

Российский государственный геологоразведочный университет  
(МГРИ) имени. Серго Орджоникидзе

Кафедра инженерной геологии им. Ф.П. Саваренского

**ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ  
ПРИ ОЦЕНКЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ  
ЛИТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

КУРГУЗОВ КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ  
ФОМЕНКО ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ  
СИРОТКИНА ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА

**МОСКВА  
2019**

Отсутствие полноты информации о составе, строении, состоянии и свойствах литотехнических систем, о законах геологических процессов, обуславливает неопределенность инженерно-геологических задач.

Существует объективная необходимость анализа неопределенности задач инженерной геологии, и факторов, определяющих состояние и поведение литотехнических систем.

Неопределенность инженерно-геологических процессов может быть учтена количественным образом на основе вероятностно-статистической методологии, объединяющего методы математической статистики, теории вероятности, теории надежности. Количественная оценка неопределенности направлена на повышении надежности геотехнических систем.

О необходимости более широкого применения математики в геологии говорили многие ученые в нашей стране и за рубежом: Вистелиус А.Б., Бондарик Г.К., Пшеничкин А.П., Ржаницын А.Р., Демьянов В.В., Кауфман Б.Д., Шарапов И.П., Пендин В.В. и пр.

Применение ВСП для количественной оценки неопределенности учитывает то, что процесс литогенеза (петрогенеза), как и другие геологические процессы, не является всецело детерминированными, всегда включают случайную компоненту [Бондарик Г.К.].

$$R(\vec{\xi}, t) = M[R(\vec{\xi}, t)] + \Delta R(\vec{\xi}, t)$$

Где  $R$  – геологический параметр;  $M[R(\vec{\xi}, t)]$  – неслучайная компонента поля, его математическое ожидание;  $\Delta R(\vec{\xi}, t)$  – случайная компонента поля;  $\vec{\xi}$  – вектор координат пространства;  $t$  – время.

Не учёт случайной компоненты в структуре численных оценок геологического параметра (использования чисто детерминированных моделей) неизбежно приводит к ошибочным результатам.

## НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЛИТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*«Исследуя источники неопределенности появляется понимание, что она неизбежна.*

*Вопрос не в том, нужно или не нужно ее исследовать, а в том – как?».*

Herbert H. Einstein

Неопределенность является сложной, многогранной научной категорией, под которой понимается состояние неоднозначности в условиях дефицита информации при принятии решений.

Существуют различные классификации неопределенности задач ЛТС, которые в общем виде сводятся к двум типам:

Онтологическая (**алеаторная**) неопределенность – связана с фундаментальными свойствами, а именно со случайным характером изучаемых процессов;

Гносеологическая (**эпистемическая**) неопределенность связана с отсутствием достаточных знаний о процессах и неточностью моделей описывающих данные процессы.

В соответствии с европейским стандартом геотехнического проектирования **Еврокод 7**, неопределенность связывают непосредственно с расчетными моделями, точнее с элементами расчетных стохастических моделей (Trevor L.L.Orr, 2015):

- Факторы воздействия на геотехнические модели – нагрузки и воздействия, классификация и учет которых основывается на общепринятых квазивероятностных подходах теории надежности и методов предельных состояний;
- Вариативность физико-механических характеристик грунтов. Данный элемент включает природную анизотропию грунтовых параметров, ограниченность данных об исследуемой площадке строительства, качество инженерно-геологических изысканий и ошибки экстраполяции данных исследуемой выборки на генеральную совокупность;

## НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЛИТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*«Исследуя источники неопределенности появляется понимание, что она неизбежна.*

*Вопрос не в том, нужно или не нужно ее исследовать, а в том – как?».*

Herbert H. Einstein

- Неопределенность геометрических параметров объектов исследования, которые связаны с геоморфологическими условиями площадки, геометрией инженерных сооружений, а также геологическими аномалиями – системой трещин скальных пород, карстовые полости и пр.;
- Неопределенность достоверности расчетных моделей, под которой подразумевается несовершенство описанных механизмов геологических процессов.

Более подробная классификация неопределенности ЛТС приведена в работе Consolata Russelli:

- природная неоднородность грунтов (гетерогенность, стратиграфические и геоморфологические условия площадки);
- геологические аномалии (система трещин и карстовых полостей);
- малая изученность исследуемых территорий (низкий уровень информационного обеспечения);
- ошибки измерения;
- изменение свойств и состояний геологических сред во времени;
- факторы нагрузок и воздействий на ЛТС;
- достоверность (адекватность) математических моделей (эмпирических, аналитических, численных);
- статистическая неопределенность;
- человеческий фактор

