

Тема 5

Лекция 4.

ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ

▶ ПЛАН ЛЕКЦИИ

- 1. Детерминированные методы геопространственного моделирования.
- 2. Геостатистические методы пространственного моделирования.
- 3. Автоматизация геопространственного моделирования.

Использованные источники

- 1. Геостатистика: теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева; под ред. Р. В. Арутюняна; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
- 2. Курлович, Д. М. Геоинформационные методы анализа и прогнозирования погоды: учеб.-метод. пособие / Д. М. Курлович. – Минск: БГУ, 2013. – 191 с.
- 3. Krivoruchko, K. Pragmatic Bayesian kriging for non-stationary and moderately nonGaussian data / K. Krivoruchko, A. Gribov // Mathematics of Planet Earth, 61 Lecture Notes in Earth System Sciences. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. – P. 61–64.
- 4. Домашняя страница проекта Quantum GIS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qgis.org/en/site/>. 5. Сайт компании ESRI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.esri.com/ru-ru/home>.

- 1. Детерминированные методы геопространственного моделирования

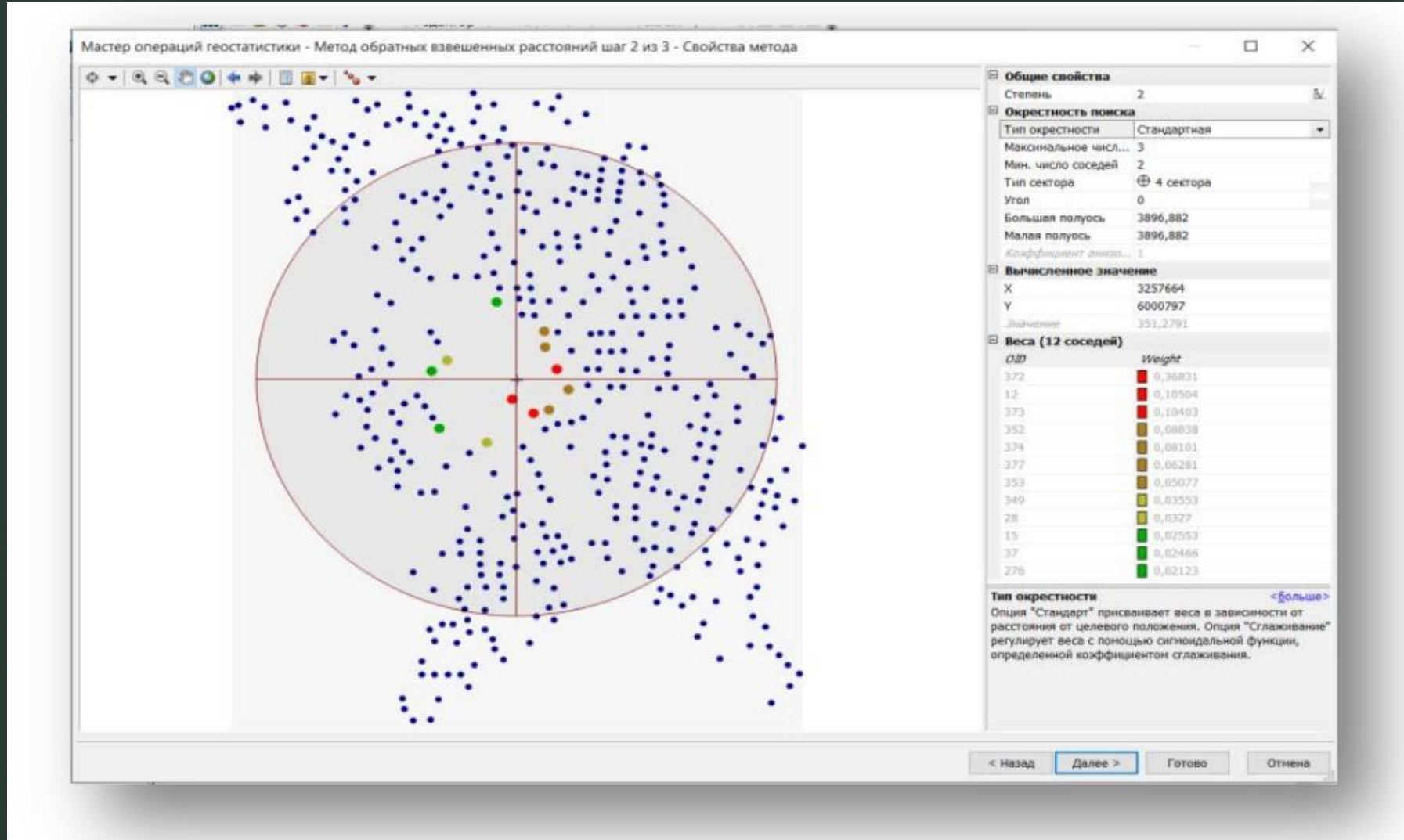
- Существует две основные группы методов интерполяции: **детерминированные и геостатистические.**
- Среди детерминированных методов интерполяции наиболее широко применяются:
 - – метод обратных взвешенных расстояний;
 - – интерполяция по методу глобального полинома;
 - – интерполяция по методу локального полинома;
 - – радиальные базисные функции;
 - – интерполяция с барьерами, использующая проницаемые или полупроницаемые барьеры.

- **Методы детерминированной интерполяции** создают поверхности из измеренных точек, основываясь или на степени схожести (обратные взвешенные расстояния), или на уровне сглаживания (радиальные базисные функции).
Детерминированные методы интерполяции можно разделить на две группы: глобальные и локальные.
- **Глобальные методы** вычисляют проинтерполированные значения на основании всего набора данных.

- **Локальные методы** вычисляют проинтерполированные значения на основании измеренных точек в пределах окрестностей, которые являются меньшими пространственными областями внутри большей изучаемой территории.
- **Детерминированная интерполяция** создает результирующую поверхность, как проходящую, так и не проходящую через все значения данных.
- Метод интерполяции, который вычисляет значение, идентичное измеренному в опорном местоположении, называется **жестким интерполятором**.
- **Нежесткий интерполятор** вычисляет значение, которое отличается от измеренного. Последний можно использовать с целью избежать возникновения острых вершин или углублений на выходной поверхности.

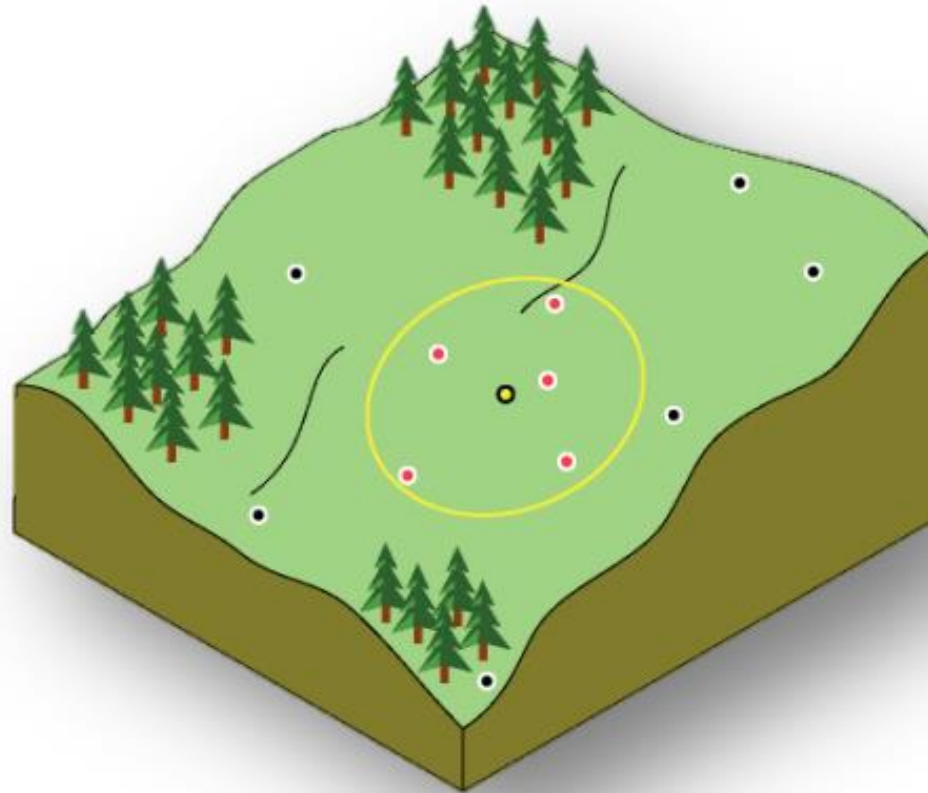
- **Метод обратных взвешенных расстояний** (Inverse DistanceWeights, IDW) является одним из наиболее часто применяемых детерминированных методов интерполяции.
- IDW однозначно предполагает, что объекты, которые находятся поблизости, более подобны друг другу, чем объекты, удаленные друг от друга

Иллюстрация присвоения весов точкам в окрестности поиска



- Поскольку объекты, находящиеся поблизости друг от друга, более сходны, чем объекты, находящиеся на большом расстоянии, то по мере удаления от местоположений измеренные значения будут находиться в несущественных отношениях со значением проинтерполированного местоположения.
- Следовательно для увеличения скорости вычислений следует исключить большинство удаленных точек, которые оказывают незначительное влияние на интерполяцию, с помощью определения окрестности поиска.

