



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
Механики Сплошных Сред  
Уральского отделения Российской академии наук

# ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ЧАСТОТ СВАИ ПРИ ОТТАИВАНИИ МАССИВА ОКРУЖАЮЩЕГО ГРУНТА

Гусев Георгий Николаевич,

заведующий лабораторией интеллектуального мониторинга ИМСС УрО РАН, г. Пермь, к.т.н.

Цветков Роман Валерьевич,

научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга ИМСС УрО РАН, г. Пермь, к.т.н.



## Проблематика и актуальность

При эксплуатации зданий и инженерных сооружений наиболее важным фактором является обеспечение их механической безопасности, в том числе на северных территориях и в условиях мерзлоты. Особенностью их эксплуатации является периодическое сезонное замерзание и оттаивание грунтов, которое может вызывать искажение фундаментов и таким образом, негативно повлиять конструкцию.

Актуальными задачами мониторинг напряженно-деформированного состояния конструкций в процессе эксплуатации, а также обработки, анализа результатов и прогноза с помощью математических моделей.

Работа посвящена исследованию динамических характеристик одиночной сваи, являющейся базовым элементом, осуществляющим деформационное взаимодействие конструкции с грунтом, в условиях сезонного изменения температур и оттаивания грунта.



## План доклада

- Проведение экспериментов на заглубленной в мерзлый грунт свае по определению ее динамических параметров (собственные частоты).
- Непрерывный мониторинг вибрационного фона системы грунт-свая-груз, при сезонном оттаивании грунта.
- Конечно-элементное моделирование: модальный анализ системы грунт-свая-груз.

## Установка сваи в грунт

В зимних условиях свая была установлена в промерзший насыпной грунт на глубину около 1 м. Грунт в зоне расположения сваи был очищен от снега. Как показало предварительное бурение грунт промерз на глубины до 0.5 м. К оголовку сваи была прикреплен груз - стальной металлический цилиндр.

Параметры сваи: стальная труба,  $d=57$  мм,  $L = 1.2$  м, масса  $\sim 6.5$  кг, заглубление  $\sim 0.95$  м

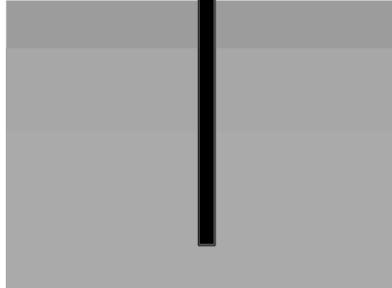
Параметры груза: стальной прут,  $d=0.255$  м, масса  $\sim 42$  кг



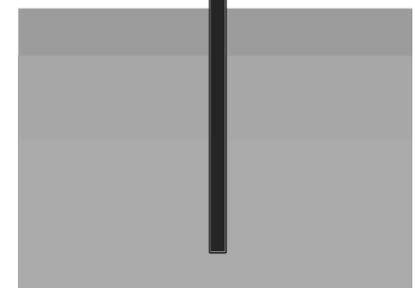
1



2



3



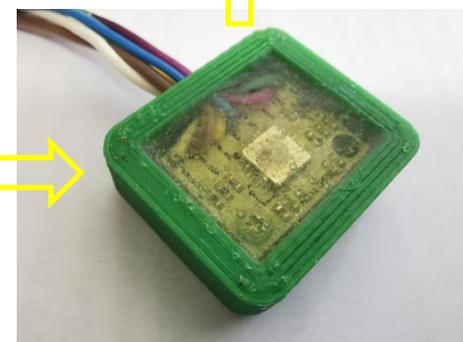
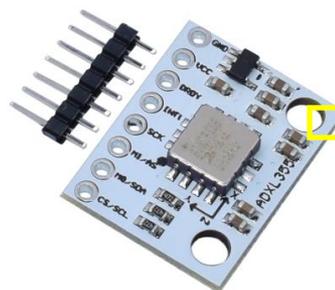
## Экспериментальное оборудование

- Трехкомпонентный акселерометр ADXL355;
- Регистратор на микро-ЭВМ Raspberry Pi;
- Компьютер - обработка данных.



