

акад. РААСН, проф., д.т.н. *Белостоцкий А.М.*,
к.т.н. *Нагибович А.И.*, к.т.н. *Дмитриев Д.С.*,
Горячевский О.С., ...

**Синергия математического (численного)
моделирования, физического (экспериментального)
моделирования и "натуры" в оценке и прогнозе
механической безопасности уникальных объектов
строительства на всех этапах их жизненного цикла**

Международная научно-практическая конференция
«Обследование зданий и сооружений»

Москва, НИУ МГСУ, 23 марта 2023 года

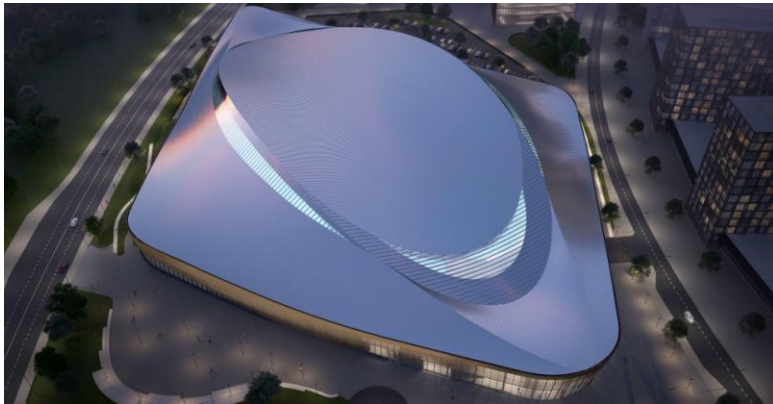
Синергия математического (численного) моделирования, физического (экспериментального) моделирования и "натуры" в оценке и прогнозе механической безопасности уникальных объектов строительства на всех этапах их жизненного цикла

План доклада, «зоны» синергии:

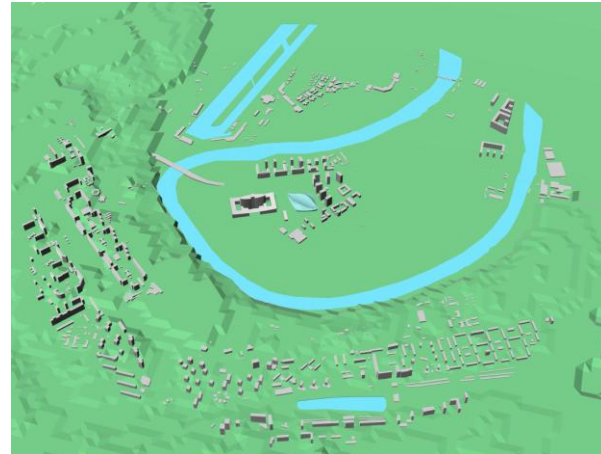
1. НТС на этапе проектирования
2. НТС на этапе строительства
3. НТС на этапе эксплуатации/реконструкции
(Математические модели в составе систем мониторинга)
4. Экспертиза причин обрушения

1. НТС на этапе проектирования

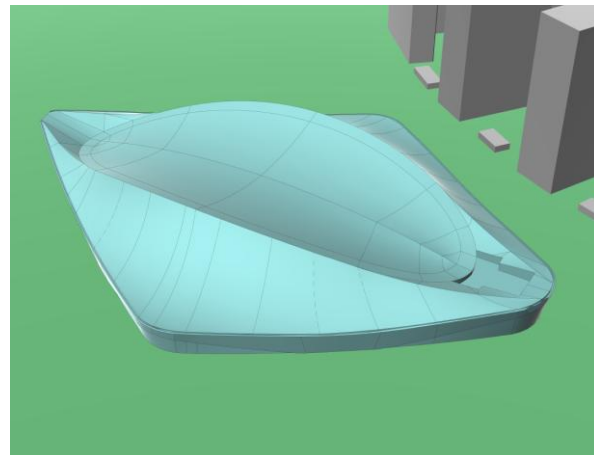
Научно-техническое сопровождение проектирования, включая комплексные аэродинамические исследования, ... для Объекта – «Серфинг-парк «Волна», (г. Москва, Мневниковская пойма, з/у № 11)»



