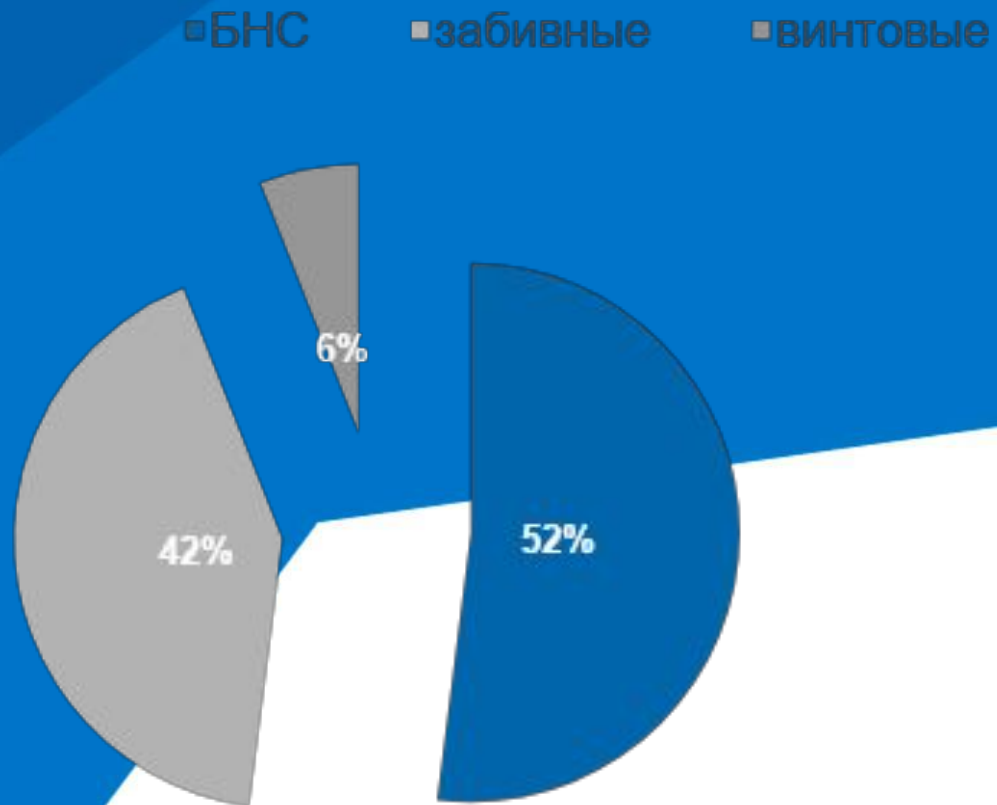




# Статистика использования разных типов свай



# Цель работы

- Исследовать взаимодействие свай и скального массива
- Рассчитать геомеханическую (на базе метода конечных элементов) модель работы свай со скальным грунтом при действии сжимающей нагрузки
- Определить независимые факторы варьирования для функции отклика
- Определить метод расчёта для выбора оптимальной длины сваи при действии сжимающих нагрузок и с этой целью получить уравнение регрессии

# Актуальность темы исследования

- Большие нагрузки на основание
- В СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» не полностью описана работа свай в скальных грунтах
- Экономическая нецелесообразность натуральных испытаний

# Методы исследования

- Метод конечных элементов (решение частных задач взаимодействия сваи с окружающим массивом)
- Метод планирования эксперимента (Определение минимального и необходимого количества опытов, обобщение численных результатов полученных МКЭ, составление математической зависимости в виде уравнений регрессии)

# Определение факторов варьирования

В качестве исследуемых параметров, способных оказать влияние на работу сваи и ее осадку принимались следующие параметры и пределы их варьирования:

1) Отношение модулей упругости бетона к скальной отдельности  $E_b/E_r$  принималось исходя из найденных характеристик для бетона класса В25 и найденных модулей упругости для скальных пород средней прочности. Исходя из классификации, пределы варьирования прочности скальных отдельностей составляют:

- верхний предел:  $\approx 80$  МПа,
- нижний предел:  $\approx 20$  МПа,

и непосредственно этим значениям соответствуют пределы варьирования модуля упругости нераздробленных скальных грунтов (отдельностей), который использован в данной работе, как независимый фактор и имеет значения:

- верхний предел :  $E_r = 50\ 000$  МПа
- нижний предел :  $E_r = 5\ 000$  МПа.