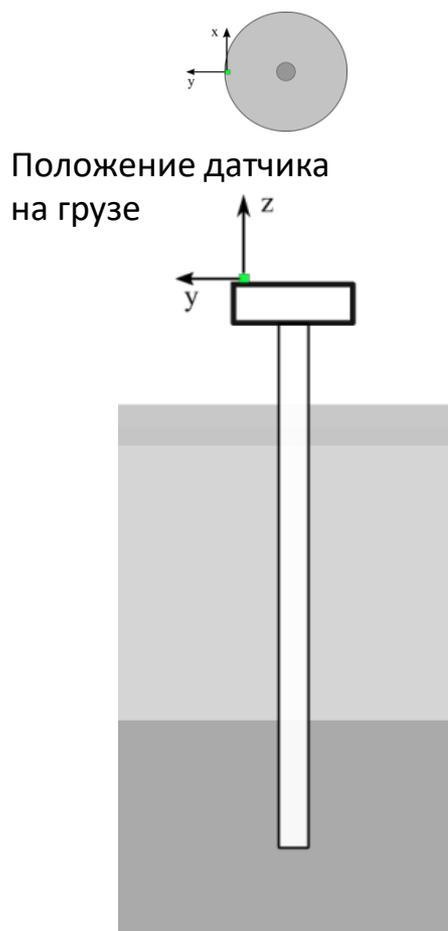
3 осевой цифровой акселерометр ADXL355 (в герметичном корпусе) :

- 20 бит (мл. бит  $3.9 \mu g$ );
- Диапазон амплитуд  $\pm 2g$ ;
- Диапазон частот от 0 до 1КГц.

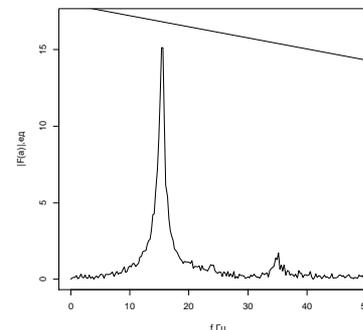
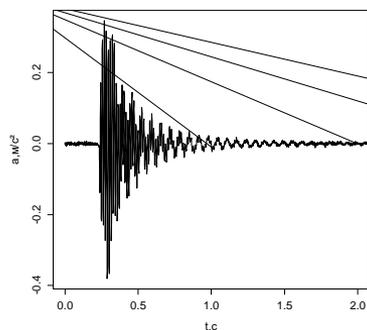


# Определение собственных частот от воздействия

После установки сваи в холодный период был проведен эксперимент по выявлению собственных частот с помощью внешних воздействий на сваю с грузом. Температура воздуха и грунта составляла  $-2^{\circ}\text{C}$ .



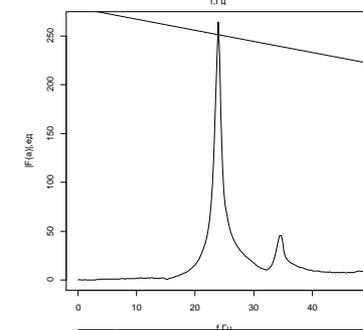
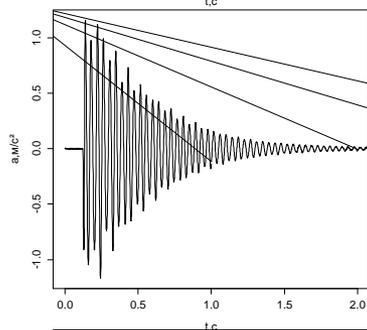
X:



Частоты

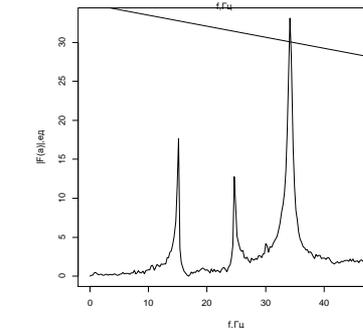
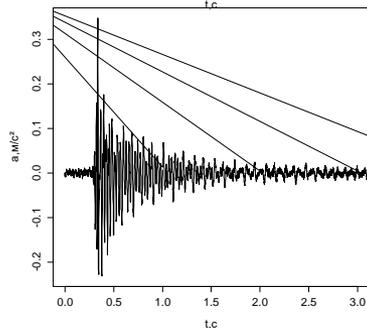
~15 Гц

Y:



~24 Гц

Z:



~15, 24, 33 Гц

Отклики на воздействия

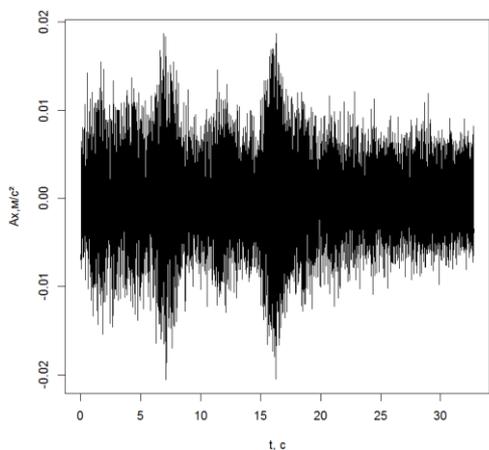
Фурье-спектры



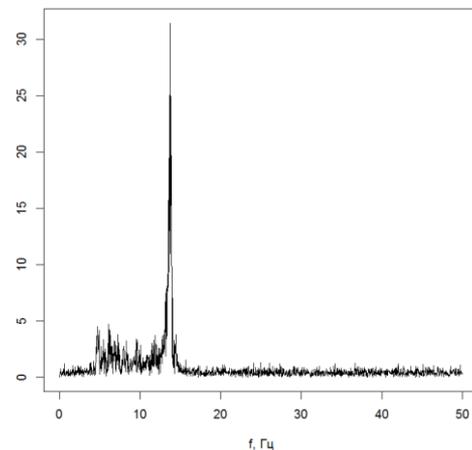
# Измерение фоновых вибраций за период естественного оттаивания грунта

Организованы мониторинговые измерения фоновых вибраций, вызываемых естественными ветровыми или вибрационными процессами. Измерения производились в период времени, соответствующему сезонному оттаиванию грунта (март-апрель).

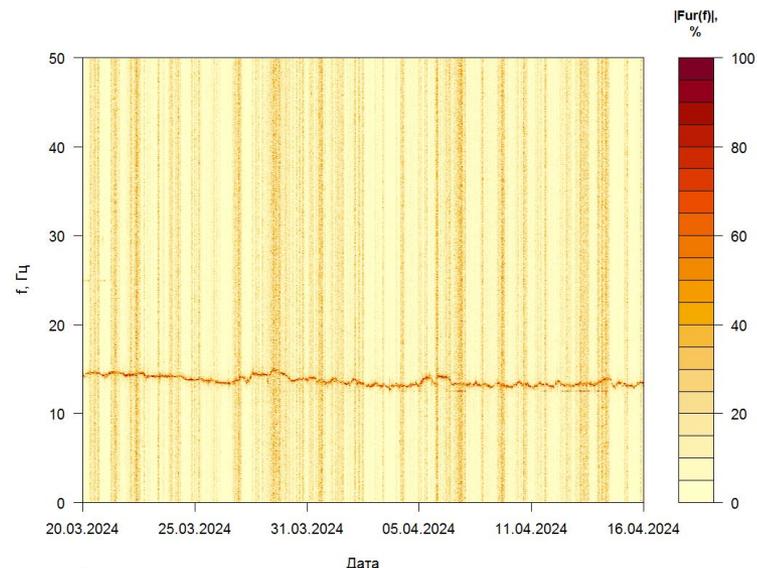
Анализ спектра фоновых вибраций показал, что наблюдаются максимумы на тех же частотах