Рендер объекта



Макет Объекта для физического моделирования

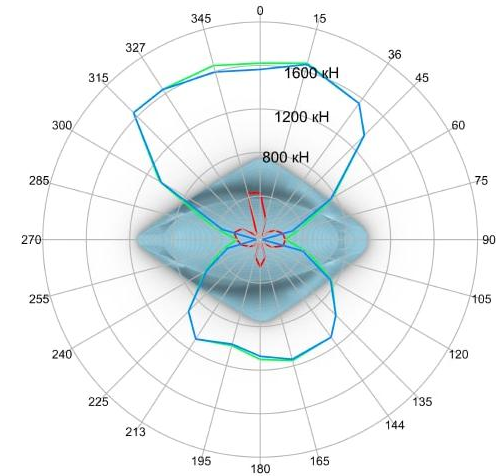
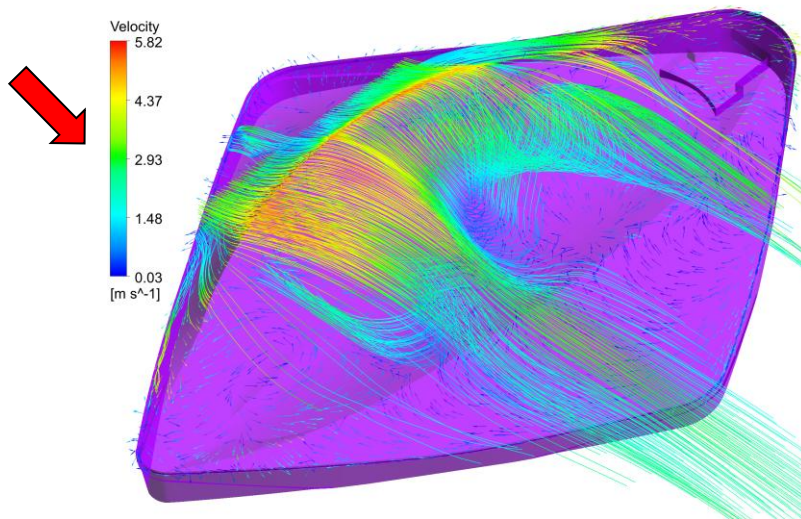


Геометрическая модель Объекта для математического моделирования

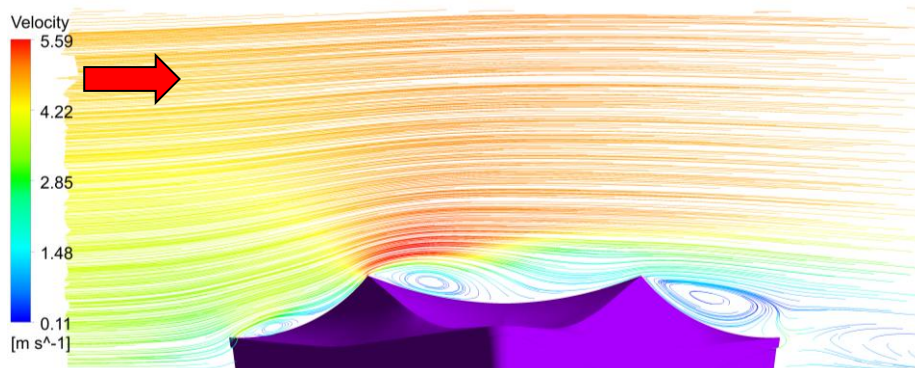
НТС на этапе проектирования



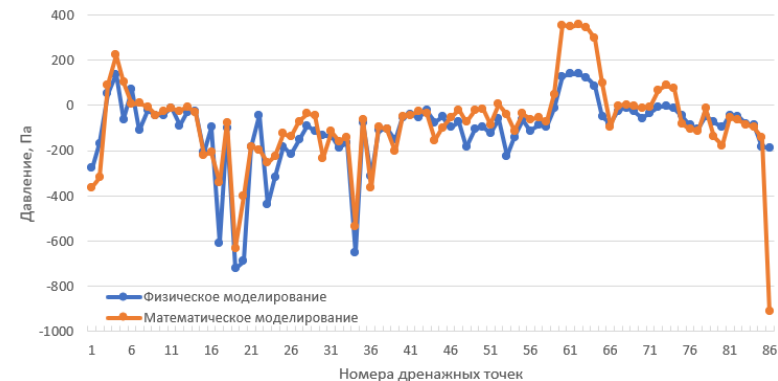
Научно-техническое сопровождение проектирования, включая комплексные аэродинамические исследования ... для Объекта – «Серфинг-парк «Волна», (г. Москва, Мневниковская пойма, з/у № 11)»