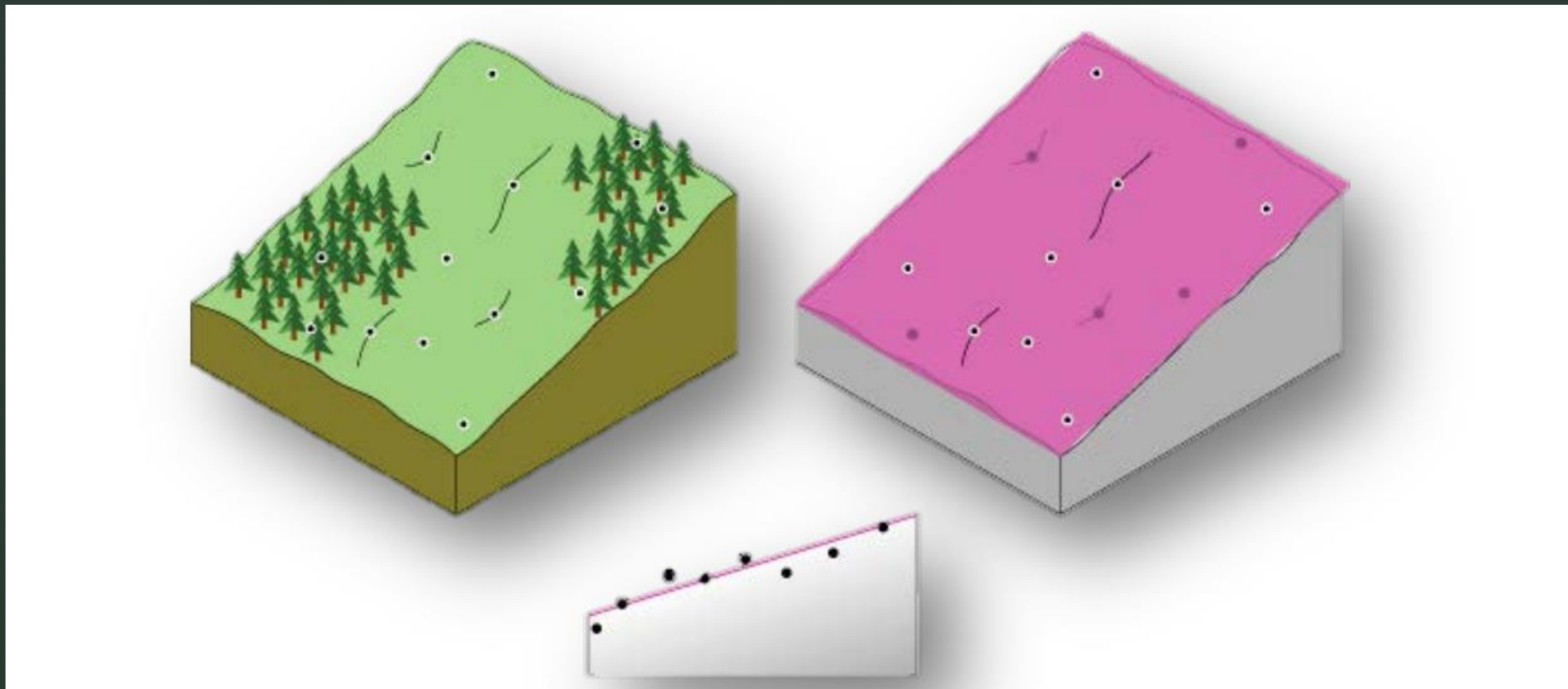
Иллюстрация окрестности поиска



- **Метод обратных взвешенных расстояний** целесообразно использовать, когда набор точек достаточно плотный, чтобы фиксировать степень локального изменения поверхности, необходимую для анализа.
- Он хорошо подходит для первичной оценки интерполированной поверхности, однако не оценивает ошибку прогнозирования и может порождать «бычьи глаза» вблизи точек данных.

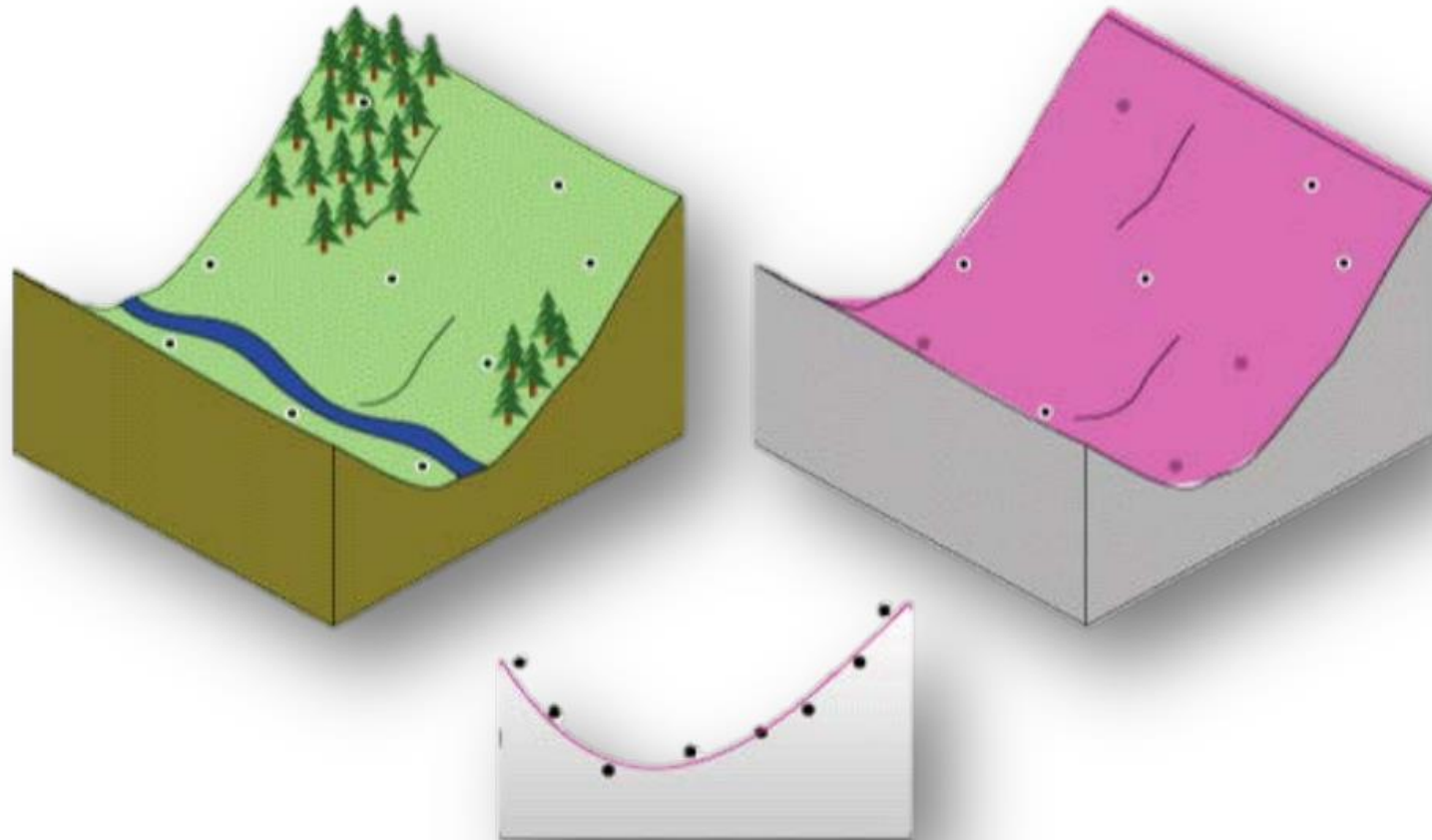
- **Интерполяция по методу глобального полинома** (трендинтерполяция) подбирает к входным опорным точкам **сглаженную поверхность**, определяемую математической функцией (полиномом).
- Поверхность **глобального полинома** постепенно **изменяется** и характеризует **грубую структуру в данных**. Концептуально интерполяция по методу глобального полинома схожа с установкой листа бумаги между поднятыми до высоты значения точками.

Интерполяция по методу глобального полинома (полином первого порядка)



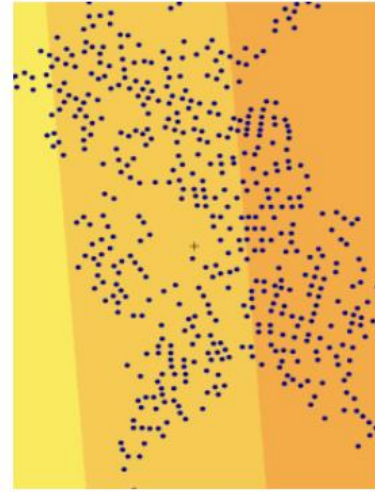
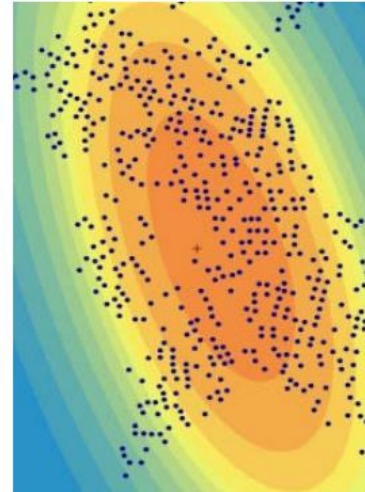
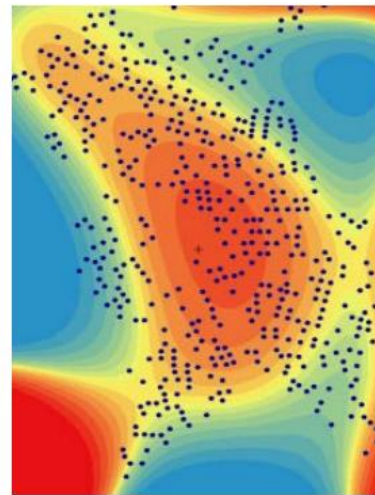
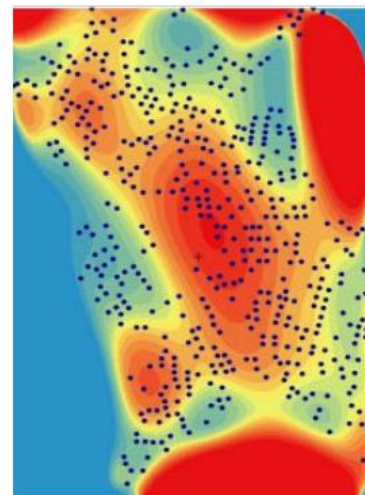
- **Плоская поверхность (нет сгиба на листе бумаги) – это полином первого порядка (линейный).**
- **При допущении одного изгиба получается полином второго порядка (квадратичный), двух изгибов – полином третьего порядка (кубический) и так далее (допускается до 10 изгибов).**
- **На практике довольно редко возможен случай, когда лист бумаги (аналог интерполяционной поверхности) проходит через все фактически измеренные точки - интерполяция по методу глобального полинома относится к нежестким методам интерполяции. Некоторые точки будут расположены выше листа бумаги, другие – ниже.**

Интерполяция по методу глобального полинома (полином второго порядка)



- Однако можно добавить высоту до высоты точек выше и ниже листа бумаги (эти две суммы должны быть равны). В таком случае **результатирующая поверхность** получается **путем подбора подходящего уравнения регрессии по методу наименьших квадратов**, а различия между квадратами поднятых значений и листом бумаги будут сведены к минимуму.
- В результате **интерполяции по методу глобального полинома** **формируется сглаженная поверхность**, которая представляет постепенные тренды поверхности в исследуемой области