Сигнал X компоненты  
вибрации



Спектр

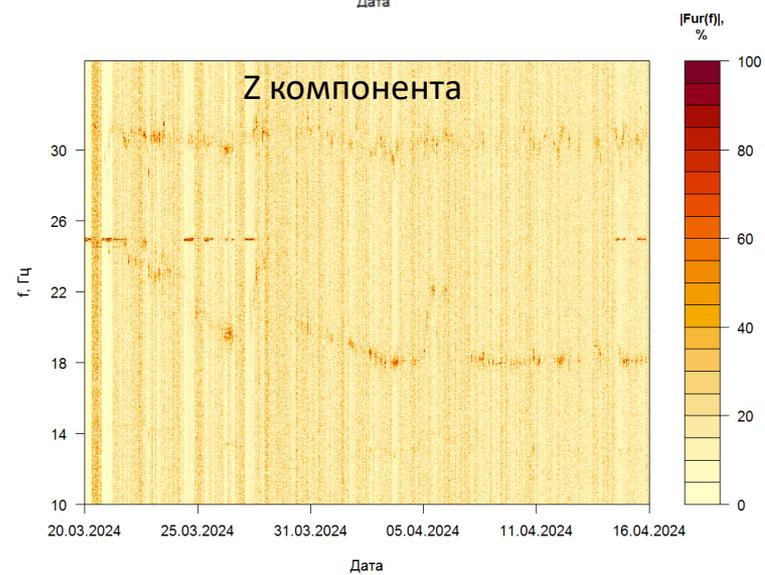
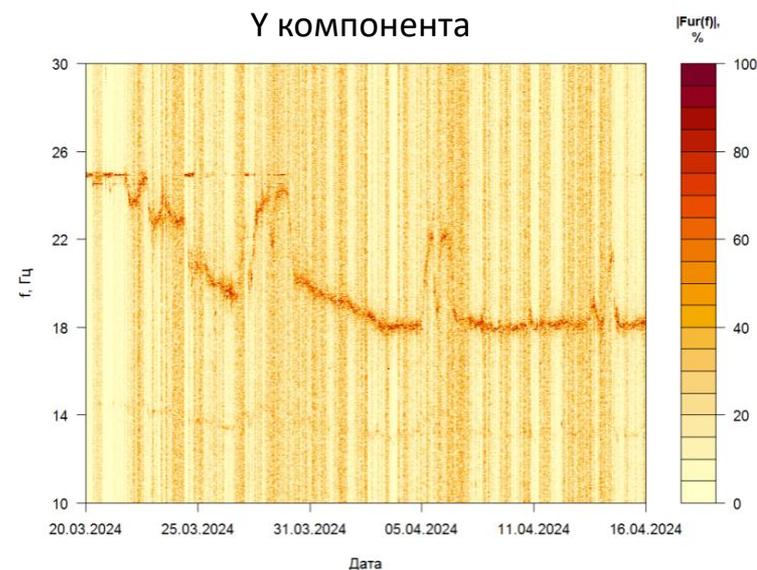
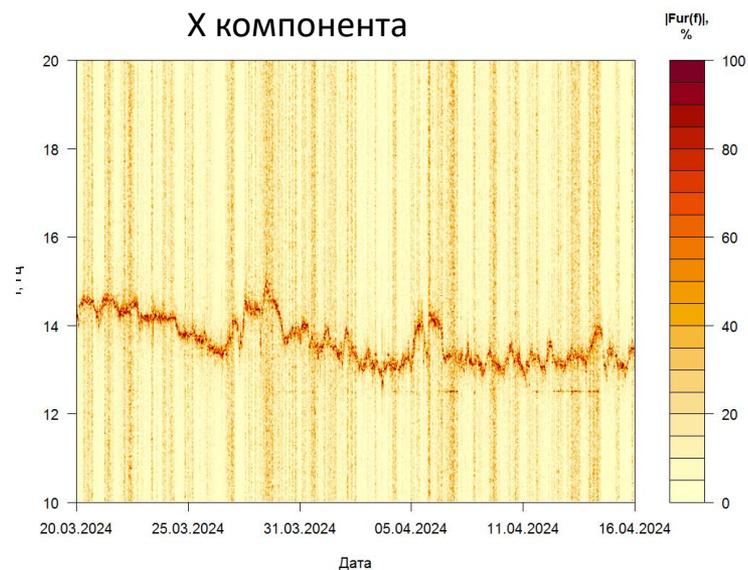


Тоновая развертка спектра во времени

Для анализа изменений частот построены тоновые изображения Фурье-спектров. Каждая вертикальная полоса соответствует Фурье-спектру на определенное время и дату, где наиболее темные цвета показывают интенсивность сигнала на данной частоте. Для наглядности нормировка выполнена по максимальному значению каждого Фурье-спектра, соответствующему 100%



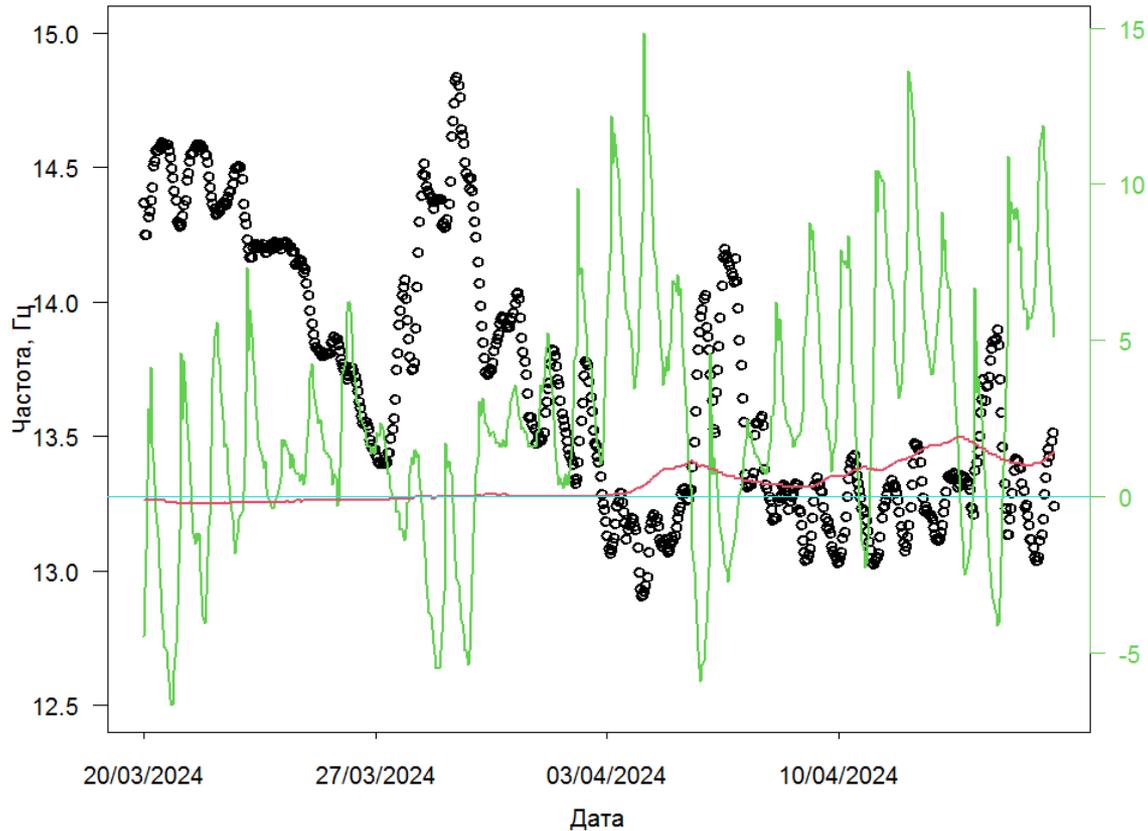
# Результаты эксперимента по мониторингу фона