Круговая диаграмма интегральных сил



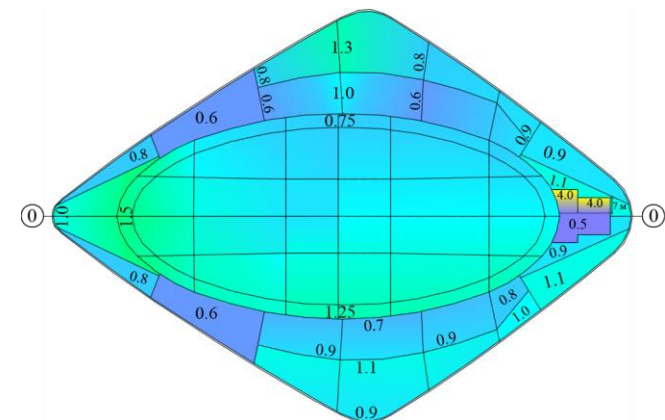
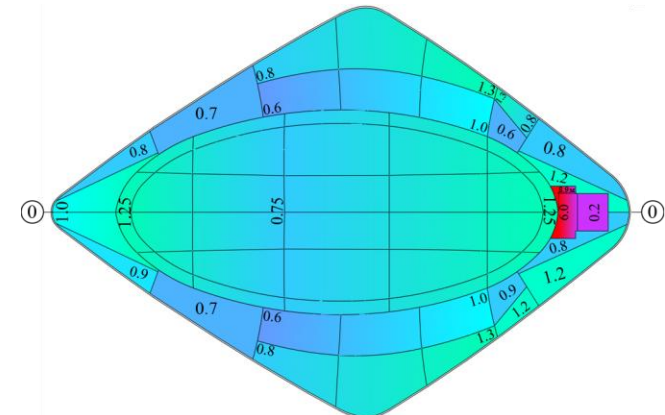
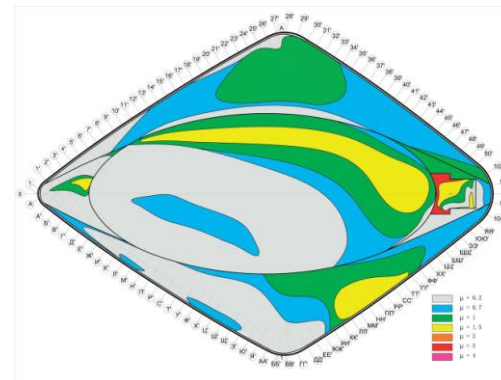
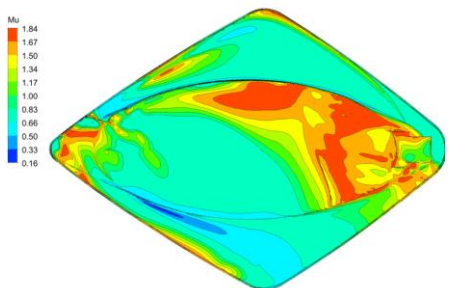
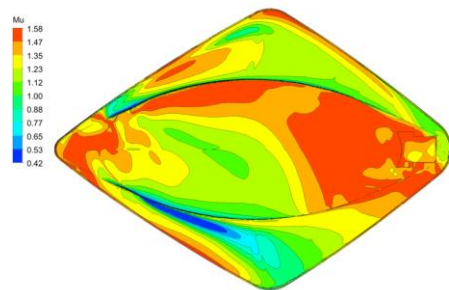
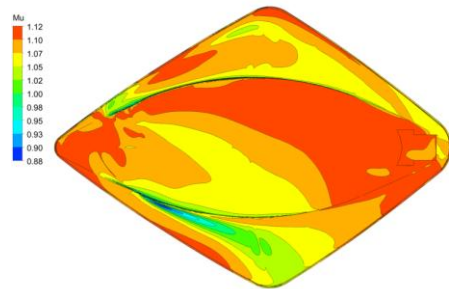
Линии тока ветра над объектом и векторное поле напряжений сдвига



Сравнение средних ветровых давлений по результатам математического и физического моделирования

1. НТС на этапе проектирования

Научно-техническое сопровождение проектирования, включая комплексные аэродинамические исследования ... для Объекта – «Серфинг-парк «Волна», (г. Москва, Мневниковская пойма, з/у № 11)»