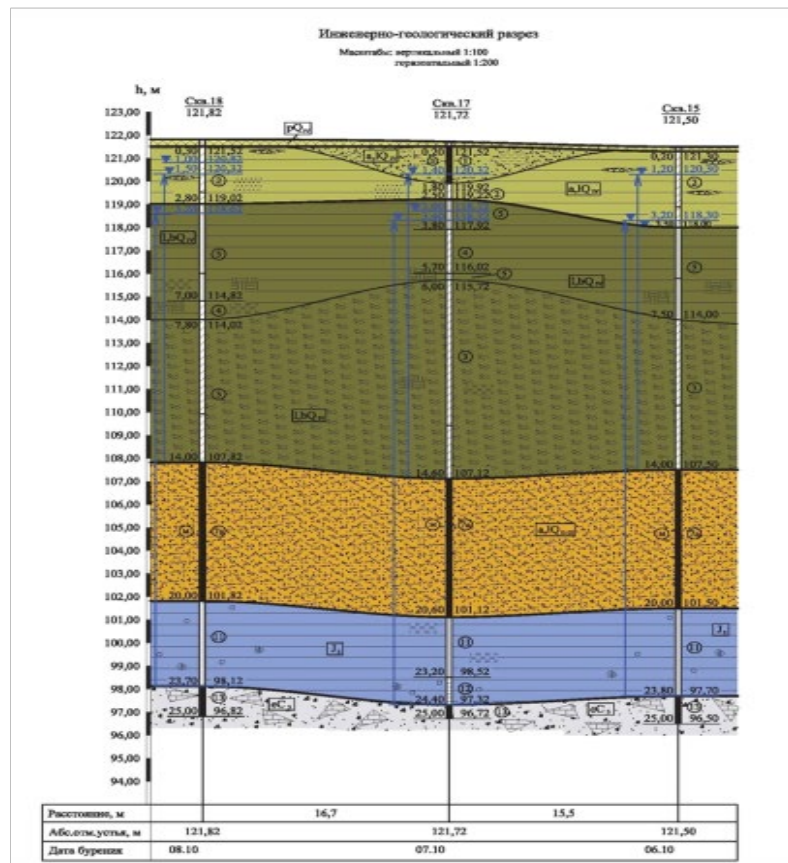
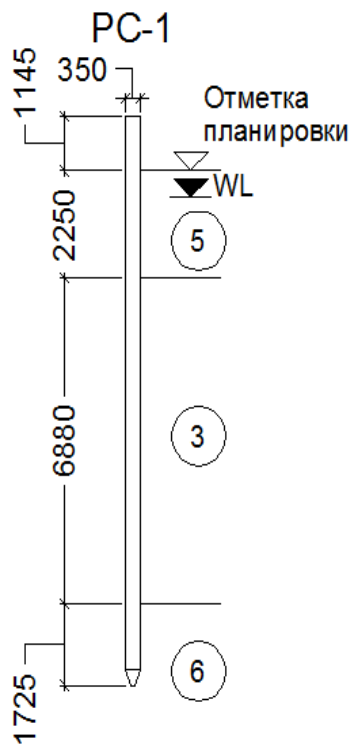
## НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЛИТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Вероятностно-статистическая методология** расчетов литотехнических систем сегодня имеет весьма **широкую область применения**. Перечислим некоторые аспекты:

- Определение оптимального уровня (по составу и объему) инженерно-геологических изысканий, исходя из требуемых первичных данных и требований к будущему объекту строительства (реконструкции);
- На базе количественного моделирования пространственных данных, возможно существенное перестроение методологии инженерно-геологических изысканий;
- Построение пространственно-корреляционных моделей исследуемой области литосферы, с выполнением анализа информационного массива данных с целью последующей обработки и построения стохастических расчетных моделей литотехнической системы или имплементации данных в информационно-цифровую модель объекта (концепция BIM проектирования);
- Исследование случайных полей функций нагрузок и воздействий, а также функций сопротивления литотехнических систем;
- Разработка стохастических моделей, с учетом объектного уровня неопределенности, аналитической или численной формы, с целью совместного расчета на основе детерминированных функций поведения или разрушения грунтов;
- Расчет и анализ композиционных стохастическо-детерминированных расчетных моделей. Вариационный анализ случайных функций;
- Методологической основой для дальнейшего развития инженерных расчетных методов на основе теории предельных состояний, за счет адаптации (калибровки) коэффициентов надежностей;
- Развитие компьютерных технологий в части численных методов расчетов стохастическо-детерминированных пространственных моделей;
- Идентификация, количественный и качественный анализ рисков проектов (опасностей, природного потенциала);
- Анализ инвестиционных показателей эффективности проектов строительства, на базе расчета интегрального показателя рисков.

# Сравнительный анализ результатов моделирования на основе ВСП с детерминированным подходом, на примере расчета несущей способности свайного фундамента.

Цель расчета – оценка несущей способности сваи посредством расчетного анализа стохастическо-детерминированной модели. Анализ несущей способности выполнялся на основе 4-х детерминированных расчетов и на основе 1-го расчета СДМ.



## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

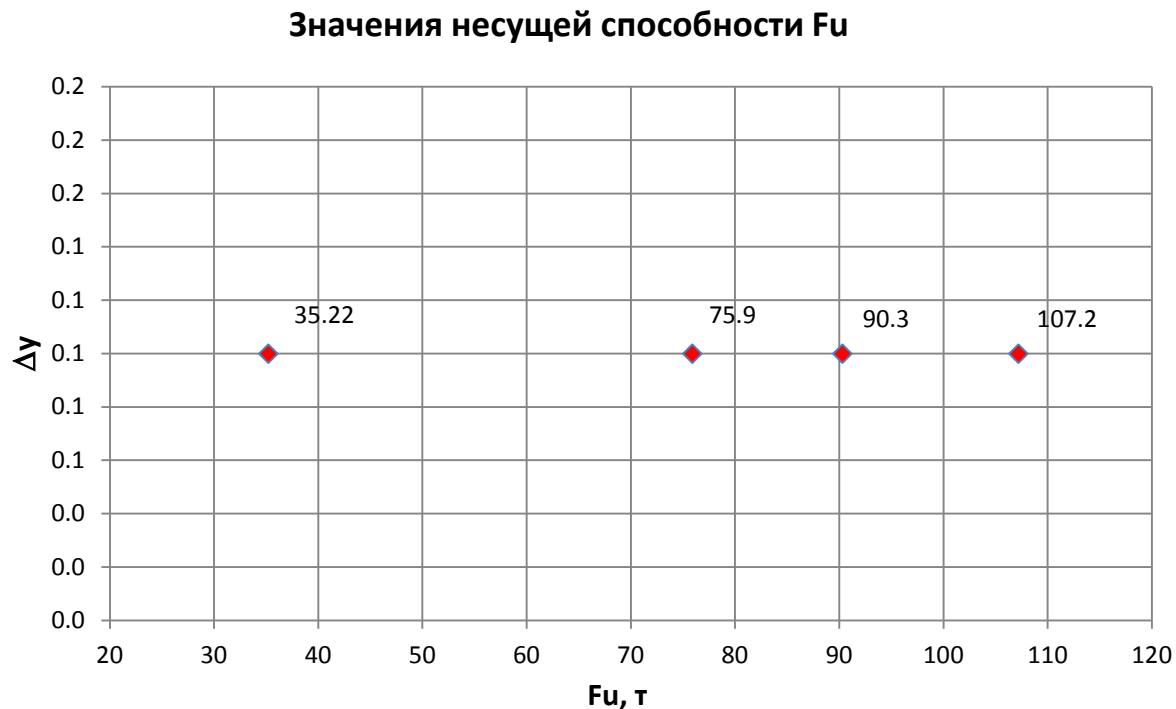
**РП** почвенно-растительный слой

- ① современные аллювиально-озерные отложения - песок пылеватый
- ② современные аллювиально-озерные отложения - глина мягкопластичная
- ③ современные озерно-болотные отложения - сапропель
- ④ современные озерно-болотные отложения - глина заторфованная, мягкопластичная
- ⑤ современные озерно-болотные отложения - глина заторфованная, тугопластичная
- 7a средне-верхнеплейстоценовые аллювиально-озерные отложения - песок мелкозернистый
- 11 верхнеюрские глины тугопластичной и полутвердой консистенции
- 13 элювий известняков средне-позднекаменноугольного возраста

## РЕАЛИЗАЦИЯ 4-х ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ РАСЧЕТОВ

На рисунке представлены значения результатов 4х детерминированных расчетов.

Данные результаты отражают высокую неопределенность значения несущей способности сваи, в силу широкого разброса результатов.

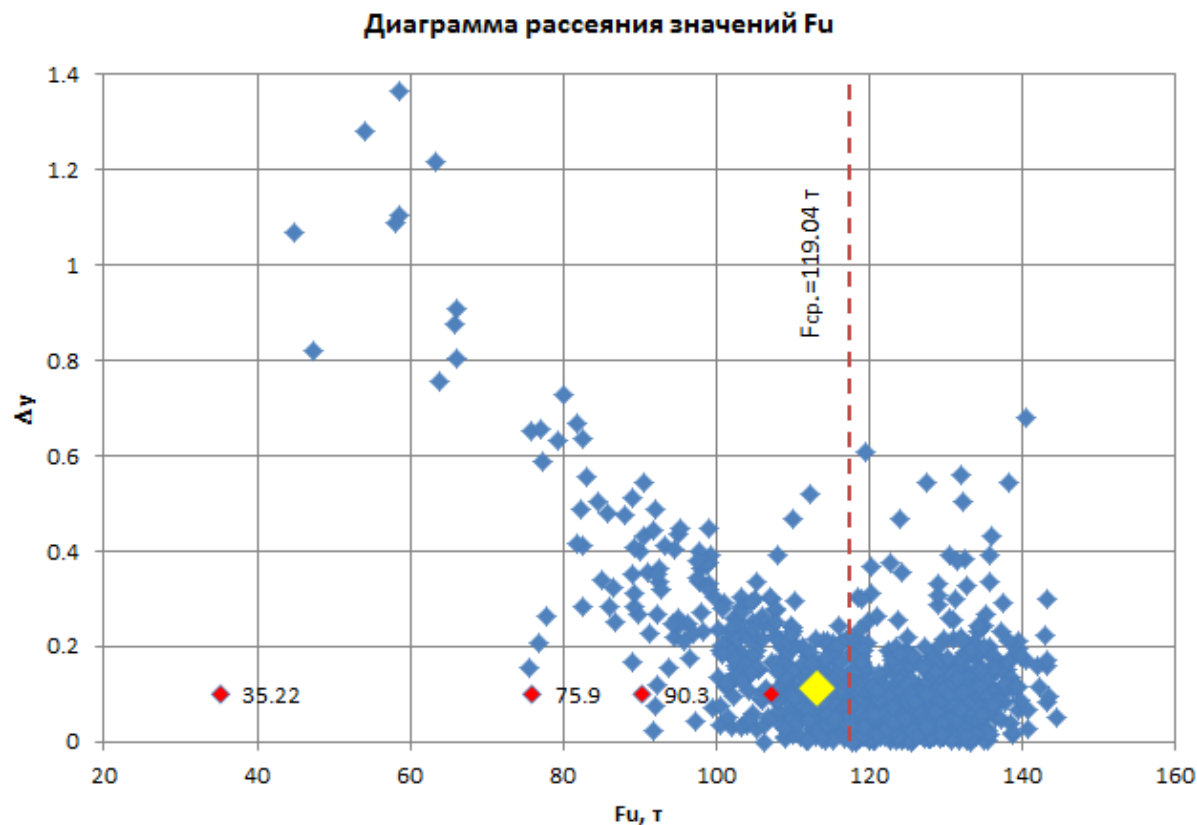


| Результаты расчетов несущей способности сваи, $F_u$ |                     |
|-----------------------------------------------------|---------------------|
|                                                     | Расчетная схем РС-1 |
| СП 24.13330                                         | 35.22 т             |
| RSPile (Нордлунд)                                   | 107.2 т             |
| GEO (Томлинсон)                                     | 75.9 т              |
| Статическое зондирование                            | 90.3 т              |

# РЕЗУЛЬТАТ 1-го РАСЧЕТА СТОХАСТИЧЕСКО-ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ МОДЕЛИ

Расчет демонстрирует возможность количественной оценки факторов неопределенности ЛТС.