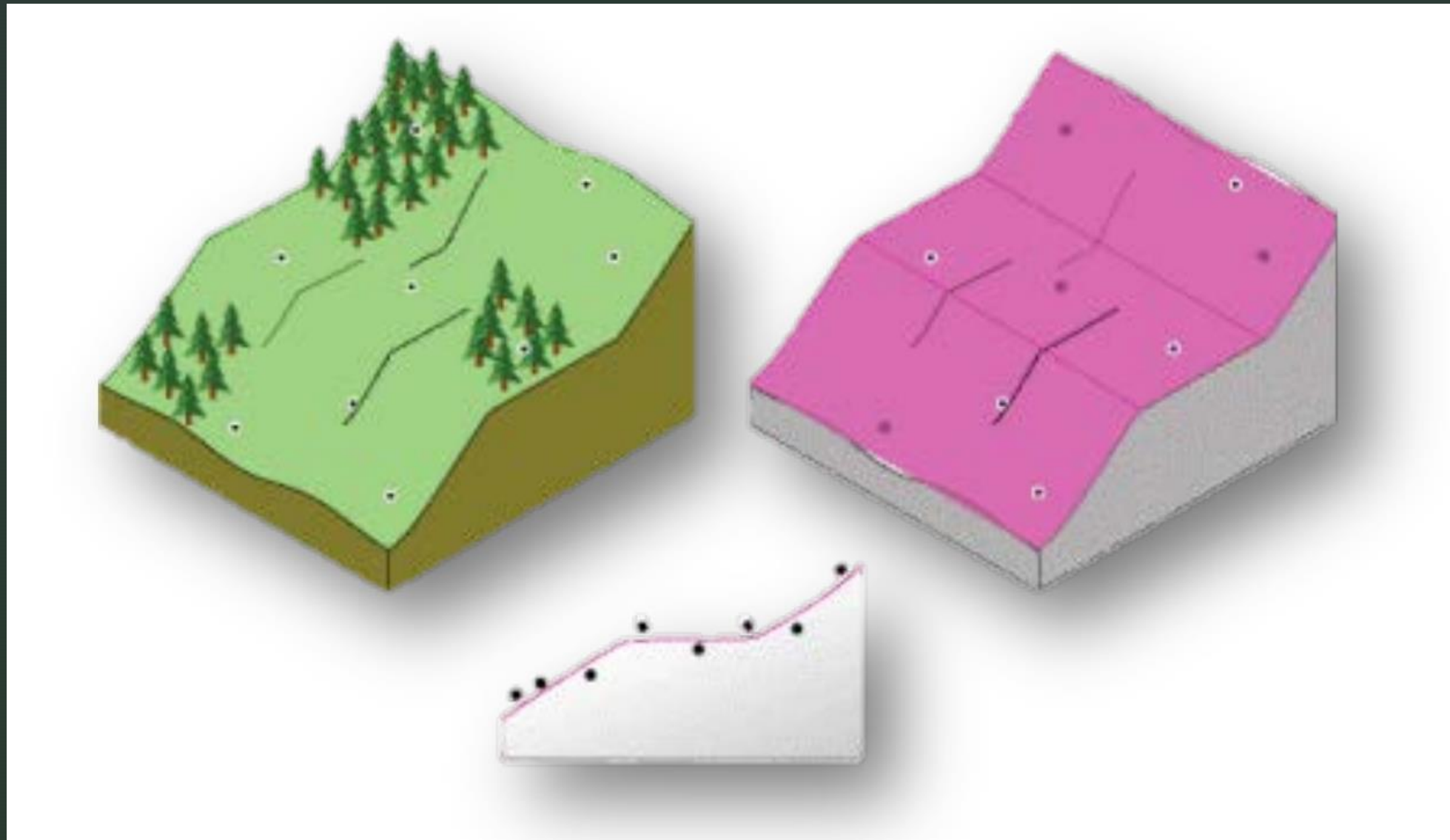
Интерполяционная поверхность, созданная методом глобального полинома:
а – полином 1-го порядка; б – полином 2-го порядка; в – полином 3-го порядка;
г – полином 4-го порядка

*a**б**в**г*

- Интерполяция по методу глобального полинома используется в случае:
 - – необходимости подбора поверхности к опорным точкам, если поверхность в пределах исследуемой области постепенно варьирует от участка к участку, например, загрязнение окружающей среды в пределах санитарно-защитной зоны промышленного предприятия;
 - – исследования и (или) удаления эффектов трендов с большим диапазоном, или глобальных трендов.

- **Метод локальных полиномов** (Local Polynomial Interpolation, LPI) – это умеренно быстрый интерполятор, который является **сглаженным** (неточным).
- Данный метод интерполяции используется в случае необходимости создания сложных полиномиальных плоскостей. Если интерполяция по методу локального полинома согласовывает полином со всей поверхностью, то интерполяция по методу локальных полиномов подбирает множество полиномов, каждый из которых подбирается к определенной перекрывающейся окрестности

Интерполяция по методу глобального полинома





- На практике для двумерного случая используют один из четырех
ТИПОВ ПОЛИНОМОВ:

- – ПЛОСКОСТЬ:

- $P_1(x, y) = a + bx + cy;$

- – КВАДРАТИЧНЫЙ:

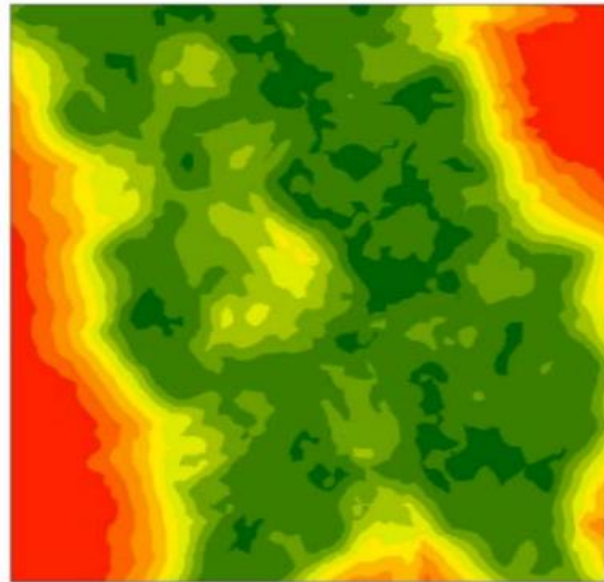
- $P_2(x, y) = a + bx + cy + dxy + ex^2 + fy^2 ;$

- – КУБИЧЕСКИЙ:

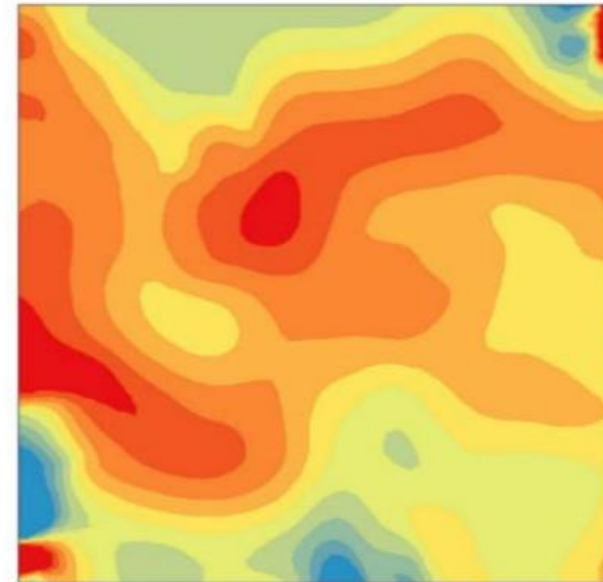
- $P_3(x, y) = a + bx + cy + dxy + ex^2 + fy^2 + gx^2y + hxy^2 + + ix^3 + jy^3$

- **Полиномиальный метод** обеспечивает построение поверхности прогнозируемых значений, поверхности стандартной ошибки прогнозирования и числа обусловленности, которые сравнимы с ординарным кригингом по погрешностям измерения.
- **Пространственное число обусловленности** является мерой стабильности или нестабильности решения уравнений интерполяции для конкретного положения.
- *Число обусловленности зависит только от местоположений входных точек, а не их текущих значений. Значения ниже критического порога пространственного числа обусловленности указывают на местоположения, в которых решения достоверны, а значения выше критических пределов – недостоверны.*

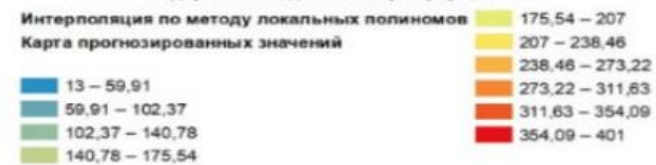
Поверхность пространственного числа обусловленности (а)
и интерполяционная поверхность, созданная методом обратных
взвешенных расстояний (б)



Пространственное число обусловленности

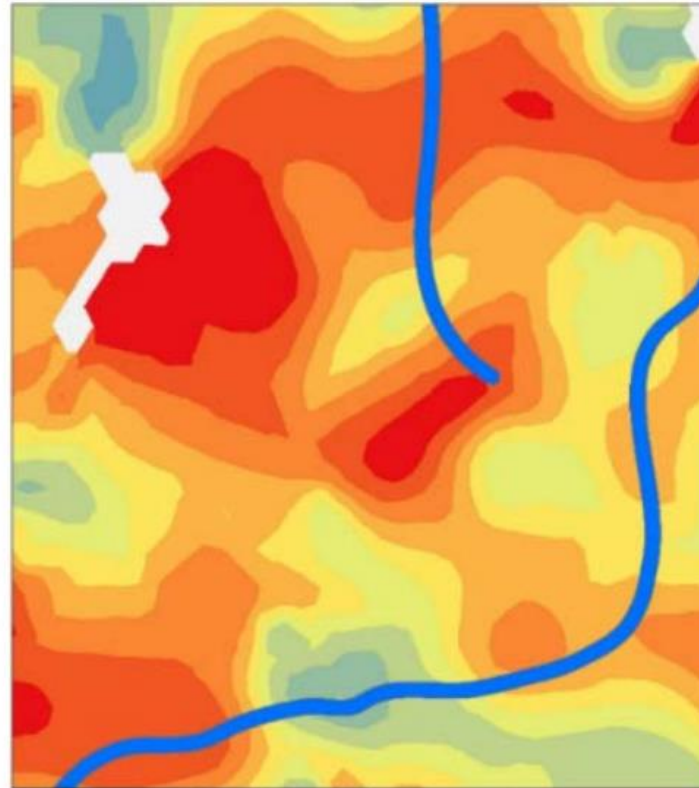


Содержание подвижного фосфора, мг/кг



- **Интерполяция ядра с барьерами** – это детерминированный интерполятор с движущимся окном, который использует кратчайшее расстояние между точками, соединяя точки по обе стороны от линейных барьеров так, что точки по разным сторонам определенного непроходимого (абсолютного) барьера соединяются серией прямых линий.
- Данный метод является вариантом метода локальных полиномов и используется в случае, если в пределах интерполируемой поверхности находятся барьеры – векторный слой линейных объектов.

