инструментов 3.07 и 3.08 от генерации демо до готового результата, с пояснением каждого параметра. Пример показывает, как проверить инвариант массы глазами.

### Шаг 1. Сгенерировать демо (3.08)

Запустите **3.08 Создать пример для плотности (демо)**.

- **Область (экстент)** - границы генерации. Задайте прямоугольник на карте или по слою. Годится любой метрический охват, например квадрат несколько километров.

- **Ячейка вспом. растра, м** - шаг вспомогательного растра для дазиметрии. По умолчанию 50, для демо достаточно.
- **Зерно ГСЧ (Доп.)** - повторяемость примера. При одном зерне набор одинаков.

На выходе четыре слоя: **Демо-точки**, **Демо-линии**, **Демо-полигоны** и **Вспом. растр**. В логе указана заложенная масса: точки 500, линии 200, полигоны 300, итого 1000.

## Шаг 2. Плотность по точкам (3.07)

Запустите **3.07 Плотность по замерам** на слое **Демо-точки**.

- **Замеры** - слой Демо-точки.
- **Поле массы - mass**. Если оставить пустым, масса каждого объекта равна 1.
- **Поле точности - pres**. Для точек это сигма гауссова пятна в метрах. Чем больше сигма, тем более размыт и низок вклад точки.
- **Размер ячейки, м** - шаг сетки результата. Меньше ячейка - подробнее карта и дольше счёт. На плотность в массе на км<sup>2</sup> размер ячейки не влияет, только на детальность.
- **Область** - оставьте пустым, возьмётся по слою.
- **Носитель за краем - Донормировать внутри** держит всю массу в области, **Потерять массу** отбрасывает вышедшую за край часть с предупреждением. Для проверки инварианта берите донормировать.
- **Сигма по умолчанию (Доп.)** - подставляется, когда поле точности пусто. Ноль означает полуячейку.

Проверьте лог: строка **Масса входа: 500. Масса на сетке: 500. Расхождение: 0**. Это и есть инвариант - интеграл плотности равен сумме масс.

## Шаг 3. Плотность по линиям

Запустите 3.07 на слое **Демо-линии**.

- **Поле точности - pres** - здесь это полуширина коридора в метрах. Линия размазывается в полосу мягких краёв.
- **from\_m / to\_m (Доп.)** - поля **from\_m** и **to\_m**. У одной демо-линии интервал задан, и в результате размазывается только его часть. Пустые поля означают всю линию.

В логе масса на сетке 200. Если включён режим потери массы и коридор вышел за край, расхождение покажет, сколько массы ушло.

## Шаг 4. Плотность по полигонам и дазиметрия

Запустите 3.07 на слое **Демо-полигоны**.

- Без вспомогательного растра масса полигона раскладывается равномерно по его площади.
- **Вспом. растр (Доп.)** - подайте **Вспом. растр** из демо. Тогда для полигонов включается дазиметрия: масса распределяется пропорционально значениям растра внутри полигона, а не ровно. Если растр внутри полигона пуст, инструмент откатывается на равномерное и пишет это в лог.

Масса на сетке 300 в обоих режимах, меняется только форма распределения внутри полигонов.

## Шаг 5. Смешать типы через дописывание

Чтобы собрать точки, линии и полигоны в один растр, прогоните 3.07 трижды подряд.

- Первый запуск - как обычно, получаете трёхканальный растр.

- Второй и третий - в параметре **Дописать в существующий растр** (Доп.) укажите растр из предыдущего запуска. Инструмент читает три канала, добавляет новую массу и возвращает обновлённый растр.

После трёх дописываний суммарная масса на сетке равна 1000. Каналы 2 и 3 ( $\Sigma m \cdot \sigma$  и  $\Sigma m$ ) для этого и служебные - они позволяют дописывать сериями и держать карту эффективной сигмы точной.

## Шаг 6. Эффективная сигма

Задайте необязательный выход **Эффективная сигма**. Это средневзвешенная сигма по ячейке - карта эффективной точности. Где плотность набрана точными носителями, сигма мала. Где размазанными грубыми привязками, велика. Аналог кригинговой дисперсии для этажа плотности: показывает, где результату можно доверять, а где он держится на грубых носителях.

## Как читать итог

Канал 1 результата - плотность в массе на км<sup>2</sup>. Открывайте его одноканальной псевдоцветной символикой. Пятна плотности - там, где сгущаются надёжные замеры. Инвариант в логге подтверждает, что масса сохранена и результат корректен. Слой должен быть в метрической системе координат, иначе инструмент откажется работать.

## Предприятиям

Isoliner развивается на задачах реальных предприятий. Мы выполняем доработки под регламент производства, заключаем договоры технической поддержки с гарантией и внедряем модуль в производственный цикл, включая интеграцию с корпоративными базами данных. Подробности: <https://www.informpp.ru/главная-страница/предприятиям>

## Журнал и панель инструментов

Isoliner ведёт журнал работы в файле **isoliner.log** рядом с профилем QGIS. В начале сеанса пишутся версии плагина, QGIS, NumPy и GDAL, затем имя запущенного инструмента, его параметры, время счёта, а при сбое - полный трейсбек. Окно расчёта закрывается, а файл остаётся, поэтому при обращении достаточно приложить его.

Открыть журнал можно через **Модули - Isoliner - Журнал** или кнопкой **Журнал** в окне **О плагине**. На панели инструментов **Isoliner** находятся карта плотности и окно «О плагине».

## 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).