Данный расчет СДМ учитывает единственный аспект неопределенности – гетерогенность механических свойств.



| Результаты расчетов несущей способности сваи, $F_u$ |          |
|-----------------------------------------------------|----------|
|                                                     | РС-1     |
| СП 24.13330                                         | 35.22 т  |
| RSPile (Нордлунд)                                   | 107.2 т  |
| GEO (Томлинсон)                                     | 75.9 т   |
| Статическое зондирование                            | 90.3 т   |
| Полевые испытания                                   | 115.0 т  |
| СДМ-1                                               | 119.04 т |

# РЕЗУЛЬТАТ РАСЧЕТА СТОХАСТИЧЕСКО-ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ МОДЕЛИ

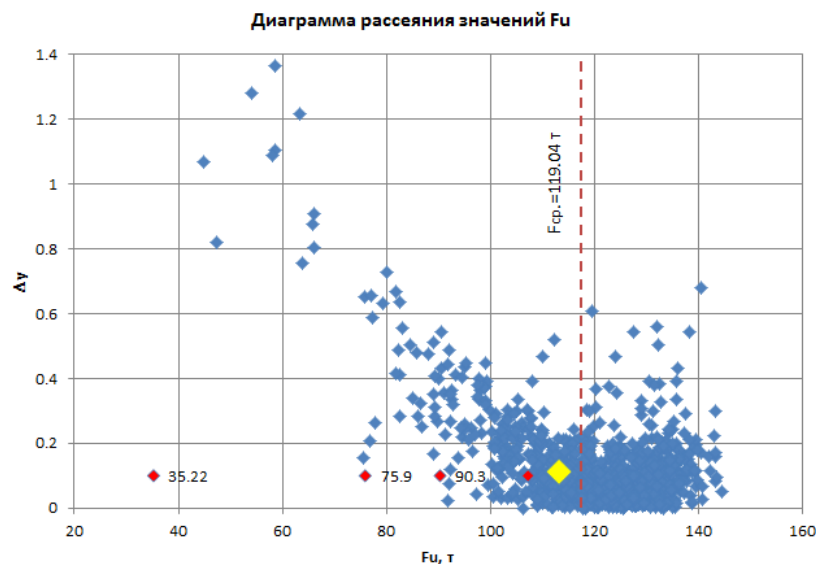
## ВЫВОДЫ

Совокупность распределения стохастических значений, функция распределения несущей способности, ее вероятностно-статистические показатели характеризует **объективность** СДМ методики.

Математическое ожидание данной функции сопоставимо со значениями полевых испытаний свай, что указывает на высокую **достоверность** СДМ.

Возможность учитывать различные факторы неопределенности в СДМ характеризует **гибкость** данной методики.

Традиционные аналитические методы расчетов позволяют получать **приближенные решения**.



Результаты расчетов несущей способности свай,  $F_u$

|                          |          |
|--------------------------|----------|
|                          | PC-1     |
| СП 24.13330              | 35.22 т  |
| RSPile (Нордлунд)        | 107.2 т  |
| GEO (Томлинсон)          | 75.9 т   |
| Статическое зондирование | 90.3 т   |
| Полевые испытания        | 115.0 т  |
| СДМ-1                    | 119.04 т |

## ПРИМЕР ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Наиболее важным фактором неопределенности ЛТС является гетерогенность физико-механических свойств массива. Пространственная гетерогенность свойств не может характеризоваться одним параметром описательной статистики – коэффициентом вариации.

Для пространственного анализа данных необходимо использовать методологию геостатистики, которая в том числе, позволяет получать исходные вероятностно-статистические параметры в любой точке исследуемого массива, на основе построения пространственно-корреляционных (или стохастических) моделей инженерно-геологических данных.

Для апробации применения геостатистической методологии для анализа исходных инженерно-геологических данных предлагается рассмотреть следующий практический пример.

## ПРИМЕР ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

### Цель расчета:

1. Определение статистическо-вероятностных исходных параметров для стохастических расчетов;
2. Построение пространственно-корреляционной модели характеризующей распределение и неоднородность модуля деформации.

Для отображения методов и способов анализа пространственных данных в данной работе был проведен анализ материалов инженерно-геологических изысканий участка строительства.

Площадь территории составляет более 110 га.