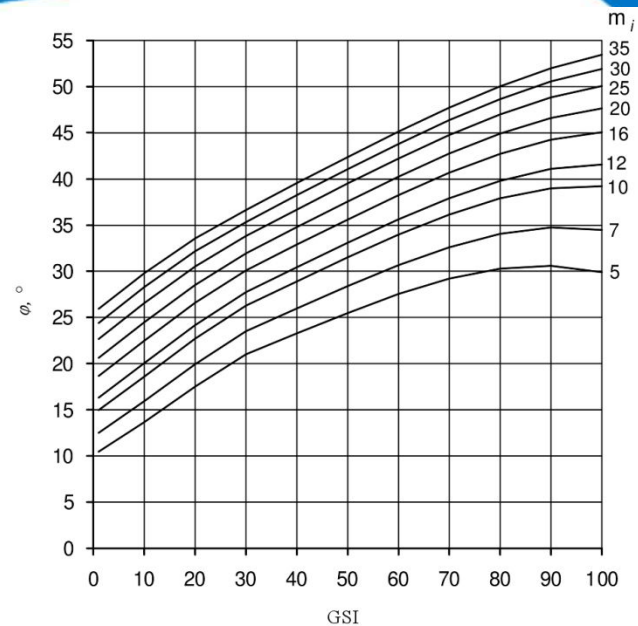
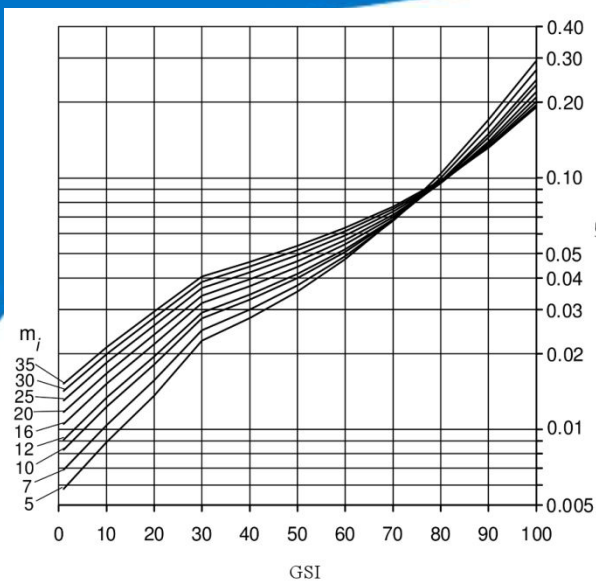
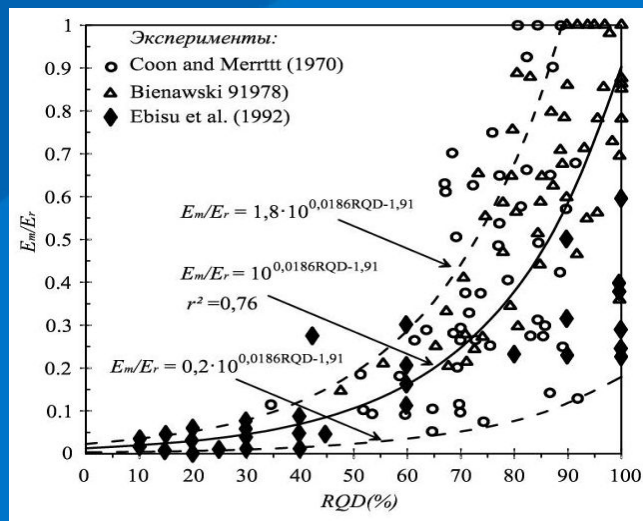
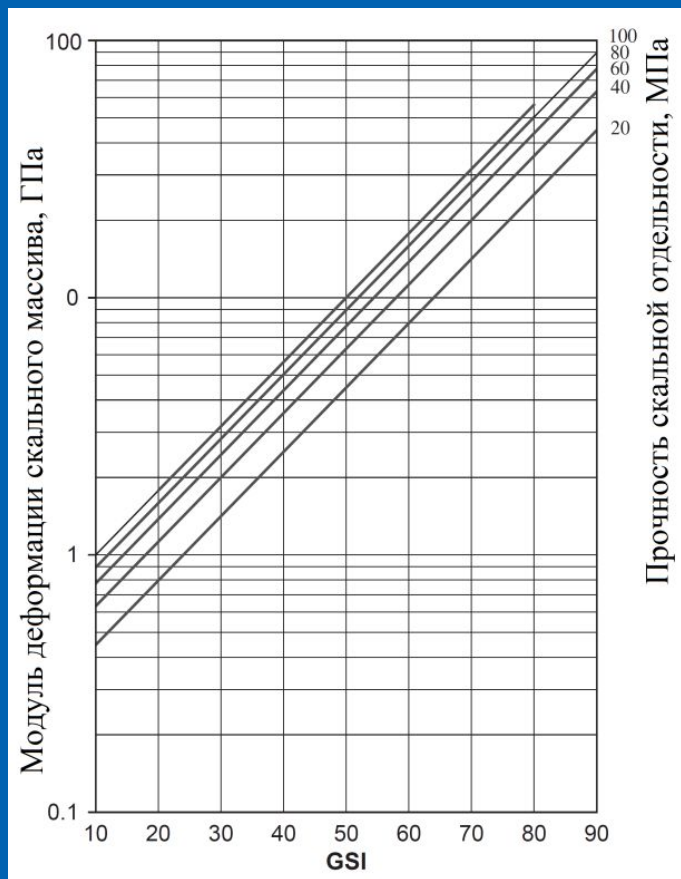
$$E_b/E_r = 0,5 - 5.$$