Наблюдается зависимость между изменением спектра частот со временем, особенно заметная по направлению  $x$  и  $y$ . Для удобства выделим доминирующие частоты, представленные на следующих слайдах



## Доминирующие частоты по направлению x

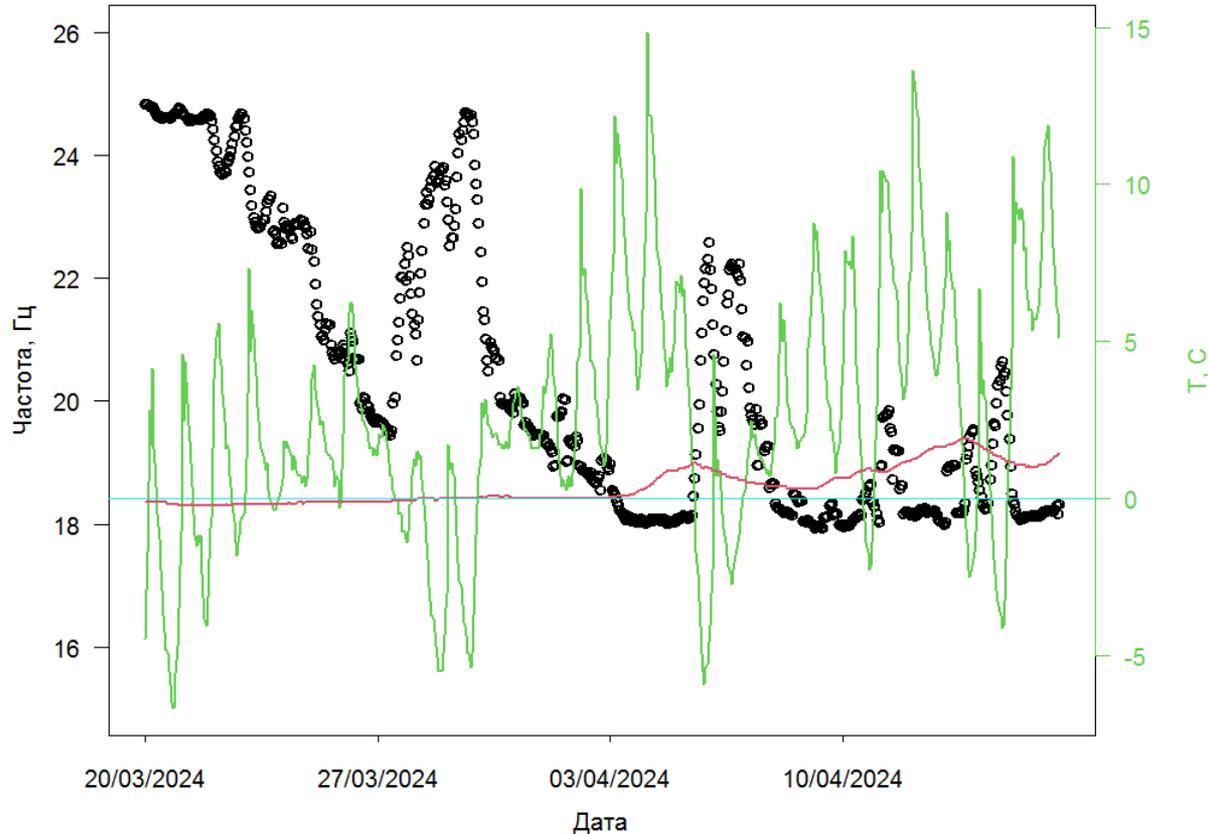


Черные кружки – эволюция  
собственной частоты  
T (Зеленый) – температура груза  
T (Красный) – температура в свае  
на глубине 30 см

При оттаивании грунта наблюдается снижение величины частоты системы «грунт-свая-груз» на 10-15% в направлении оси x.