## ПРИМЕР ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

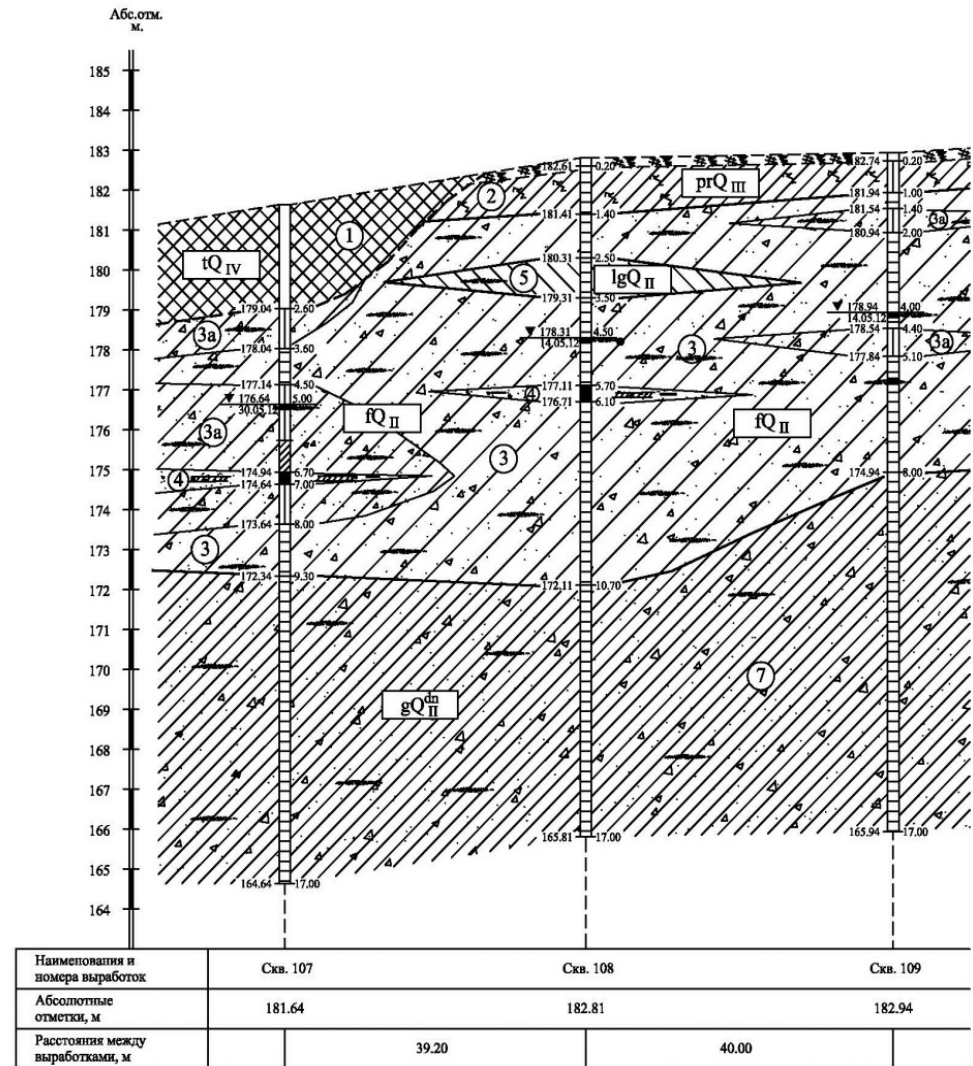
**ИГЭ-1** Насыпные грунты: суглинки, перемешанные, неоднородные.

**ИГЭ-3а** Суглинки тугопластичные, серовато- и желтовато-коричневые, опесчаненные, с маломощными (до 15-20 см) прослоями и линзами песка, с включением гравия и гальки до 5-10%, отдельными валунами.

**ИГЭ-3** Суглинки, редко, глины, полутвердые, серовато- и желтовато-коричневые, опесчаненные, с маломощными (до 15-20 см) прослоями и линзами песка, с включением гравия и гальки до 5-10%, отдельными валунами.

**ИГЭ-4** Пески мелкие и пылеватые, серовато- и желтовато-коричневые, средней плотности, водонасыщенные, глинистые, с прослоями (мощность до 5-10 см) суглинка, с редкими валунами.

**ИГЭ-7** Суглинки полутвердые, коричневые, красновато- и буровато-коричневые, опесчаненные, с маломощными (до 15-20 см) прослоями песка, с включением крупнообломочного материала до 15-20% и отдельными валунами.



## ПРИМЕР ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Статистический анализ проводился для каждой отдельной точки зондирования и для всех данных в совокупности.

Следует обратить внимание, что значения коэффициентов вариации превышают регламентируемое значение в 30% только по двум точкам T111 ( $V=33.3\%$ ) и T133 ( $V=36.1\%$ ). Также интересно, что по уровням значений эксцесса и по критерию Шапиро-Вилка, гипотезе о нормальном Гауссовом распределении данных, соответствуют только две совокупности, в точках зондирования **T109 и T133**.

