

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТОВ

Владова А.Ю.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Финансовый университет при Правительстве РФ,
Москва, Россия
avladova@ipu.ru*

Аннотация. На основе расчета расстояний по Хеллингеру предложена модель нелинейной взаимосвязи между типами инженерно-геологических элементов трассы и мощностями слоев грунта в узлах неравномерной сетки, заданной отметками трассы и глубины залегания подошвы слоя.

Ключевые слова: стратиграфическая колонка, геологические разрезы, грунтовые свойства, классификация грунтов, стохастическая геотехника, случайные величины, корреляция.

Введение

Построение геологических разрезов вдольтрассовых грунтов основано на бурении скважин с последующим извлечением столба грунтового основания и проведением его замеров, в результате которого формируется таблица, содержащая высотные отметки подошвы каждого слоя, разницы между соседними высотными отметками подошвы, которые позволяют вычислить мощность каждого слоя в скважине, порядковые номера каждому инженерно-геологическому элементу (типу грунта) при построении разрезов, глубины расположения каждого слоя грунтового основания, описание всех характеристик слоёв грунта по номеру, оттенку, наличию, количеству включений, трещиноватой, сыпучей или плотной связной структуре, уровень грунтовых вод [2, 3]. В соответствии с действующими регламентами, по чертежам геологических разрезов формируют стратиграфическую колонку, содержащую: тип и состав грунтов, и его физические свойства, такие как прочность, плотность, текучесть и водопроницаемость (табл. 1).

Таблица 1. Стратиграфическая колонка

Км	Пикет	Плюсовка, м	Мощность слоя, м	Глубина залегания подошвы слоя, м	Номер ИГЭ	Описание грунта
151	1517	19,8	0,1	0,1	61	Мох
151	1517	19,8	3,4	3,5	203	Суглинок тугопластичный
151	1517	19,8	2,5	6	201	Суглинок твердый
151	1517	19,8	2,3	8,3	456	Песок пылеватый насыщенный водой
151	1517	19,8	8,7	17	436	Песок средней крупности насыщенный водой
151	1519	26,6	0,1	0,1	61	Мох
151	1519	26,6	2,9	3	445	Песок мелкий средней степени водонасыщения

Источник: данные автора

По стратиграфической колонке выделено 54 уникальных инженерно-геологических элемента трассы, которые разделяют грунты с одинаковыми физико-механическими свойствами (например, прочностью или пластичностью), литологической структурой, составом породы и др.

1. Вероятностное моделирование

Свод правил [1] определяет основную грунтовую единицу через некоторый объем грунта одного и того же типа при изменении значений характеристик грунта случайно или при наблюдающейся закономерности изменения характеристик грунтов с коэффициентом вариации для физических характеристик грунта $\leq 0,15$, для механических $\leq 0,30$. Несмотря на факт, что случайная природа распределения свойств в ИГЭ присутствует в определении, статистическая обработка свойств грунтов обычно выполняется до создания моделей, а сами модели носят детерминированный характер [4]. Задача оценки несущей способности грунтов трассы нефтепровода по стратиграфической колонке

состоит в определении вероятности разрушения грунта под действием нагрузок, учитывая различные типы грунтов, их свойства и взаимодействие с геологическими формациями.

1.1. Детерминированная модель

При моделировании детерминированной моделью исходными параметрами являются определенные для каждого ИГЭ скалярные величины свойств грунтов [4]: плотность, удельное сцепление, угол внутреннего трения. Результатом моделирования является определение минимального значения коэффициента устойчивости C :

$$C = \frac{cN+q}{NT}, \quad (1)$$

где N - нормальное давление на плоскости разрушения, $N = \rho gh$ и ρ - плотность грунта, g - ускорение свободного падения, h - глубина погружения;
 q - внешнее нормальное давление,
 T - тангенциальное напряжение, $T = cN$, где c - удельное сцепление грунта.