Интерполяционная поверхность, созданная методом интерполяции ядра с барьерами (функция ядра – полиномиальная 5-го порядка)

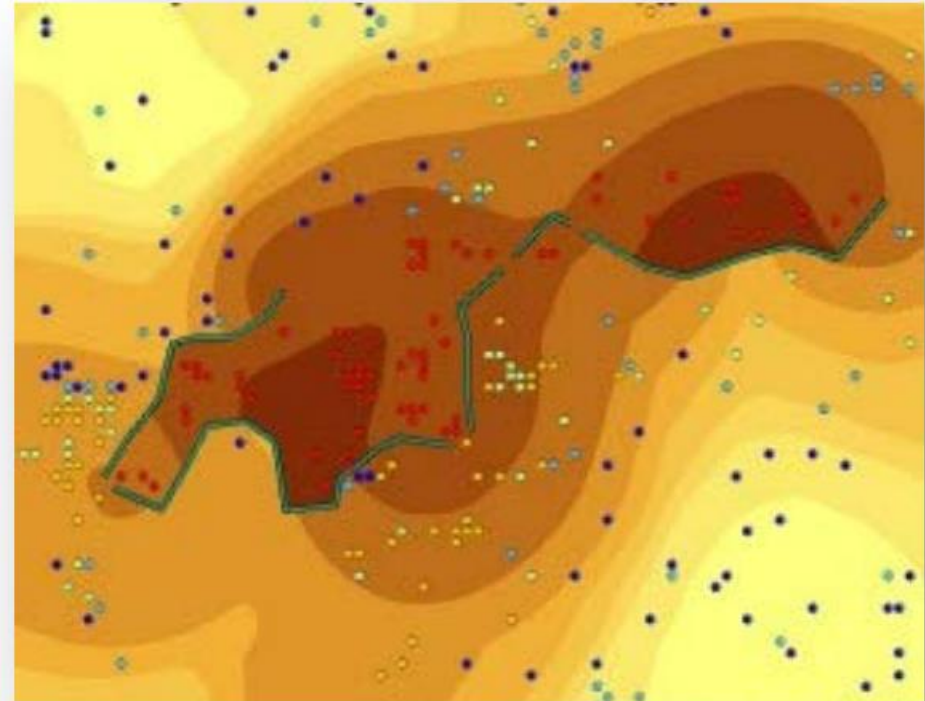
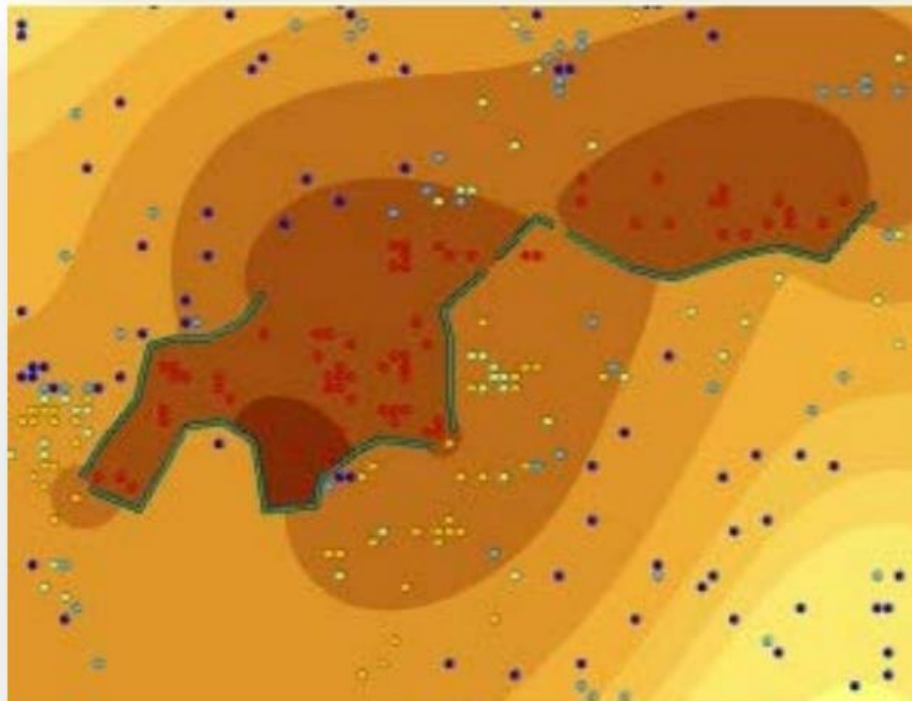


Содержание фосфора, мг/кг



- **Интерполяция по методу диффузного ядра** применяет ядро, основанное на уравнении теплового баланса, которое описывает, как тепло или частицы со временем распределяются в однородной среде, и позволяет использовать в качестве барьера комбинацию растровых и векторных наборов геопространственных данных. **Интерполяция диффузии** может использовать сложную метрику расстояния, определяемую стоимостной поверхностью, которая является обычной функцией растра, вычисляющей стоимость пути от одной ячейки растра к другой.

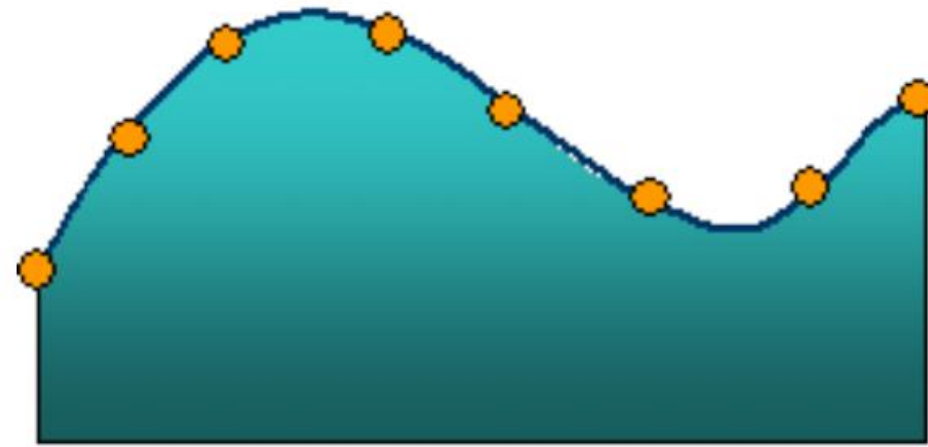
Сравнение интерполяционных поверхностей, созданных методом диффузного ядра (а) и интерполяции ядра с барьерами (б); функция ядра – гауссова



- **Радиальные базисные функции (Radial Basis/Bias Functions, RBF)** представляют собой жесткие интерполяторы, которые создают сглаженные поверхности, и, в отличие от интерполяции по методу глобального и локального полиномов, **предусматривают прохождение интерполированной поверхности через все точки с измеренными значениями.** Кроме того, в отличие от интерполяции по методу обратных взвешенных расстояний, также являющейся жестким интерполятором, **радиальные базисные функции интерполируют значения выше максимального или ниже минимального измеренного значения.**

Сравнение профиля поперечного сечения опорных данных:

- а – метод обратных взвешенных расстояний;
- б – метод радиальных базисных функций

*a**б*

- **Метод RBF** представляет собой семейство из пяти методов детерминированной точной интерполяции (h – расстояние; δ – сглаживающий параметр):

– тонкий сплайн (TPS): $B(h) = (h^2 + \delta^2) \lg (h^2 + \delta^2)$;

– сплайн с напряжением (SPT): $B(h) = (h^2 + \delta^2)^{1/2}$;

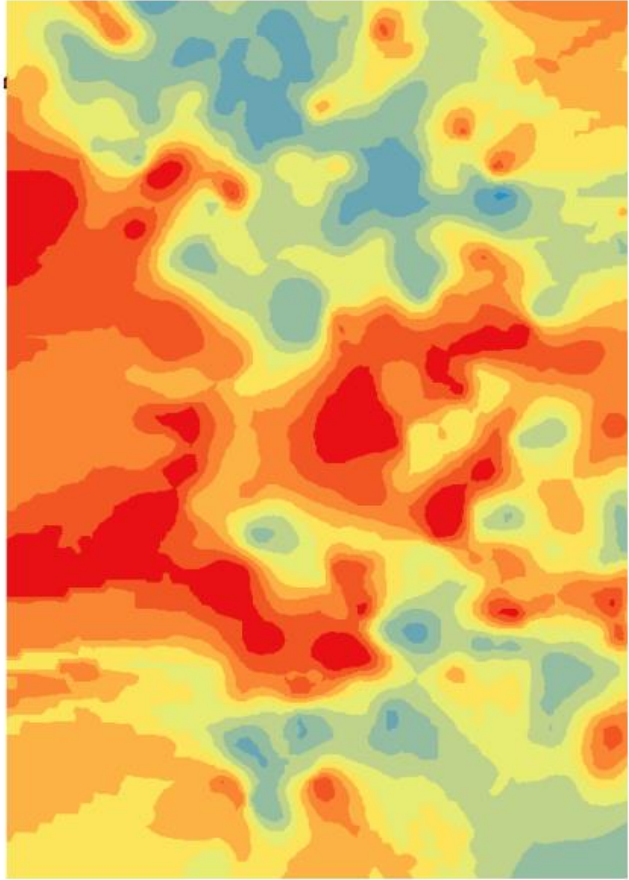
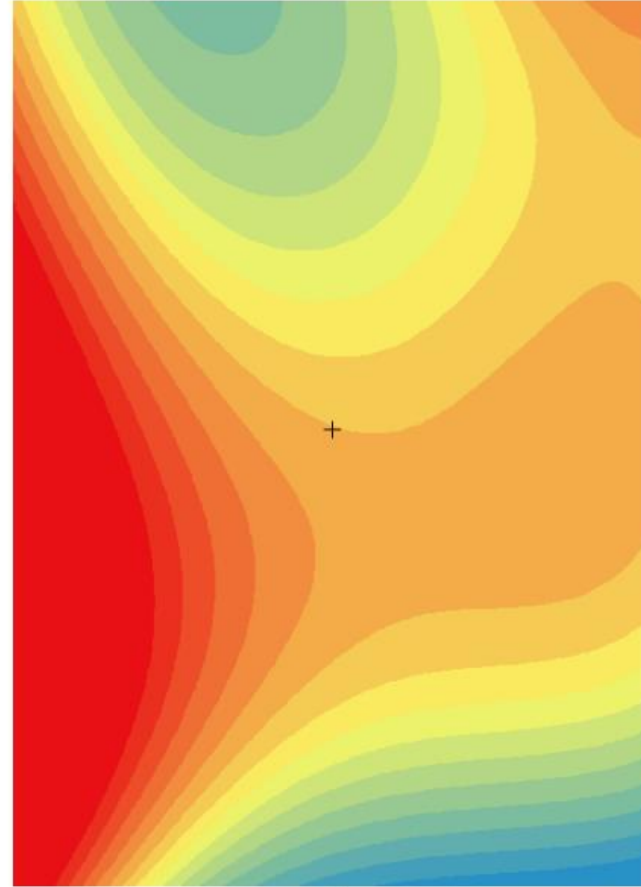
– полностью регуляризованный сплайн (CRS): $B(h) = \lg (h^2 + \delta^2)$;