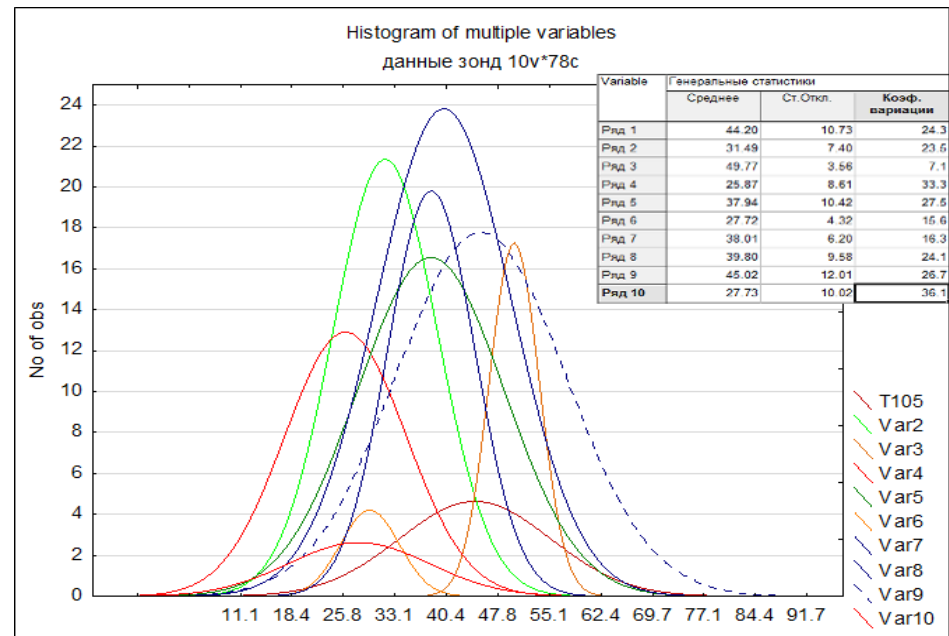
Анализ статистических данных в таблице показывает, что интервал средних значений варьируется от **25.9 МПа до 49.8 МПа**. При этом, показатель вариации генеральной совокупности, по всем точкам зондирования, составляет  **$V = 29.852\%$** , т.е. данное значение не превышает регламентируемый ГОСТ 20522 пороговое значение в 30%. Таким образом можно было бы сделать вывод об однородности значений модуля деформации  $E$ .

Результат статистического анализа данных оценки модуля деформации по статическому зондированию

| Точки зондирования | Размер выборки, шт. | Ср. значение, МПа | Минимальное значение, МПа | Максимальное значение, МПа | Нижн. Квартиль | Верхн. Квартиль | Стандартное отклонение, МПа | Коэффициент вариации | Станд. ошибка | Ассиметрия | Эксцесс     | Критерий Шапиро-Вилка | Уровень значимости, р |
|--------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| T105               | 17                  | 44.2              | 33.4                      | 80.9                       | 38.5           | 46.3            | 10.7                        | 24.3                 | 2.602         | 2.6        | 9.0         | 0.716                 | 0.00018               |
| T107               | 54                  | 31.5              | 21.4                      | 62.7                       | 27.2           | 33.9            | 7.4                         | 23.5                 | 1.006         | 1.9        | 5.1         | 0.853                 | 0.00001               |
| T109               | 21                  | 49.8              | 45.0                      | 58.6                       | 47.0           | 51.5            | 3.6                         | 7.1                  | 0.776         | 0.8        | <b>0.4</b>  | <b>0.938</b>          | <b>0.20604</b>        |
| T111               | 38                  | 25.9              | 16.4                      | 45.7                       | 19.7           | 34.1            | 8.6                         | 33.3                 | 1.396         | 1.0        | -0.6        | 0.812                 | 0.00002               |
| T116               | 59                  | 37.9              | 22.6                      | 87.2                       | 30.6           | 42.6            | 10.4                        | 27.5                 | 1.356         | 2.1        | 8.0         | 0.846                 | 0.00000               |
| T113               | 6                   | 29.3              | 23.2                      | 33.0                       | 24.8           | 32.0            | 4.2                         | 14.2                 | 1.702         | -0.9       | -1.5        | 0.793                 | 0.05136               |
| T122               | 42                  | 38.0              | 27.5                      | 63.6                       | 34.4           | 41.0            | 6.2                         | 16.3                 | 0.957         | 1.6        | 6.0         | 0.883                 | 0.00048               |
| T125               | 78                  | 39.8              | 30.5                      | 99.2                       | 35.7           | 40.1            | 9.6                         | 24.1                 | 1.084         | 4.1        | 20.9        | 0.578                 | 0.00000               |
| T128               | 73                  | 45.0              | 31.0                      | 121.1                      | 39.4           | 46.4            | 12.0                        | 26.7                 | 1.405         | 4.1        | 22.8        | 0.636                 | 0.00000               |
| T133               | 9                   | 27.7              | 11.1                      | 39.4                       | 21.1           | 34.9            | 10.0                        | 36.1                 | 3.339         | -0.7       | <b>-0.9</b> | <b>0.910</b>          | <b>0.31949</b>        |

## ПРИМЕР ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

| Результат статистического анализа значений модуля деформации E,<br>по данным расчета статического зондирования |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Размер выборки, шт.                                                                                            | 622           |
| <b>Ср.значение, МПа</b>                                                                                        | <b>38.690</b> |
| Медиана                                                                                                        | 38.326        |
| Мода                                                                                                           | различн.      |
| Минимальное значение, МПа                                                                                      | 11.101        |
| Максимальное значение, МПа                                                                                     | 132.52        |
| Нижн. квартиль                                                                                                 | 32.609        |
| Верхн. квартиль                                                                                                | 43.261        |
| Интервал                                                                                                       | 121.425       |
| Стандартное отклонение, МПа                                                                                    | 11.550        |
| Стандартная ошибка среднего значения, %                                                                        | 1.628         |
| <b>Коэффициент вариации, %</b>                                                                                 | <b>29.852</b> |
| Коэф. асимметрии                                                                                               | 2.173         |
| Ст. ошибка, %                                                                                                  | 0.097         |
| Коэф. эксцесса                                                                                                 | 13.060        |
| Станд. ошибка, %                                                                                               | 1.014         |
| Показатель Колмогорова-Смирнова                                                                                | <b>0.091</b>  |
| Показатель доверия p                                                                                           | <b>0.01</b>   |