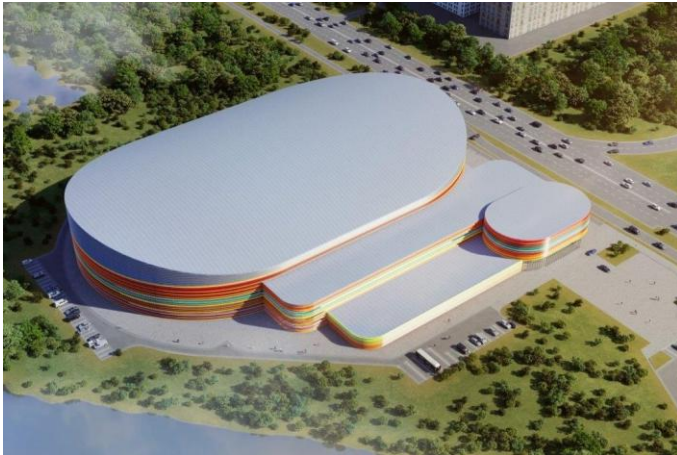


Разработанные инженерные схемы коэффициента μ снеговых нагрузок

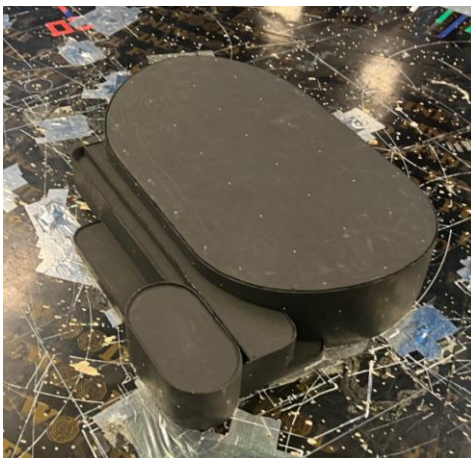
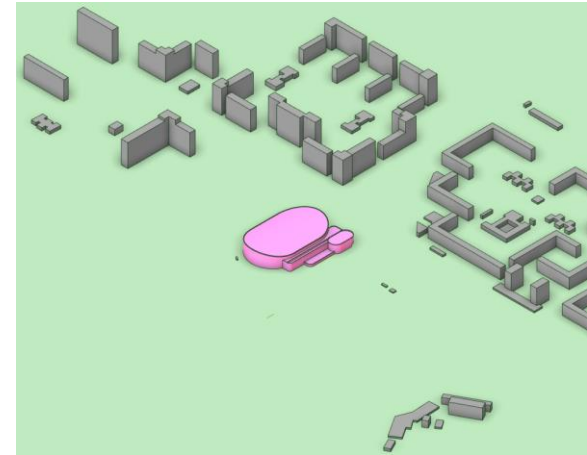
Анализ результатов математического и физического моделирования снеготенения и снегоотложения

НТС на этапе проектирования

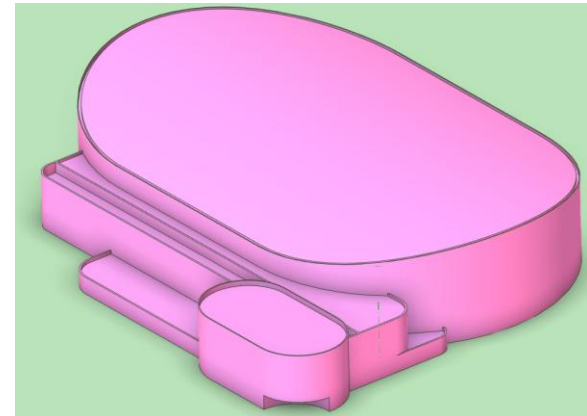
Комплексные аэродинамические исследования при проектировании объекта
«Крытый футбольный манеж по ул. Университетской Набережной Калининском районе
г. Челябинска»