2) Показатель качества горной породы (RQD). Принимался от 25% до 75%, так как  
при  $RQD < 25\%$  - горная масса разрушенного скального грунта,  
а при  $RQD > 75\%$  - практически цельный массив скального грунта

3) Касательная жесткость контакта «свая - скальный массив»  $k_s$  принималась на основе данных исследований д.т.н. Михаила Григорьевича Зерцалова, в пределах варьирования  $50\ 000 - 700\ 000$  кН/м<sup>3</sup>  
Для проведения экспериментов требовалось выполнить  $2^3=8$  испытаний по составленной матрице планирования эксперимента



# Графики и номограммы, использованные при нахождении модуля деформации скального массива





# Таблицы, использованные в работе

Таб.3.2. Таблица механических свойств скальных массивов.

Характеристика	$E_r=50\ 000$ МПа		$E_r=5\ 000$ МПа	
	$RQD=25\%$	$RQD=75\%$	$RQD=25\%$	$RQD=75\%$
Эмпирические характеристики трещиноватого скального массива				
$GSI$	27,3	58,5	27,3	58,5
$m_i$	18	18	10	10
$m_b$	1,347	4,084	0,747	2,272
$s$	$3,12 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$	$33,12 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$
Деформационные характеристики квазисплошного квазизотропного массива				
$E_m$ , МПа	2 421.28	14589.7	1210.64	7294.83
Эквивалентные прочностные характеристики квазисплошного квазизотропного массива по критерию прочности Кулона-Мора				
$C_m$ , МПа	2,56	4,6	0,54	1,05
$\phi$ , градусы	30	39	25	34
$\sigma_m$ , МПа	9,7	17,7	1,28	2,42

Таб.3.3. Характеристика входных параметров.

Наименование фактора	Единицы измерения	Обозначение		Уровни варьирования		
		Натуральное	Кодовое	Верхний (+1)	Основной (0)	Нижний (-1)
Отношение модуля упругости бетона к модулю упругости скальной отдельности	-	$E_B/E_r$	X1	5	2,75	0,5
Степень трещиноватости массива	%	$RQD$	X2	75	50	25
Касательная жесткость	кН/м3	$K_s$	X3	700000	375000	50000

Таб.3.3. Таблица механических свойств контакта «бетон-массив».