1.2. Вероятностная модель

Для вероятностной модели пространственной изменчивости исходными параметрами являются не скалярные величины, как у детерминированной модели, а плотности распределения случайных величин. Вероятностная модель, основанная на коэффициенте корреляции $R(\tau_x, \tau_y)$ и представляет собой меру степени взаимосвязи между значениями двух случайных величин (например, свойства грунта и мощности слоя) в точках пространства, заданных дистанцией трубопровода и глубиной расположения слоя, учитывая расстояние между этими точками в горизонтальном (τ_x) и вертикальном (τ_y) направлениях. Здесь τ_x и τ_y могут интерпретироваться как корреляционные расстояния, т.е. расстояния на которых корреляция между значениями свойств грунта считается значимой.

Функция от коэффициента корреляции позволяет оценить структуру зависимостей между свойствами грунта в различных точках пространства, учитывая как горизонтальное, так и вертикальное расположение этих точек [5].

1.3. Непараметрические статистические критерии

Расчет парных коэффициентов корреляции признаков исходных данных (таблица 2) показал, что данные некоррелированы между собой за исключением Глубины залегания и Толщины слоёв грунта.

Таблица 2. Парные коэффициенты корреляции исходных данных

Признак	Км трассы	Глубина залегания подошвы слоя, м	Мощность слоя, м
Км трассы	1.0		
Глубина залегания подошвы слоя, м	-0.03247	1.0	
Мощность слоя, м	-0.1562	0.7046	1.0
Код грунта	0.2037	-0.0715	0.0015

Источник: расчеты автора

Предположение о линейной связи глубины или мощности слоя с типом грунта или местонахождением вдоль трассы не подтвердилось. Наличие связанных признаков, таких как километр, пикет, плюсовка, характеризующих положение скважины, и код грунта и текстового признака Описание грунта, а также двух сильно коррелированных признаков Толщина и Глубина слоя грунта снижают степень свободы до двух количественных и одного категориального признаков: местоположение, глубина или мощность, код грунта.

Если проиндексировать датафрейм по двум осям: горизонтальной – Дистанции, м и вертикальной – Глубина залегания подошвы слоя, м, то получится новый датафрейм, в котором в узлах неравномерной сетки будут стоять значения мощности слоя и кода грунта (рис. 1).

	Thickness, m	Code of soil
Distance, m		
1863.765	1.5	1.3 307.0
2029.100	15.2	7.4 201.0
2437.813	8.0	1.5 104.0

Рис. 1. Фрагмент проиндексированных по двум осям данных

Построены две корреляционные матрицы взаимосвязи глубины залегания подошвы слоя, мощности слоя и номера инженерно-геологического элемента по дистанции трассы (рис. 2) и по глубине трассы (рис. 3).