– мультиквадратичная функция (MQ): $B(h) = \sqrt{h^2 + \delta^2}$;

– обратная мультиквадратичная функция (IMQ): $B(h) = \frac{1}{\sqrt{h^2 + \delta^2}}$.

- **Метод RBF** подходит к поверхности через измеренные значения при минимизации общей кривизны поверхности и неэффективен, когда происходит резкое изменение значений поверхности на коротких расстояниях.

Интерполяционная поверхность, созданная методом RBF (функция ядра – мультиквадратичная) (а) и методом глобального полинома третьей степени (б)

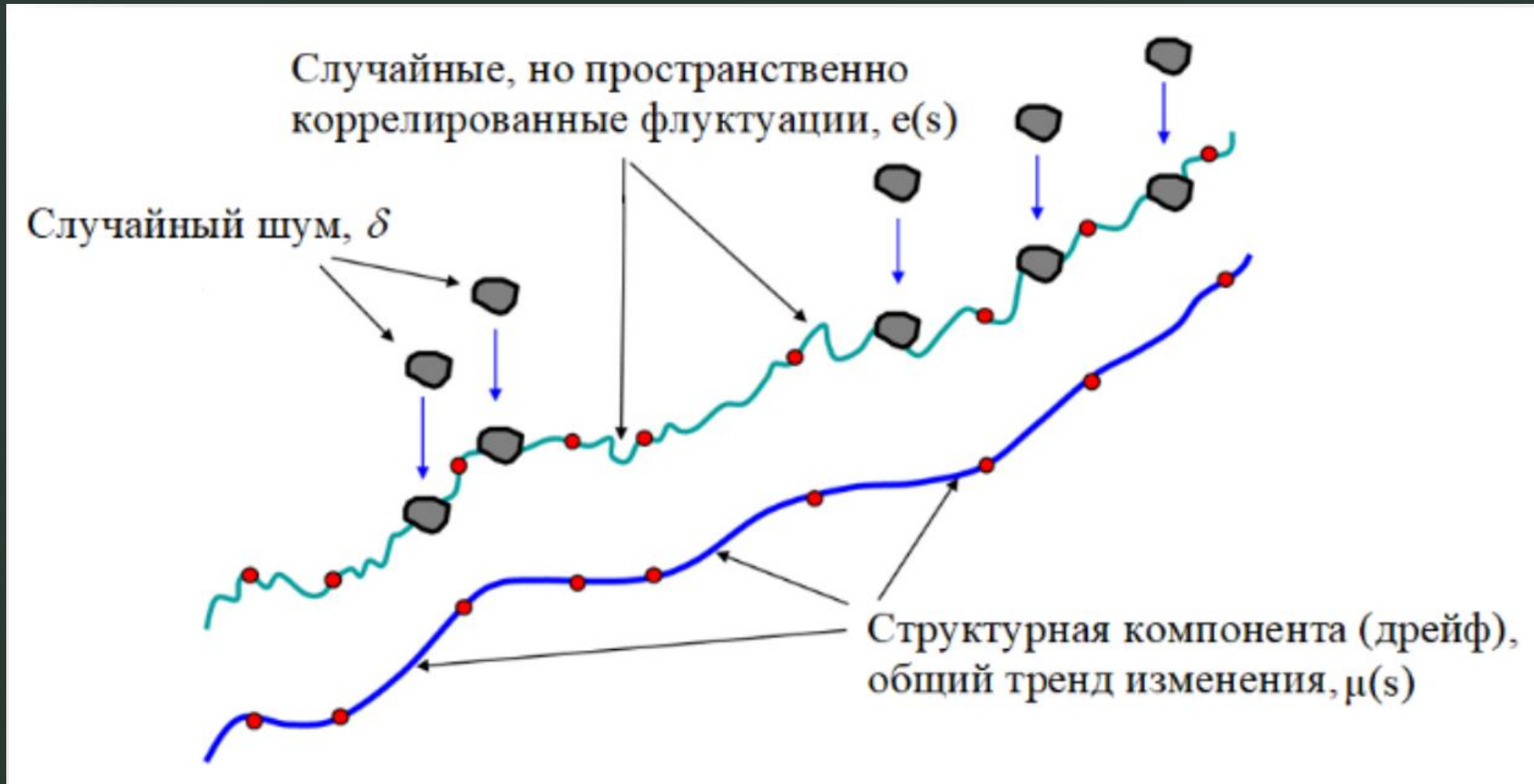
*a**б*



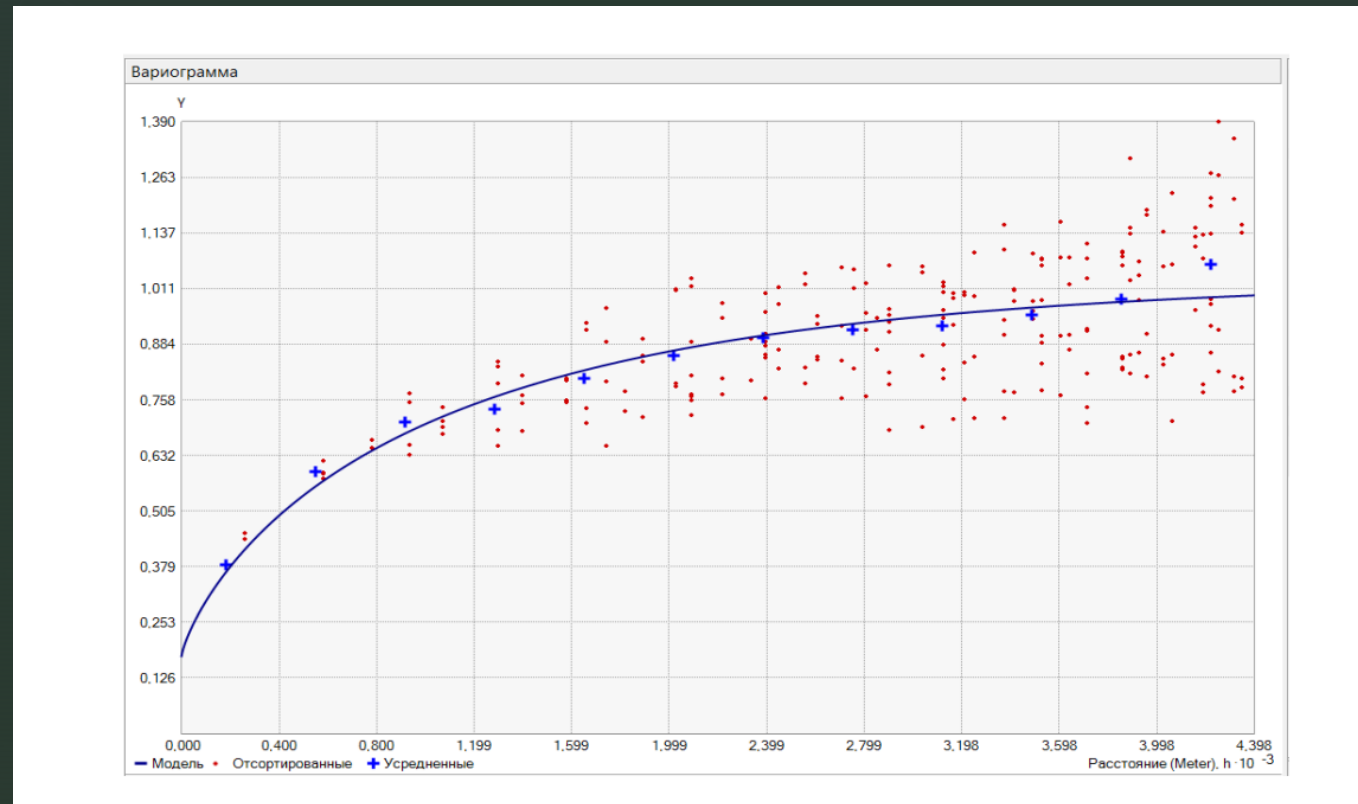
- 2. Геостатистические методы пространственного моделирования

- **Геостатистические методы интерполяции** используют статистические свойства значений в точках, а не их абсолютные значения.
- С их помощью измеряется пространственная автокорреляция в измеренных точках и рассчитывается пространственная конфигурация опорных точек вокруг интерполируемого местоположения.
- *Кригинг является базовой интерполяционной моделью геостатистики и основой всех методов, связанных с геостатистикой – интерполяции, вероятностного картирования, стохастического моделирования.*
- *Исходные данные в виде наборов точек (значений переменных), включающих аномальные впадины, высоты или другие какие-либо резкие изменения, не предназначены для кригинг-метода.*