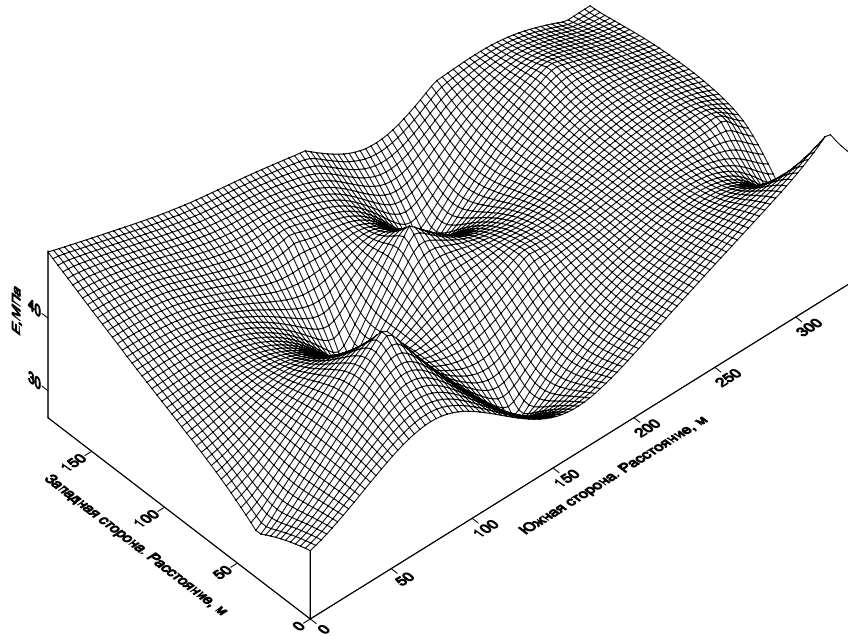
Статистический анализ проводился для каждой отдельной точки зондирования и для всех данных в совокупности.

следует обратить внимание, что значения коэффициентов вариации превышают регламентируемое значение в 30% только по двум точкам T111 ( $V=33.3\%$ ) и T133 ( $V=36.1\%$ ). Также интересно, что по уровням значений эксцесса и по критерию Шапиро-Вилка, гипотезе о нормальном Гауссовом распределении данных, соответствуют только две совокупности, в точках зондирования **T109 и T133**.

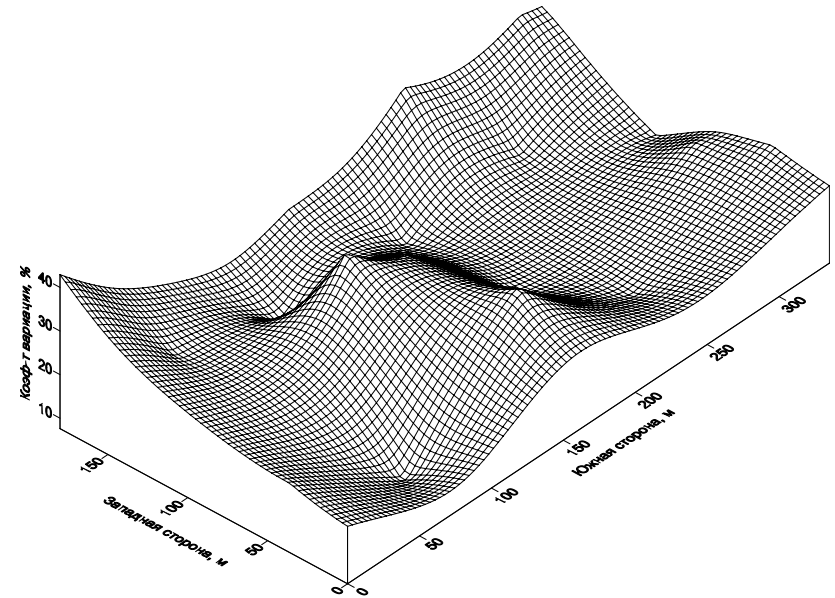
Анализ статистических данных в таблице показывает, что интервал средних значений варьируется от **25.9 МПа до 49.8 МПа**. При этом, показатель вариации генеральной совокупности, по всем точкам зондирования, составляет  **$V = 29.852\%$** , т.е. данное значение не превышает регламентируемый ГОСТ 20522 пороговое значение в 30%. Таким образом можно было бы сделать вывод об однородности значений модуля деформации E.

## ПРИМЕР ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Пространственная модель  
значения модуля деформации  
( $E$ , МПа) на основе кригинга.



Пространственная модель  
коэффициента вариации ( $V$ , %)  
на основе кригинга.



Данные пространственные модели обеспечивают определение исходных вероятностно-статистических данных в любой точке исследуемого массива.

Данные модели позволяют предварительно оценивать неоднородность геологического параметра  $E$ .

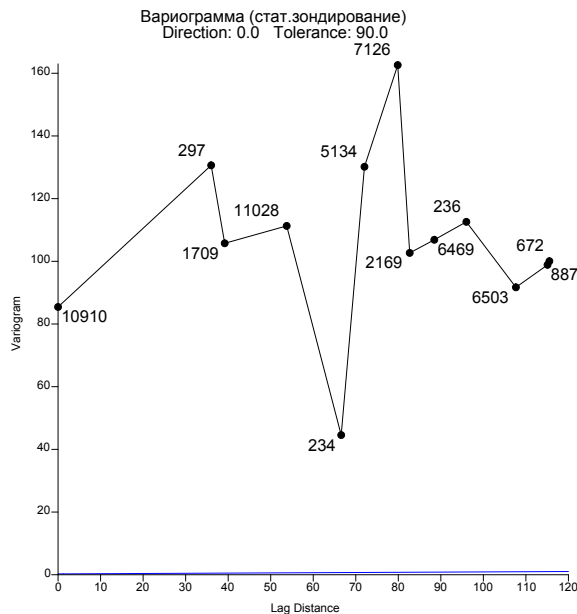
Очевидно, что в данном случае, при условно равном ГОСТовском показателе однородности (коэффициенте вариации), проектирование одинаковых, отдельно расположенных, столбчатых фундаментов может привести к различным осадкам.