## Доминирующие частоты по направлению $y$



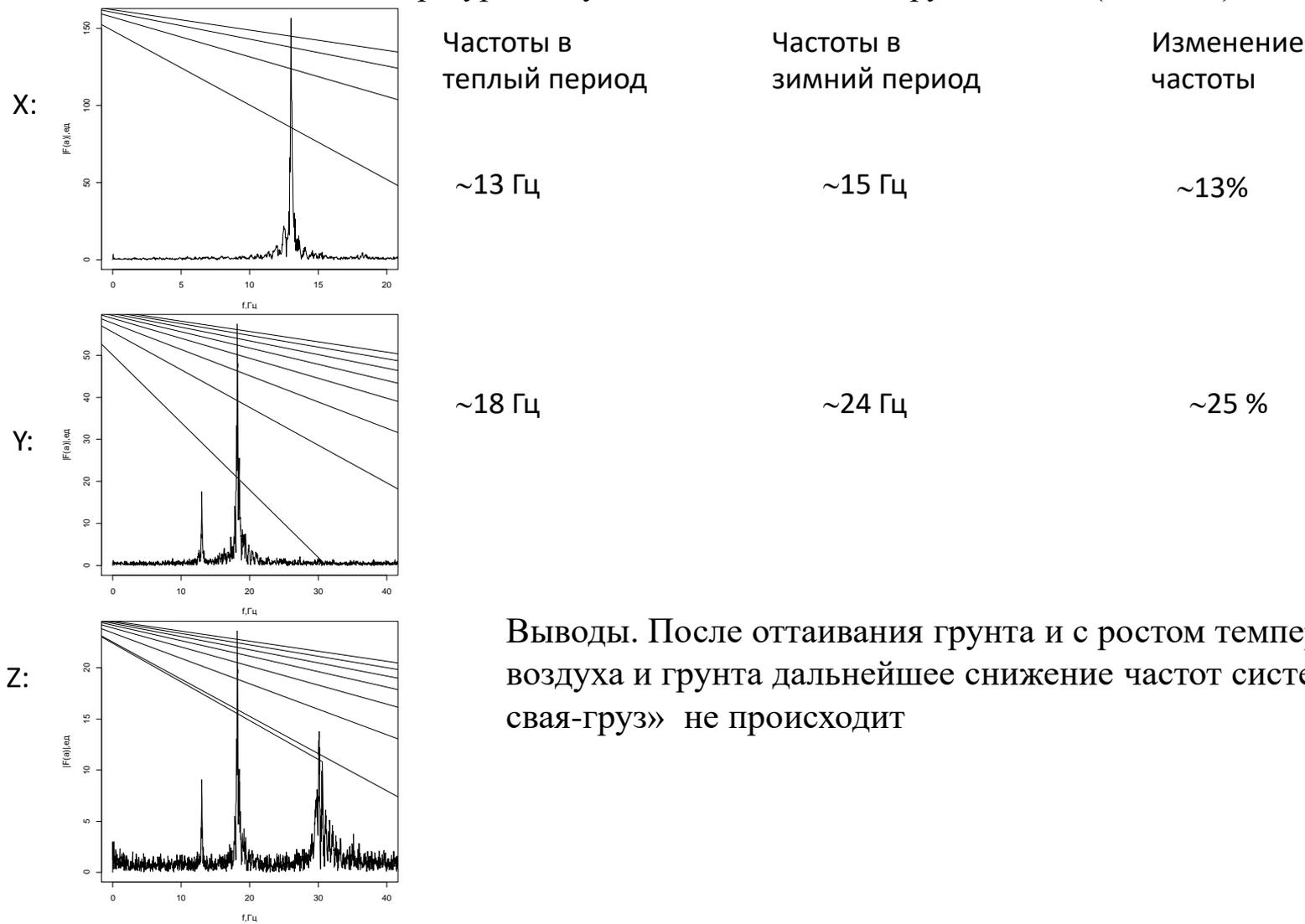
Черные кружки –  
эволюция собственной  
частоты  
Т (Зеленый) –  
температура груза  
Т (Красный) –  
температура в свае на  
глубине 30 см

При оттаивании грунта наблюдается снижение величины частоты системы «грунт-свая-груз» на 20-25% в направлении оси  $y$ . В период ночных заморозков заметно кратковременное увеличение частот.