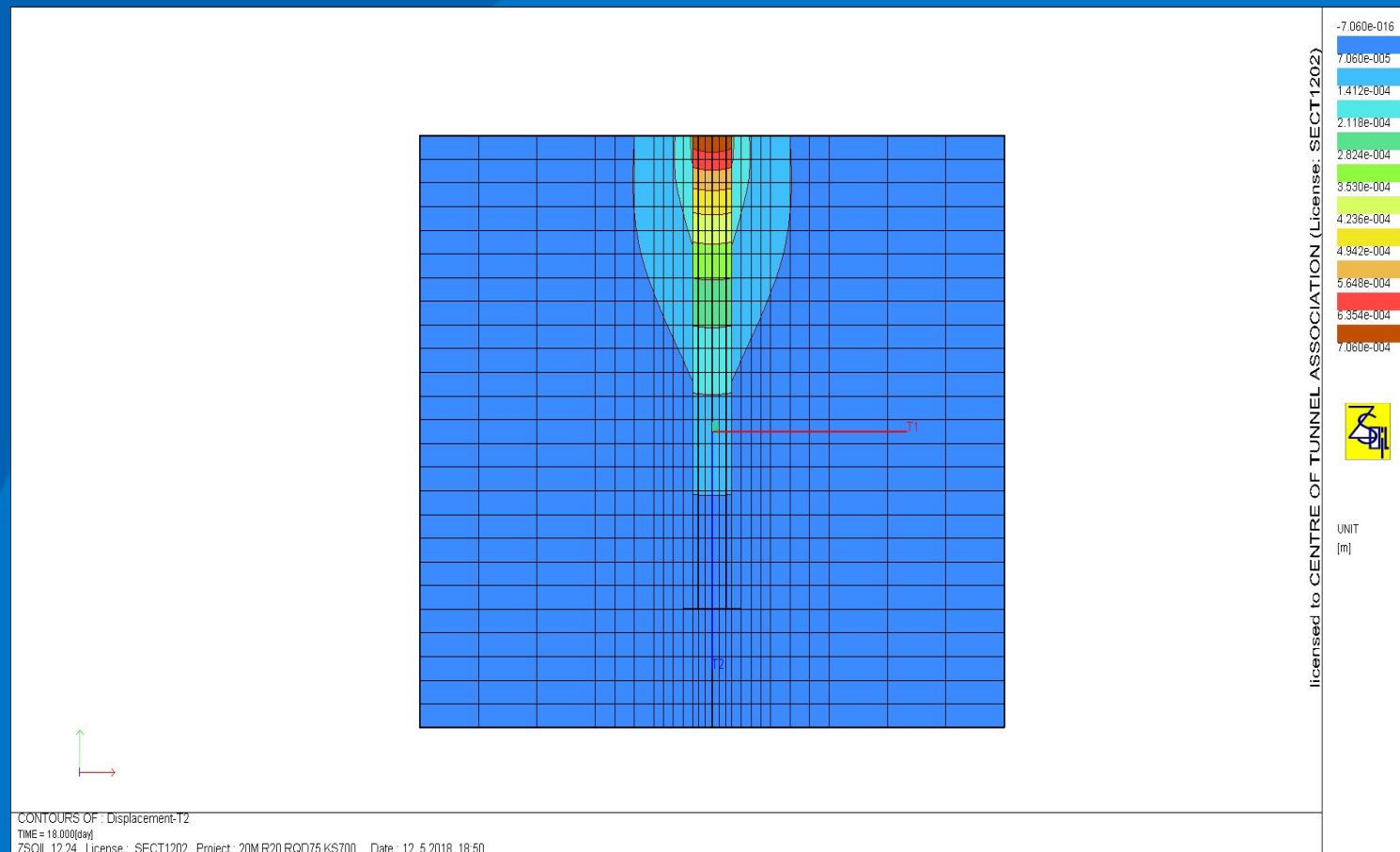
Характеристика	$E_r=50\ 000$ МПа		$E_r=5\ 000$ МПа	
	$RQD=25\%$	$RQD=75\%$	$RQD=25\%$	$RQD=75\%$
Характеристики контакта «свая – массив»				
$C_{k,c}$ МПа	0,25	0,3	0,15	0,18
$\phi_k$ , градусы	38	39	36	37