## ПРИМЕР ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

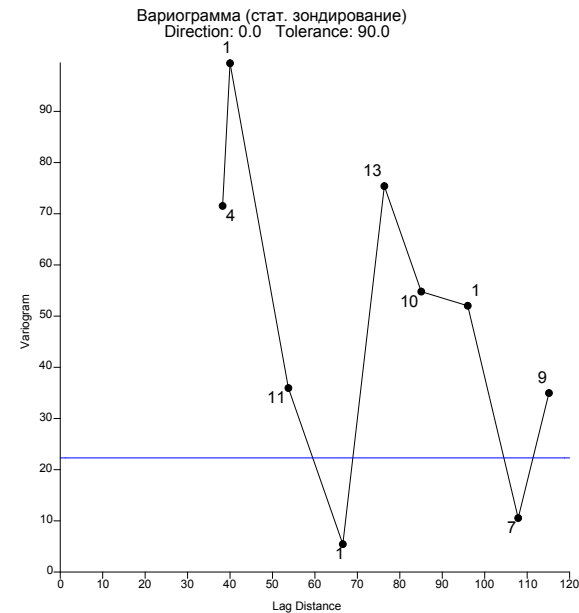
Для возможности практического использования пространственной модели данных в расчетах, необходимо проверить гипотезы об однородности и изотропии массива данных.

*Если данные однородны, т.е. когда функции распределения случайной величины не изменяются при замене рассматриваемого сечения, то между ними должна наблюдаться корреляционная зависимость.*

Поэтому, для окончательного подтверждения (или опровержения) гипотезы об однородности деформационных характеристик данных были построены **корреляционные функции** в виде экспериментальных вариограмм.



Экспериментальная вариограмма значений модуля деформации по данным статического зондирования



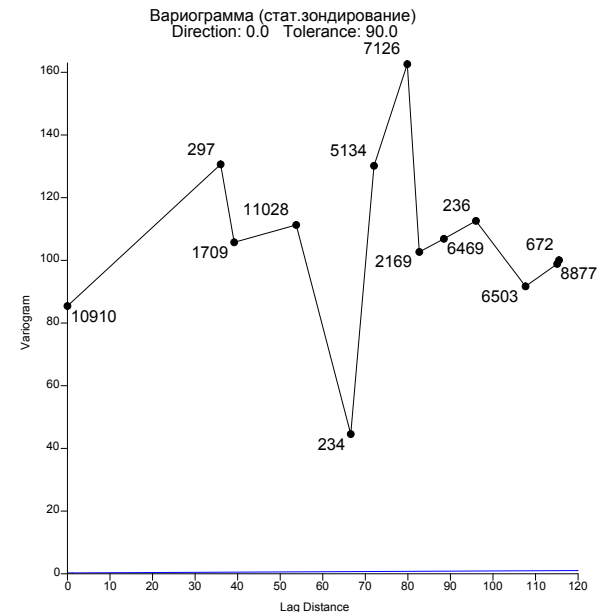
Экспериментальная вариограмма значений модуля деформации по укрупненным данным

## ПРИМЕР ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Отсутствие роста значения вариограммы для больших расстояний лага показывает отсутствие корреляционной связи между значениями в парах, потому что, как правило, возрастающая вариограмма указывает на наличие корреляции между значениями в парах, а скорость роста вариограммы с расстоянием лага характеризует величины пространственной корреляции. Таким образом **данная вариограмма указывает на неоднородность массива данных** и наличия экстремальных значений, а также, возможно, на отсутствие стационарности.

Таким образом, получается, что:

- дальнейшее применение геостатистического анализа и пространственно-корреляционного моделирования **некорректно**, из-за малого объема исходных данных;
- построенная пространственная аппроксимирующая модель значений модуля деформации, на основе методики обычного кригинга **недостоверна**.



Экспериментальная вариограмма значений модуля деформации по данным статического зондирования

## ПРИМЕР ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

### ВЫВОДЫ К ЗАДАЧЕ

- Рассмотренный пример показывает **возможности геостатистической методологии в оценке исходных параметров, анализе неоднородности геологических параметров, а также возможность снижения факторов неопределенности инженерно-геологических условий.**
- Геостатистическое моделирование пространственных данных для рассматриваемого участка возможно только после получения дополнительных данных статического зондирования.
- Регламентируемые требования ГОСТ 20522-2012 «Методы статистической обработки результатов испытаний грунтов», к статистическому анализу не отражают требований для геостатистического моделирования. Таким образом, детерминированный подход оценок параметров грунтовых массивов который принят сегодня в инженерно-геологической практике не может являться основой для широкого внедрения вероятностно-статистических подходов в расчете надежности сооружений. Для этих целей должна быть разработана новая методология инженерно-геологических изысканий основанная на пространственно-корреляционном и стохастическом моделировании пространственных данных.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**