Основные элементы кригинга

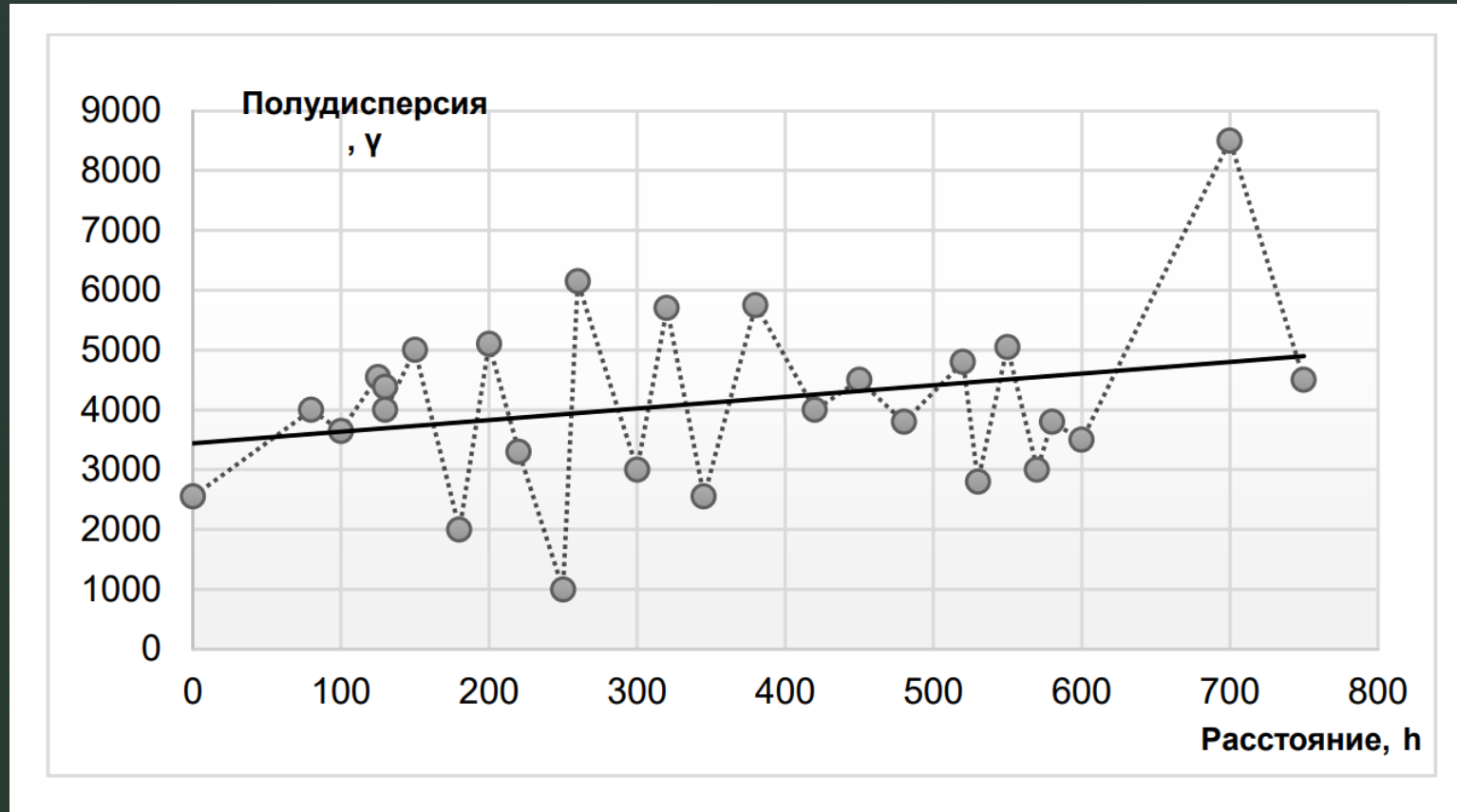


- Интерполяция по методу кригинга осуществляется в четыре этапа:
- Этап 1. Расчет эмпирической семивариограммы по набору исходных опорных точек («semi» – половина).



- Эмпирическая семивариограмма

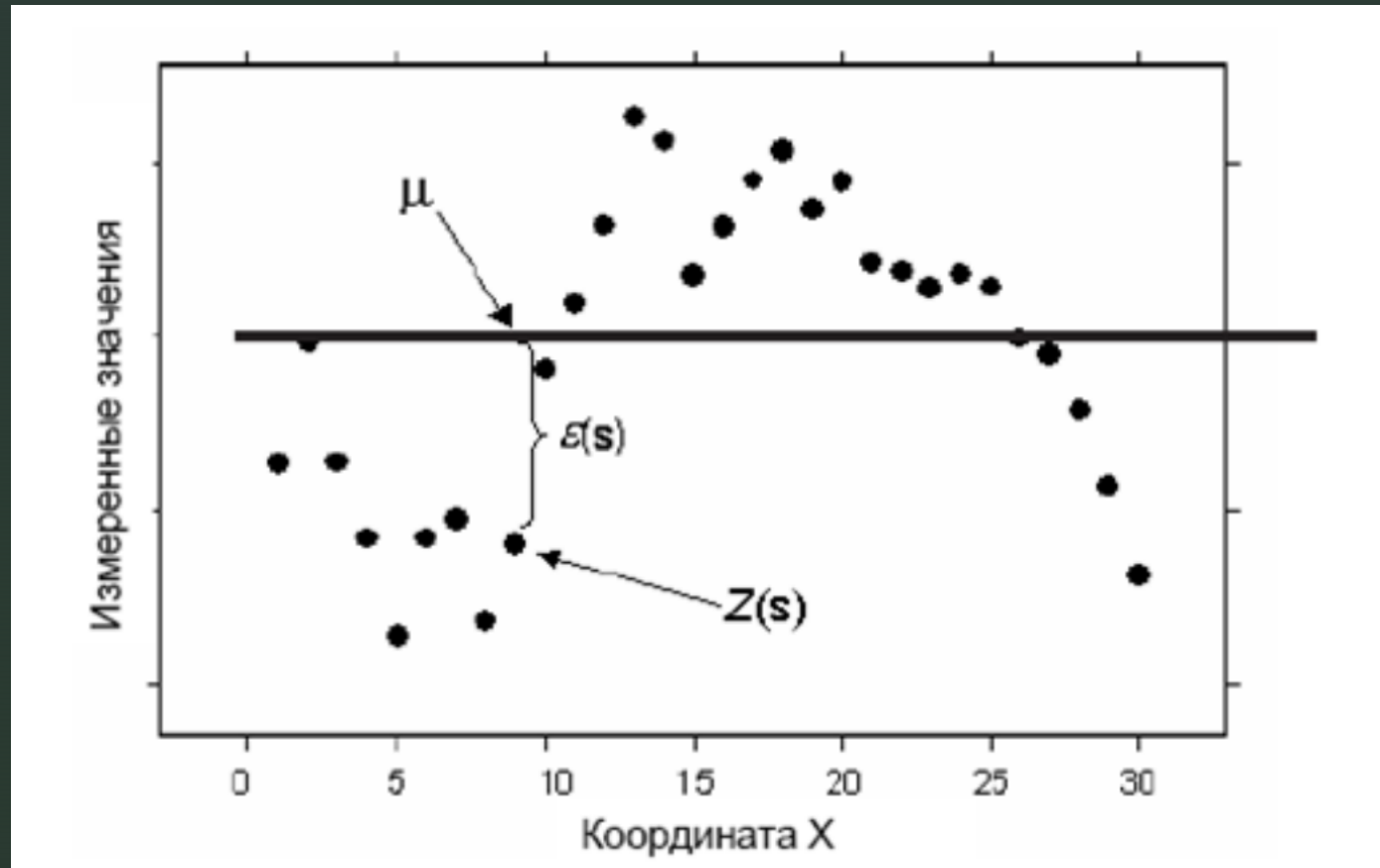
- **Этап 2.** Подбор теоретической функции к полученной эмпирической семивариограмме (по методу наименьших квадратов)



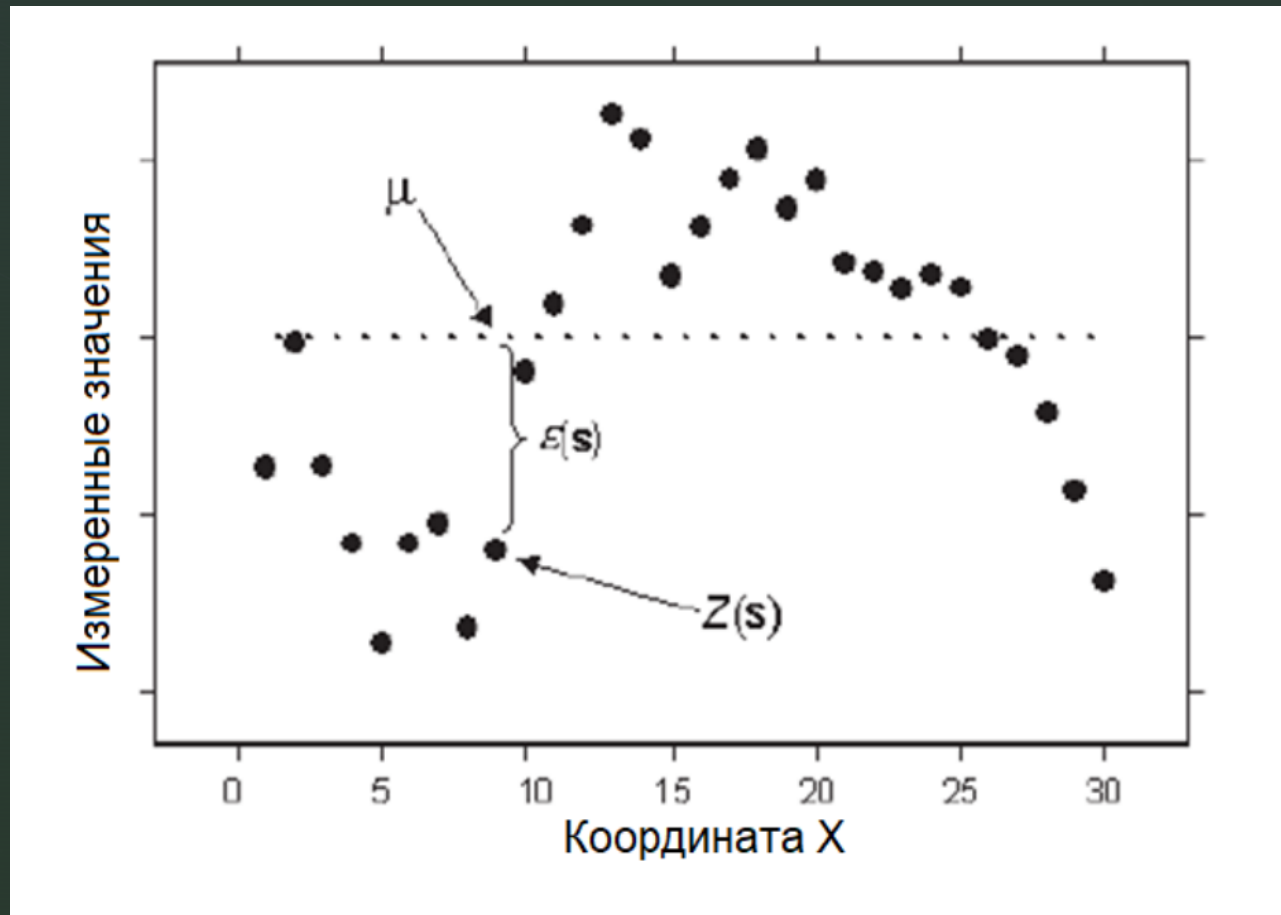
Графики семивариограмм (пунктирная линия – эмпирическая вариограмма; сплошная линия – подобранная вариограмма)

- **Этап 3.** Нахождение весов λ_i на основе полученной модели вариограммы.
- **Этап 4.** Выполнение интерполяции, когда на основе рассчитанных весов кригинга λ_i и известных значений Z_i в опорных точках в пределах заданного радиуса поиска вычисляется значение в искомой точке Z_0
- **Простой кригинг (Simple Kriging, SK)** предполагает использование для интерполирования значений модели определенного вида.