# Численные расчеты

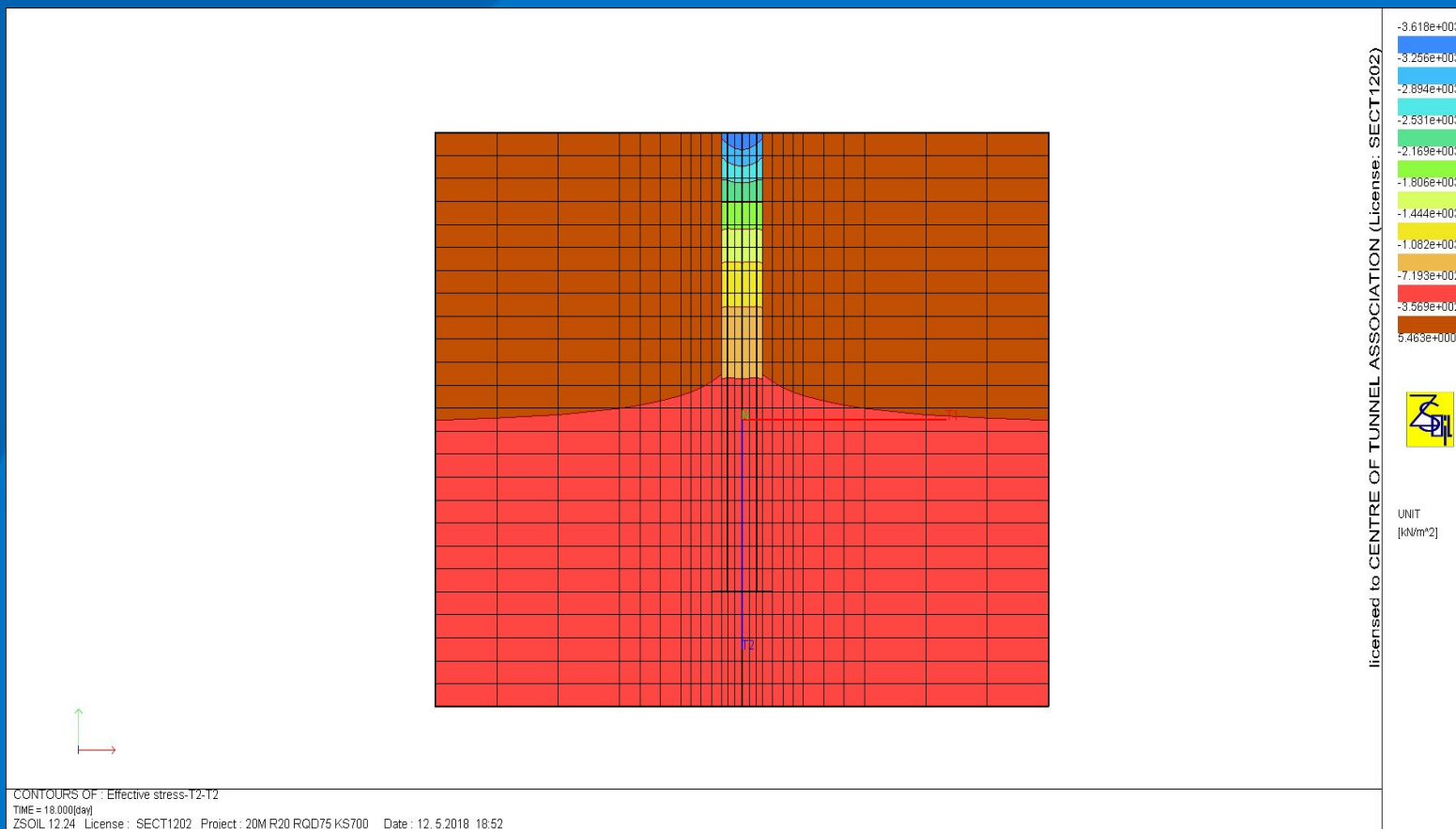
- С помощью расчетного комплекса «Z\_Soil» просчитаны частные задачи с использованием выбранных факторов, на верхнем и нижнем уровне варьирования
- Проанализированы изополя осадок и сжимающих напряжений
- В каждой задаче найдены оптимальные величины длины сваи

Пример полученных результатов расчётов (опыт 8):  
RQD=75%,  $K_s=700000$  кН/м<sup>3</sup>, R=20 Мпа