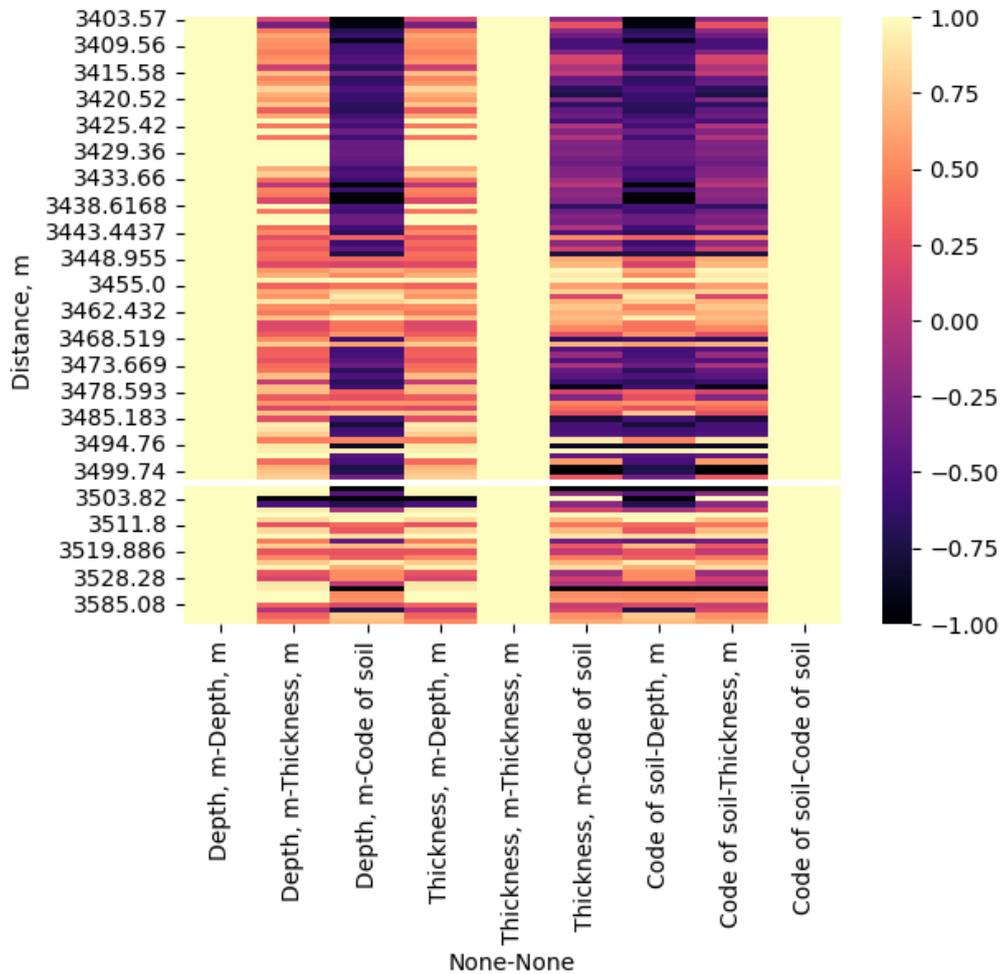


Рис. 2. Корреляционная карта по дистанции трассы

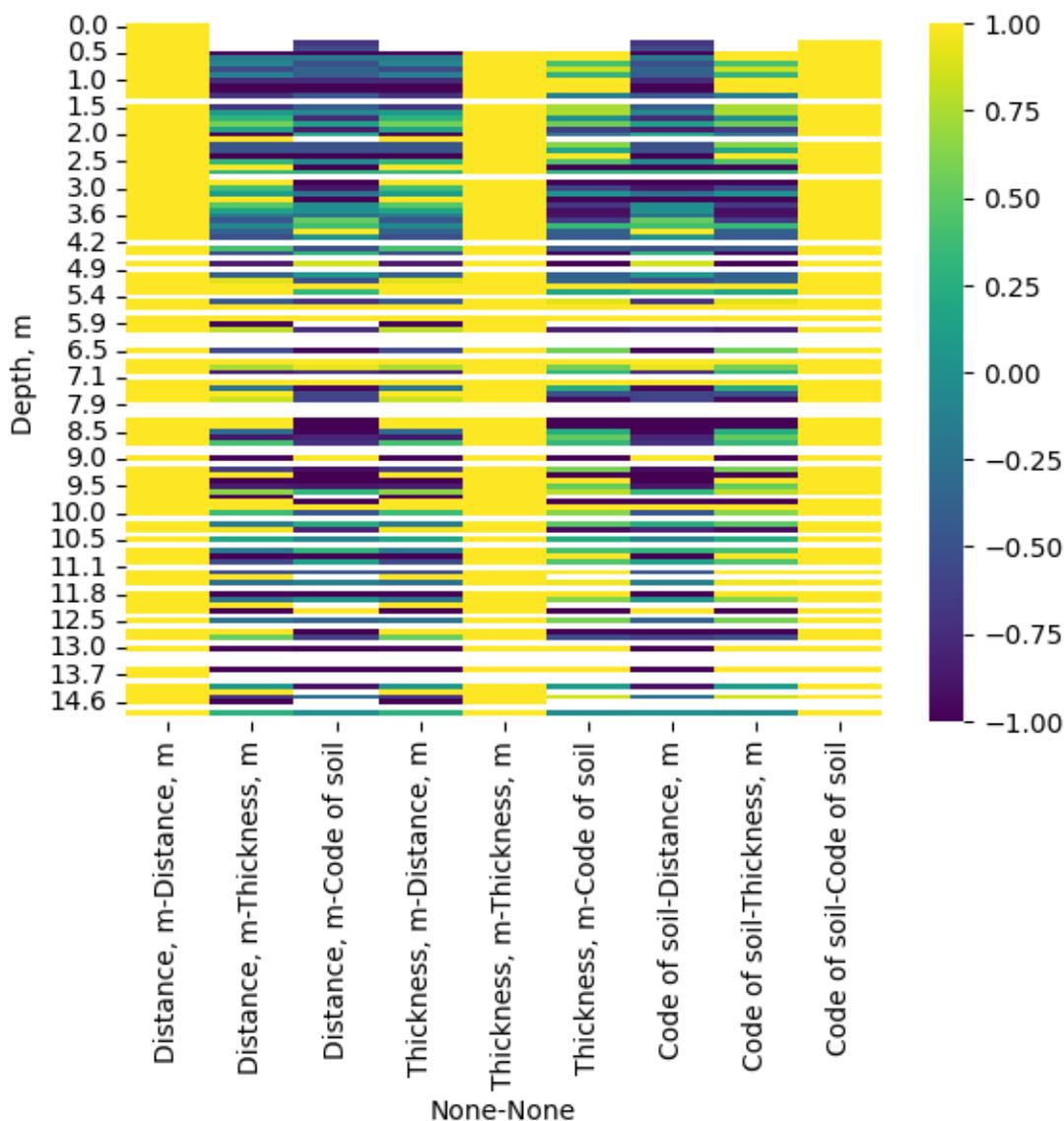


Рис. 3. Корреляционная карта по глубине трассы

Корреляция Пирсона, при которой мы масштабируем ковариацию, чтобы получить безразмерное число, дает интерпретируемый результат, но выясняет наличие только линейной связи между признаками. Оценка нелинейных корреляций проведены методом Кендалла и Спирмена и не показали высокого уровня связи. Одним из недостатков этих ранговых методов является то, что они не выявляют сложные ассоциативные связи, такие как отношения, которые являются циклическими или включают в себя несколько переменных, взаимодействующих немонотонным образом [6].

1.4. Нелинейная взаимосвязь по расстоянию Хеллингера

В вероятности и статистике расстояние Хеллингера используют для количественной оценки сходства между двумя распределениями вероятностей. Представим датафрейм (см. рис. 1) в виде двух датафреймов, один из которых хранит стратиграфическую колонку с типами грунтов, а второй мощности слоев, соответствующие этим колонкам. Распределения мощностей слоев грунта в каждой отметке трассы построены на рис. 4.