Простой кригинг

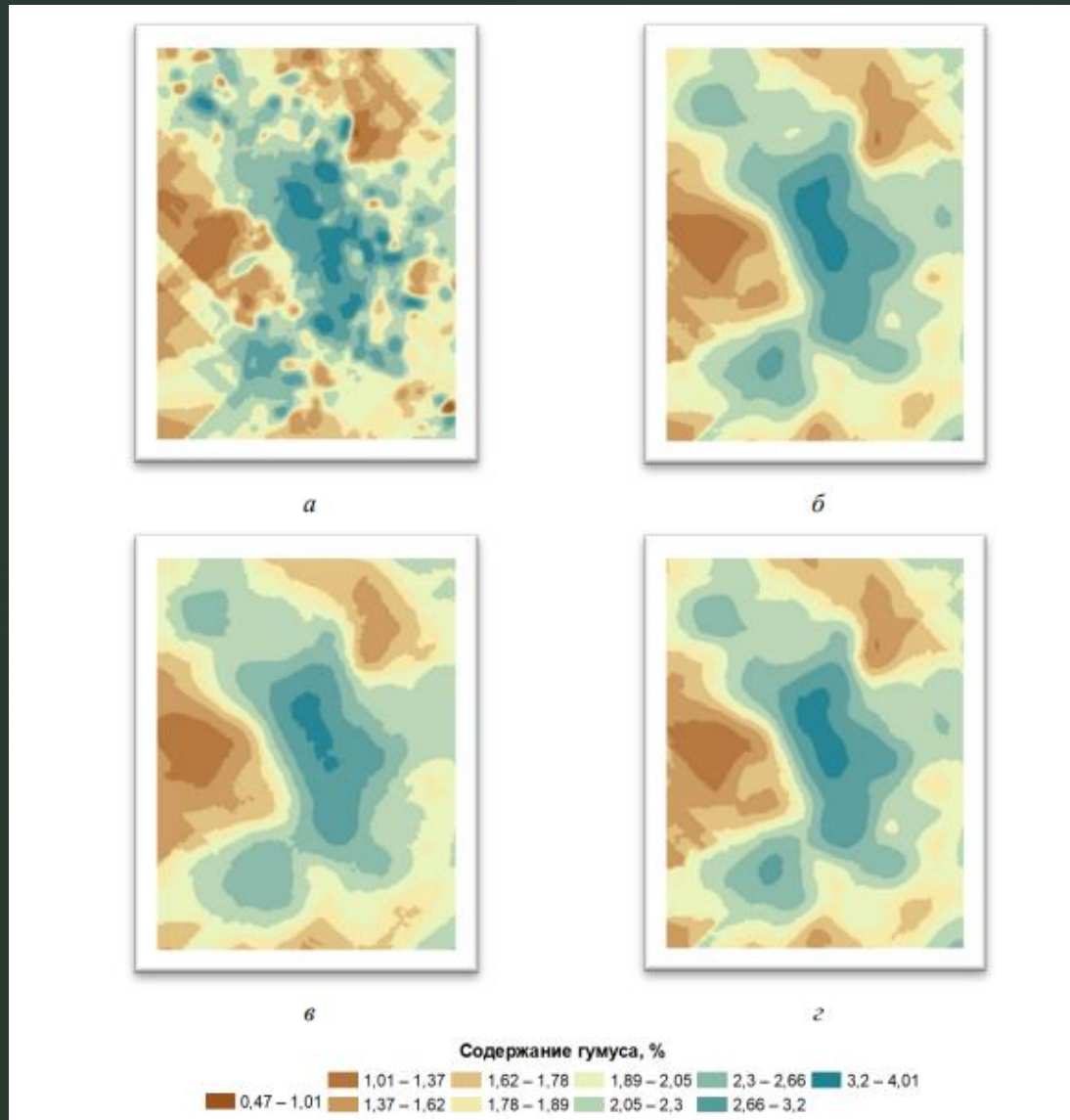


- **Ординарный, или обычный, кригинг (Ordinary Kriging, ОК)** в отличие от простого кригинга предусматривает, что модель тренда μ является постоянной, но неизвестной.



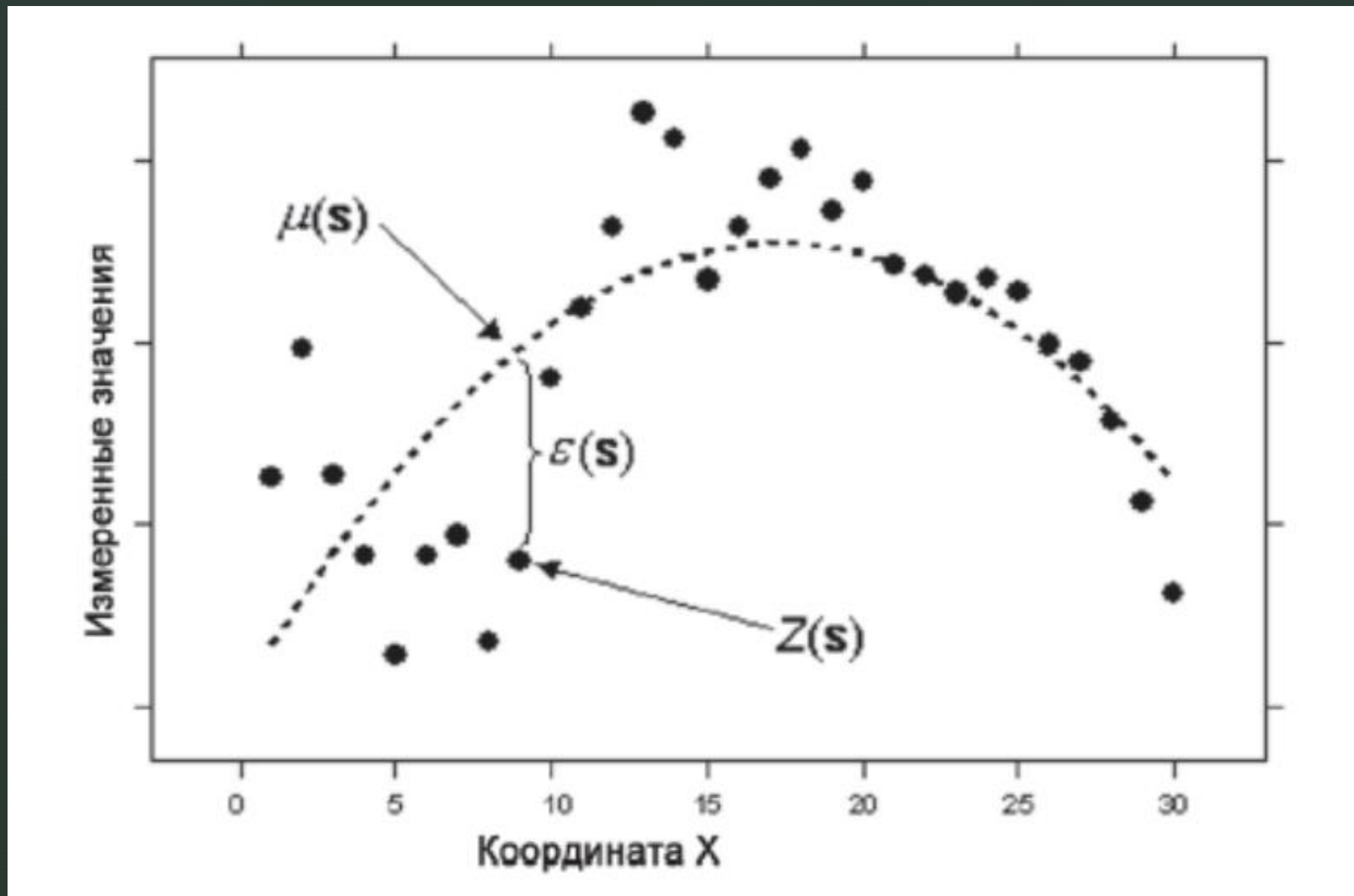
- При интерполяции по методу ординарного кригинга возможно использование вариограммы либо ковариации (математические формы, используемые для выражения автокорреляции), а также применение преобразований (по методу Бокса-Кокса, логарифмическое либо по методу арксинуса) и удаление тренда. На рисунке приведена оценка ординарного кригинга для случая изотропной модели вариограммы (т. е. радиус корреляции не зависит от направления).