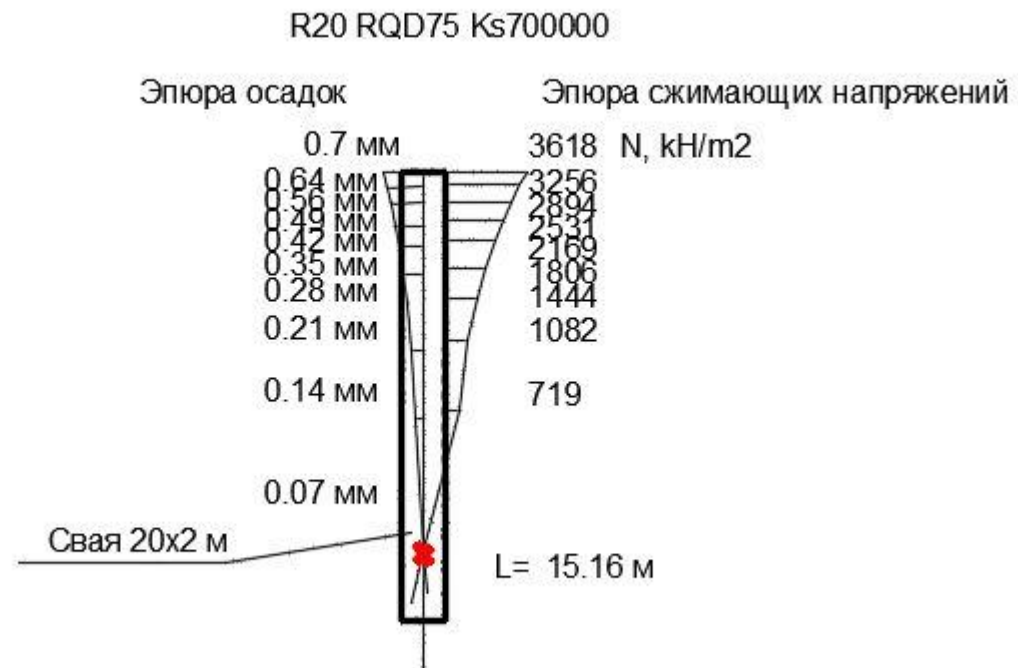
## Изополя осадок



# Изополя сжимающих напряжений



# Эпюры осадок и сжимающих напряжений (опыт 8)



## Обобщение результатов

- С помощью метода планирования эксперимента составлена матрица планирования эксперимента и математическая зависимость функции отклика от выбранных главных факторов в пределах их варьирования - уравнение регрессии с выходным параметром отношение длины сваи к диаметру



# Уравнение регрессии

$$\begin{aligned} L/D = & 11,26 - 1,26 \cdot \left( \frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) + (-2,33) \cdot \left( \frac{RQD - 50}{25} \right) + (-1,64) \cdot \left( \frac{Ks - 375000}{325000} \right) \\ & + (-0,48) \cdot \left( \frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \cdot \left( \frac{RQD - 50}{25} \right) + (-0,018) \cdot \left( \frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \cdot \left( \frac{Ks - 375000}{325000} \right) \\ & + (-0,08) \cdot \left( \frac{RQD - 50}{25} \right) \cdot \left( \frac{Ks - 375000}{325000} \right) + (-0,4) \cdot \left( \frac{E_b - 2,75}{E_r} \right) \cdot \left( \frac{RQD - 50}{25} \right) \cdot \left( \frac{Ks - 375000}{325000} \right) \end{aligned}$$

- Используя данные математические зависимости можно приблизительно найти численное значение выбранных откликов не прибегая к расчету МКЭ, в зависимости от физико-механических свойств скального массива
- Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что с увеличением прочности скального массива и увеличением касательной жесткости требуемая длина сваи значительно уменьшается, исходя из этого, главным образом данный метод способствует достижению целесообразности и экономичности работ по устройству данных свай.



# Выводы

- В результате численного моделирования и произведенных расчетов получены изополя осадок и сжимающих напряжений, благодаря которым построены эпюры и получена оптимальная длина сваи.
- На основании анализа НДС системы «свая – скальный массив» установлены факторы варьирования, а именно – соотношение модуля деформации сваи и скальной отдельности ( $E_b/E_r$ ), трещиноватость массива ( $RQD$ ) и касательная жесткость ( $K_s$ ). Построена матрица планирования эксперимента с функцией отклика ( $L/D$ ).
- Получено уравнение регрессии, которое можно использовать для определения выходного параметра при варьировании факторов в заданных пределах. Цель работы успешно реализована. Описанный метод может использоваться на практике для решения данного вида задач.