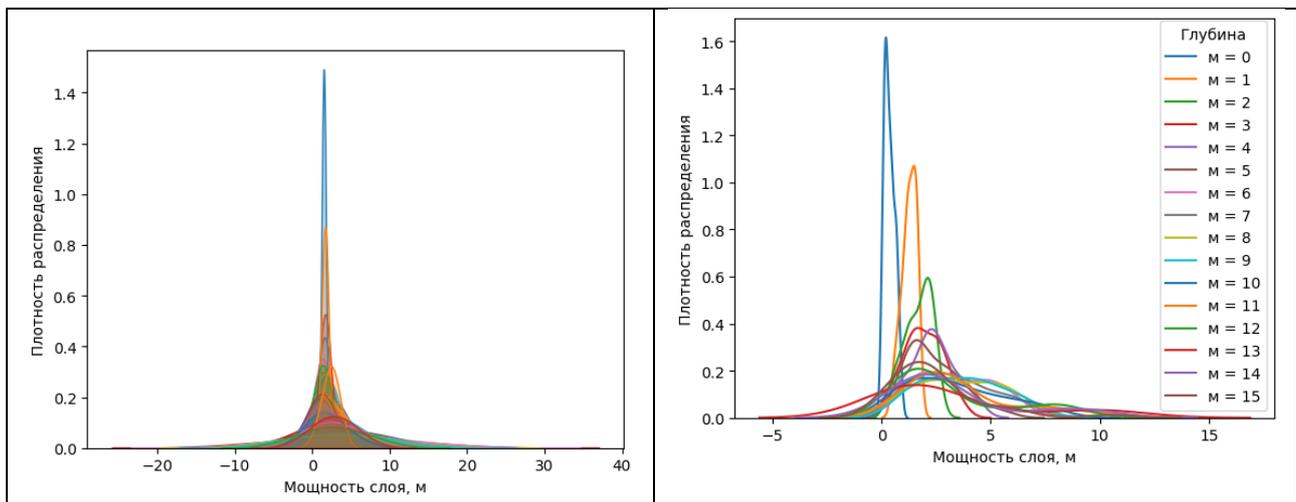


Рис. 4. Плотности распределений мощностей слоев грунта: а) по длине трассы, б) по глубине трассы

В первом приближении большинство графиков полученных распределений можно считать нормальными. Расчет расстояний Хеллингера для нормально распределенных признаков Код грунта и Мощность слоя, проведен по формуле:

$$H^2(u, v) = 1 - \sqrt{\frac{2\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \exp\left(-\frac{(\mu_1 - \mu_2)^2}{4(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}\right), \quad (2)$$

где σ_1, σ_2 - стандартные отклонения распределений,
 μ_1, μ_2 – математические ожидания распределений.

Изменения в расстояниях между этими наблюдениями и другими наблюдениями данных отражают относительное сходство или различие между соответствующими наблюдениями с точки зрения метрики Хеллингера.

Hellinger distance squared between group 766 and group 767: 0.999

Hellinger distance squared between group 767 and group 768: 0.463

Hellinger distance squared between group 768 and group 769: 1.0

2. Заключение

Использование детерминированных моделей снижает достоверность инженерно-геологических расчетов.

Получена вероятностная модель взаимосвязи типа грунта и мощности слоя по километражу и глубине трассы на основе корреляций различного вида.

По вероятностной модели и вертикально индексированным данным геологических разрезов вдольтрассовых грунтов оценены расстояния Хеллингера, отражающие сильное различие между соответствующими распределениями признаков (мода расстояний равна 0.99).

Образец данных и кода представлены на странице https://github.com/avladova/MLSD/blob/main/MLSD2024_Hellinger.ipynb

Литература

- СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. – М.: Минстрой, 2019.
- Владов Ю.Р., Нестеренко М.Ю., Нестеренко Ю.М., Владова А.Ю. Повышение геодинамической безопасности разрабатываемых месторождений углеводородов нефтегазоносного бассейна // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 8. - С. 45-51.
- Голофаст С.Л., Владова А.Ю. Интеграция результатов мониторинга технического состояния магистральных трубопроводов // Экспозиция Нефть Газ. 2017. № 5 (58). - С. 76-81.
- Фоменко И.К., Кургузов К.В., Сироткина О.Н., Горобцов Д.Н. Схематизация свойств грунтов при математическом моделировании в инженерной геологии и геотехнике // Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии: сб. науч. тр. – Москва, 2021.

5. *Владов Ю.Р., Нестеренко М.Ю., Волова А.Ю.* Технология мониторинга геодинамического состояния недр эксплуатируемого месторождения углеводородного сырья // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019): труды Девятнадцатой междунар. конф. - М.: ИПУ РАН, 2019. - С. 1055-1061.
6. Эмануэль Дж. Нелинейные корреляции. Моя любимая статистическая мера: D Хёфдинга // <https://habr.com/ru/articles/795661>.