## Проверка собственных частот после оттаивания

По завершению непрерывных наблюдений снова были оценены собственные частоты с помощью внешних воздействий. Температура воздуха составляла +15С, грунта +4.5С (28.04.24).



Выводы. После оттаивания грунта и с ростом температуры воздуха и грунта дальнейшее снижение частот системы «грунт-свая-груз» не происходит



# Модальный анализ. Определение собственных частот

Общее уравнение движения в матричном виде:

$$[M] \{u''\} + [C] \{u'\} + [K] \{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

Для свободных незатухающих колебаний:

При  $\{F(t)\} = \{0\}$  и  $[C] = [0]$

$$[M] \{u''\} + [K] \{u\} = \{0\} \quad (2)$$

Для линейной системы свободные колебания ищутся в виде:

$$\{u\} = \{u_0\} \exp(i\omega t) \quad (3)$$

$$(-\omega^2 [M] + [K]) \{u_0\} = \{0\}. \quad (4)$$

Необходимое условие для существования решения,

$$[K] - \lambda [M] = 0, \quad (5)$$

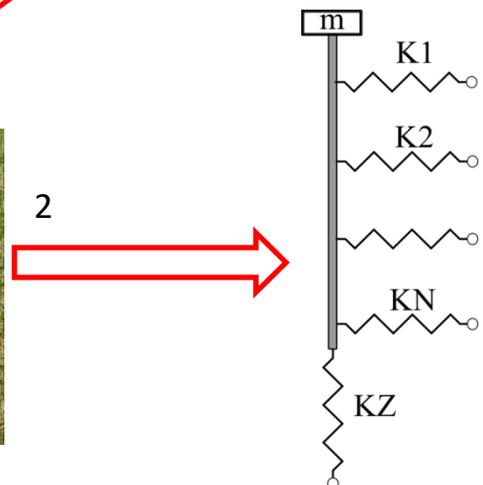
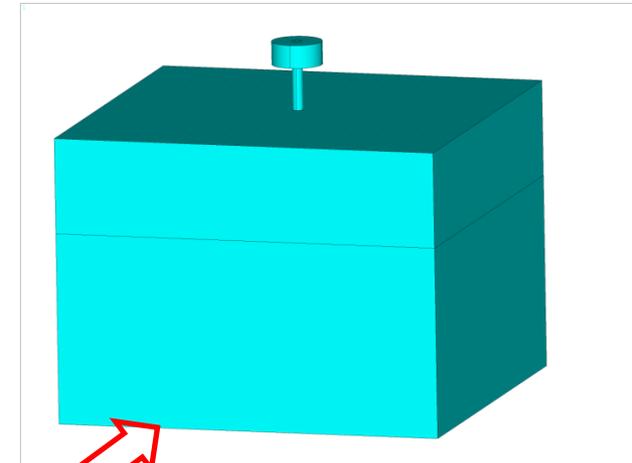
где  $\lambda = \omega^2$

Численное решение выполнено с помощью конечно-элементного пакета Ansys.

# Моделирование взаимодействия сваи с грунтом

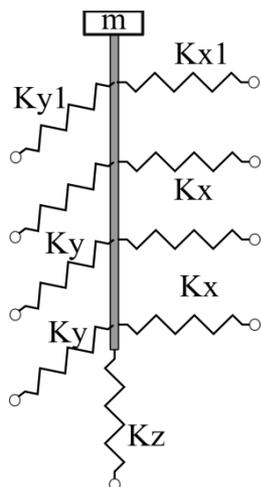
Два подхода к моделированию взаимодействия сваи с грунтом:

1. Континуальный, в котором грунт представляется упругим изотропным телом. Этот подход позволяет получить различные собственные формы колебаний: изгибные, крутильные и т.д. Однако контакт сваи с грунтом в реальности не тривиален.
2. Упрощенный, в котором взаимодействие с грунтом представляется в виде эффективных жесткостных элементов (пружин). Не позволяет получить все формы колебаний, однако можно смоделировать основные сценарии работы сваи по характерным направлениям.