Оценка обычного кригинга при изотропной модели пространственной корреляционной структуры (вариограмме) и различных значениях радиуса корреляции: а – 50 м; б – 150 м; в – 350 м; г – 700 м



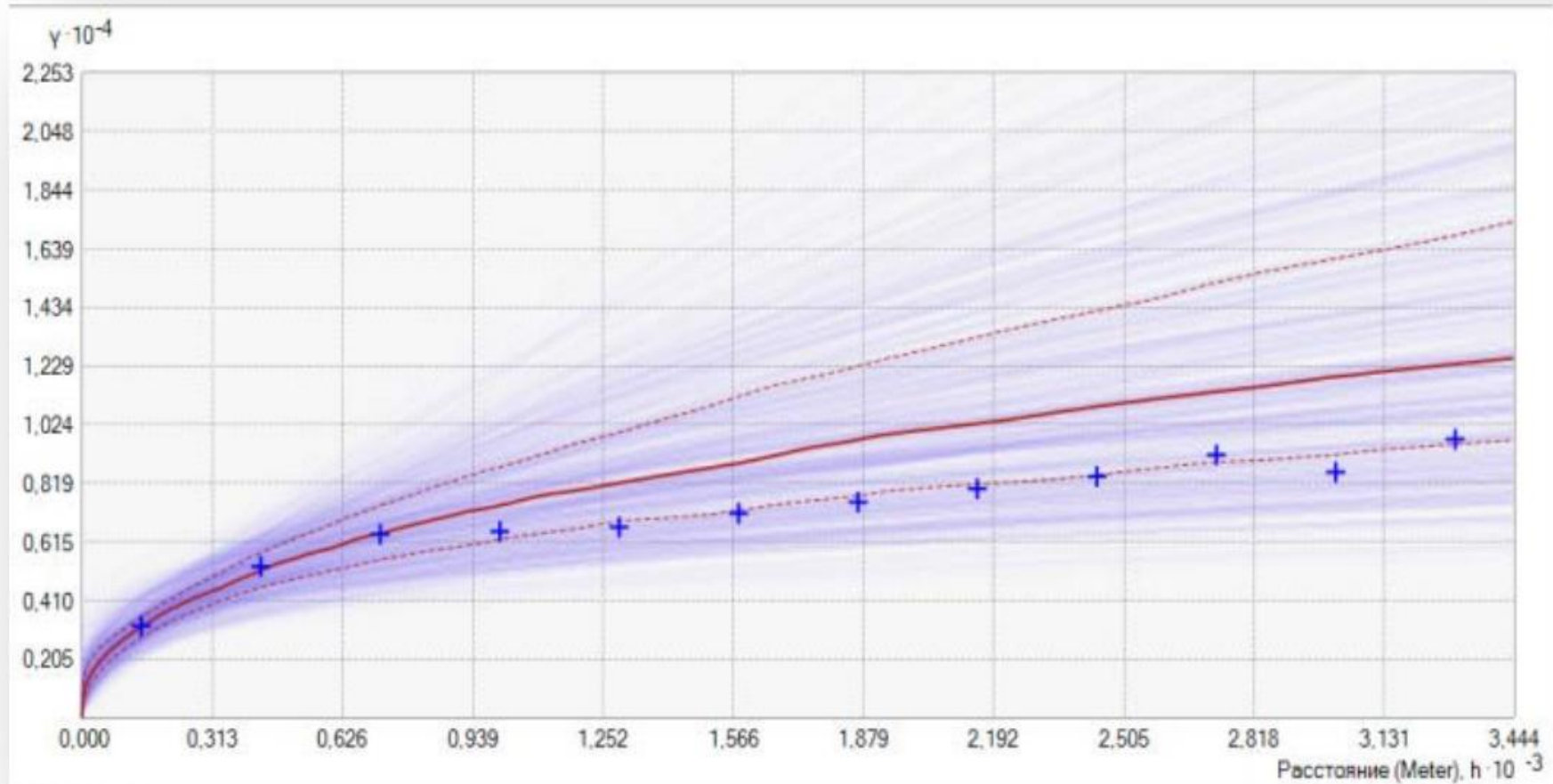
- **Универсальный кригинг, или кригинг с трендом** (Universal Kriging, UK), используется тогда, когда предполагается, что в данных имеется какая-либо доминирующая тенденция (тренд), которую можно смоделировать с помощью детерминистической полиномиальной функции.
- *Он может использовать либо вариограммы, либо ковариации (математические формы, используемые для выражения автокорреляции), применять преобразования и учитывать погрешность измерения.*

Универсальный кригинг



- **Эмпирический байесовский кригинг** (Empirical Bayesian Kriging, EBK) отличается от других методов кригинга использованием внутренней случайной функции в качестве модели кригинга.
- В EBK можно анализировать эмпирическое распределение оценок параметров, поскольку в каждом местоположении рассчитывается множество вариограмм.
- В результате получается надежный нестационарный алгоритм пространственных интерполяционных геофизических поправок.

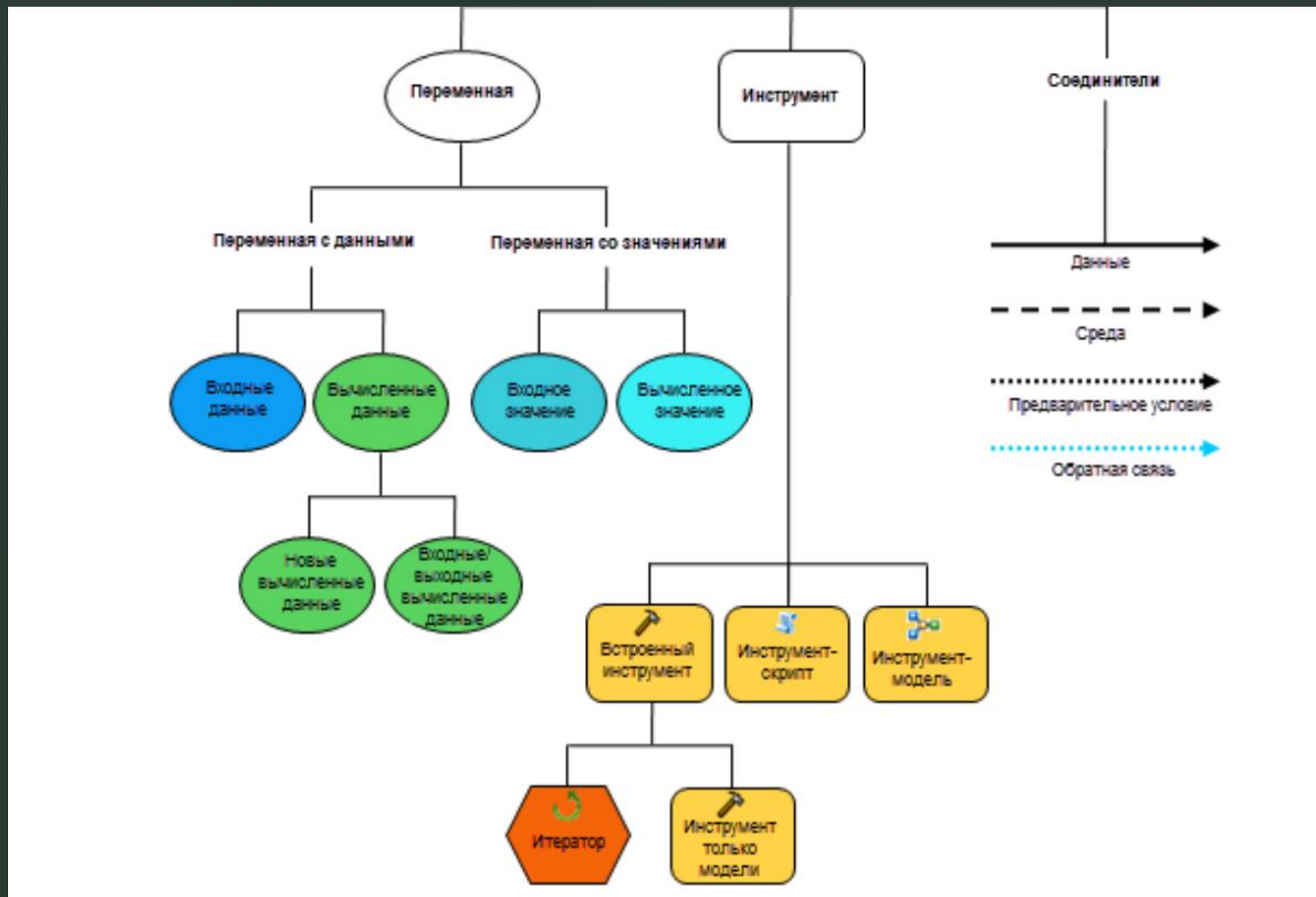
Вариограммы, смоделированные в процессе реализации эмпирического байесовского кригинга



- 3. Автоматизация геопространственного моделирования

- **Автоматизация** – одно из направлений научно-технического прогресса, использующее саморегулирующие технические средства и математические методы с целью освобождения человека от участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования энергии, материалов, изделий или информации либо существенного уменьшения степени этого участия или трудоемкости выполняемых операций.
- **Основным инструментом для автоматизации** геопространственного моделирования является **геообработка** – методичное выполнение последовательности операций с географическими данными, в результате которого создается новая информация.
- *Она позволяет экономить время при выполнении однотипных повторяющихся задач, сократить ошибки и выполнять анализ более эффективно.*

- Эффективным примером приложения, используемого для **создания, редактирования и управления моделями**, является модуль Model Builder программного продукта ArcGIS.
- Модуль Model Builder можно также рассматривать как визуальный язык программирования для построения рабочих потоков без применения традиционного программирования.
- **Модели** – это рабочие процессы, соединенные друг с другом в последовательности инструментов геообработки и направляющие результат реализации функционала одного инструмента в качестве входных данных для другого.



- **Инструменты геообработки** являются основными блоками, из которых строятся рабочие процессы в модели.
- С их помощью выполняются различные операции с геопространственными или табличными данными.
- **Параметры инструмента** – это его входные и выходные значения, а также спецификации, которые влияют на обработку геоданных; одни параметры являются обязательными, другие – опциональными.

- **Переменные** являются элементами модели, в которых хранятся значения или ссылки на данные, хранящиеся в атрибутивных таблицах.
- Существует два типа переменных:
- 1) **переменные данных**, в которых содержатся описательные сведения о геоданных (сведения о поле, пространственная привязка и путь доступа);
- 2) **переменные значений**, представляющие собой значения, такие как строки, числа, логические значения (true/false), пространственные привязки, линейные единицы или экстенды.

- **Соединители** соединяют данные и значения с инструментами модели. Стрелки соединителя указывают направление обработки.
- **Существует четыре типа соединителей:**
 - 1) соединители данных – соединяют переменные данных и значений с инструментами модели;
 - 2) соединители среды – соединяют переменную, содержащую параметр среды (данные или значение), с инструментом модели;
 - 3) соединители предварительного условия – соединяют переменную с инструментом модели;
 - 4) соединители обратной связи – направляют выходные данные инструмента обратно в тот же инструмент в качестве входных данных.



- СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!