## Модальный анализ по упрощенной модели грунта



- Свая моделируется в балочном приближении с эквивалентным сечением.
- взаимодействие сваи с грунтом заменено упругими элементами;
- по осям  $X$  и  $Y$  использованы элементы с разной жесткостью ( $k_x$ ,  $k_y$ );
- по высоте погруженной части сваи взято по 4 элемента;
- верхние элементы имеют отличную от других жесткость ( $k_{x1}$ ,  $k_{y1}$ ), моделируя замерзший и незамерзший грунт

Таблица . Результаты моделирования

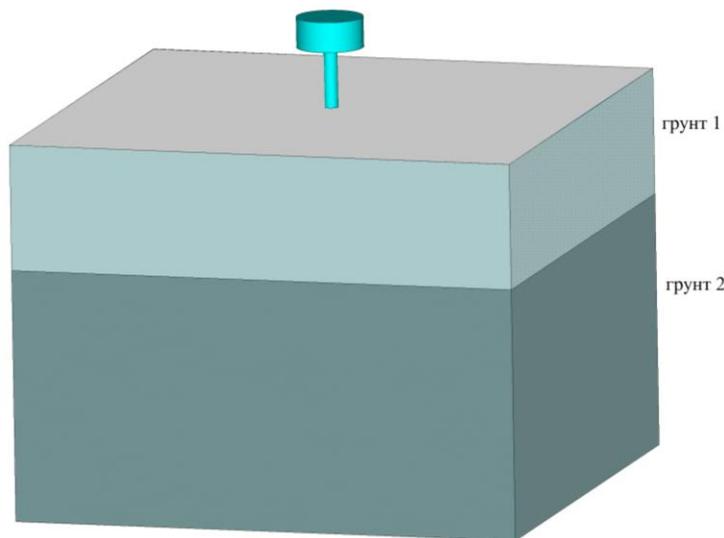
$k_x$ , кН/м	$k_y$ , кН/м	$k_{x1}$ , кН/м	$k_{y1}$ , кН/м	$f_x$ расч, Гц	$f_x$ эксп, Гц	$f_y$ расч, Гц	$f_y$ эксп, Гц	
650	1750	650	1750	12,9	13,1	18,1	18,1	Грунт
650	1750	1050	5250	15,1	15,0	23,6	24,0	Замерзший грунт
650	1750	650-1050	180-5250	13-15	13-15	18-24	18-24	Грунт в процессе оттаивания

Выводы.

Показано влияние упругих свойств жесткостных элементов, моделирующих связь грунта со свайей, на две собственные частоты данной системы



# Модальный анализ. Континуальный подход



Грунт, свая и груз представляются упругими изотропными телами. Предполагается условия полного контакта между поверхностью сваи и грунта. По данным инженерно-геологических изысканий в летний период модуль упругости грунта (с которым контактирует свая) составляет порядка 3-4 МПа.

Условные обозначения:

Грунт2 расположен ниже глубины промерзания, не изменяет сезонно механические свойства.

Грунт1, расположен рядом с поверхностью, может менять свои свойства при промерзании, то есть модуль упругости  $E$  может возрастать. Численно получены оценки значения частот, соответствующие изгибной форме колебаний для сваи.

Таблица 2. Свойства материалов

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$E$ , МПа	$\nu$
Сталь (свая и груз)	7800	2E+5	0.22
Грунт 1	-	3-4	0.3
Грунт 2	-	3-4	0.3

Таблица 3. Результаты моделирования

Грунт1 $E$ , МПа	Грунт2 $E$ , МПа	$f$ расчет, Гц	$f$ эксп, Гц	
3.5	3.5	13,1	13,1	грунт
6	3.5	15,0	15,0	Замерзший грунт
3.5-6	3.5	13-15	13-15	Грунт в процессе оттаивания

Выводы. Показано влияние изменения модуля  $E$  верхнего слоя грунта на нижнюю собственную частоту системы «свая-груз-грунт»



## Выводы

- Проведены эксперименты по исследованию динамического отклика заглубленной в грунт сваи с прикрепленной к ней массой на заданное воздействие. Они позволили установить низшие собственные частоты данной системы, которые также выявляются при естественных фоновых вибрационных воздействиях.
- Мониторинговые наблюдения за фоновыми вибрациями в системе «грунт-свая-груз» показали, что наблюдается изменение собственных частот, связанное с оттаиванием грунта. Изменение значений первых собственных частот составляет порядка 12 - 25%.
- С помощью метода конечных элементов проведена оценка изменений собственных частот данной системы при различных параметрах грунтового основания, соответствующего грунту в замороженном и незамороженном состояниях. Важно отметить, что взаимодействие грунтового основания со сваем нетривиально и требуют дальнейшего изучения.
- Данные результаты будут использованы для анализа вибрационных процессов, связанных с таянием криозолита в условиях Арктики.