Рендер объекта



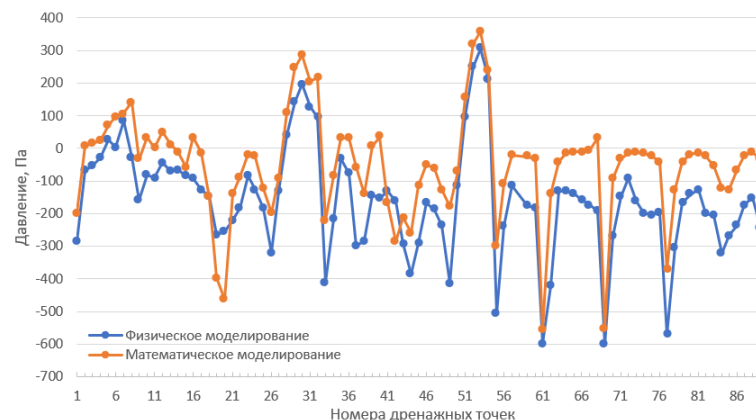
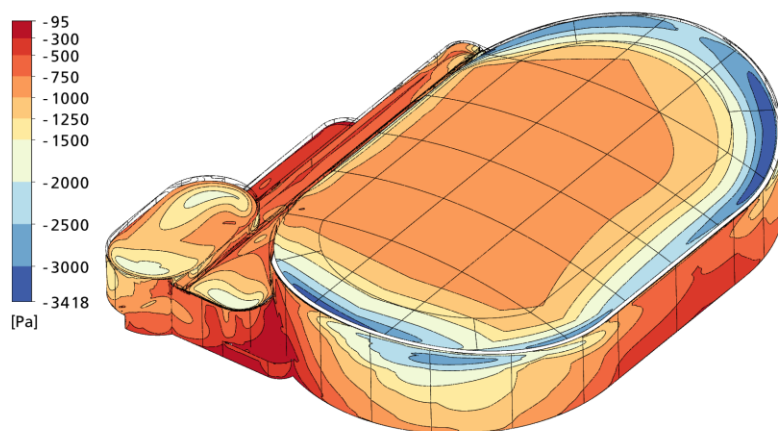
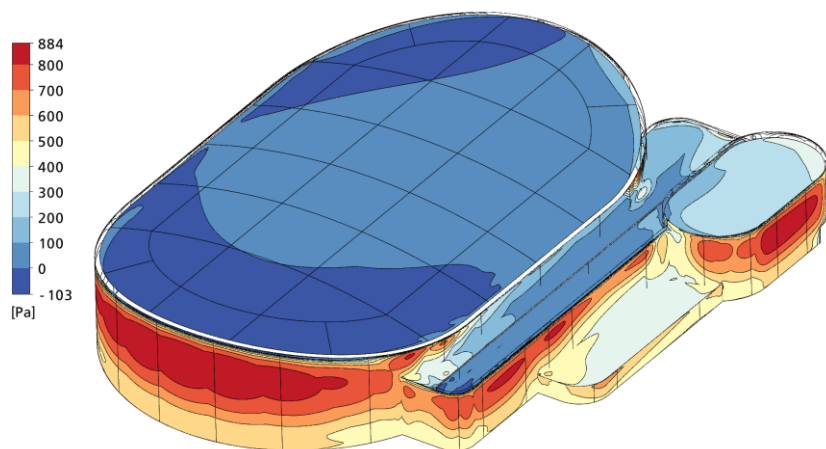
Макет Объекта для физического
моделирования



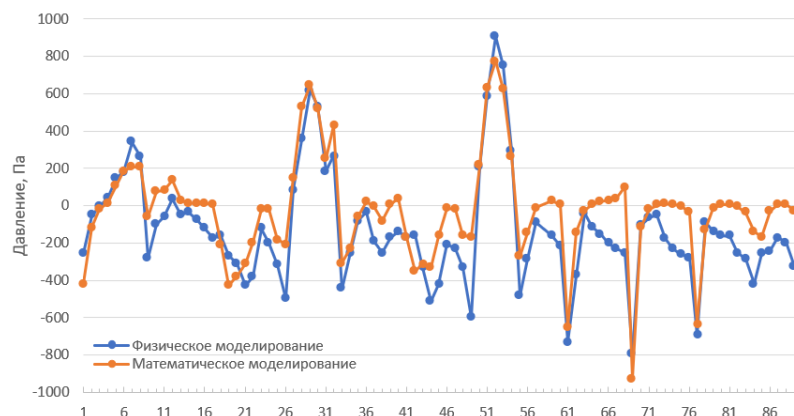
Геометрическая модель Объекта
для математического моделирования

1. НТС на этапе проектирования

Комплексные аэродинамические исследования при проектировании объекта
«Крытый футбольный манеж по ул. Университетской Набережной Калининском районе
г. Челябинска»



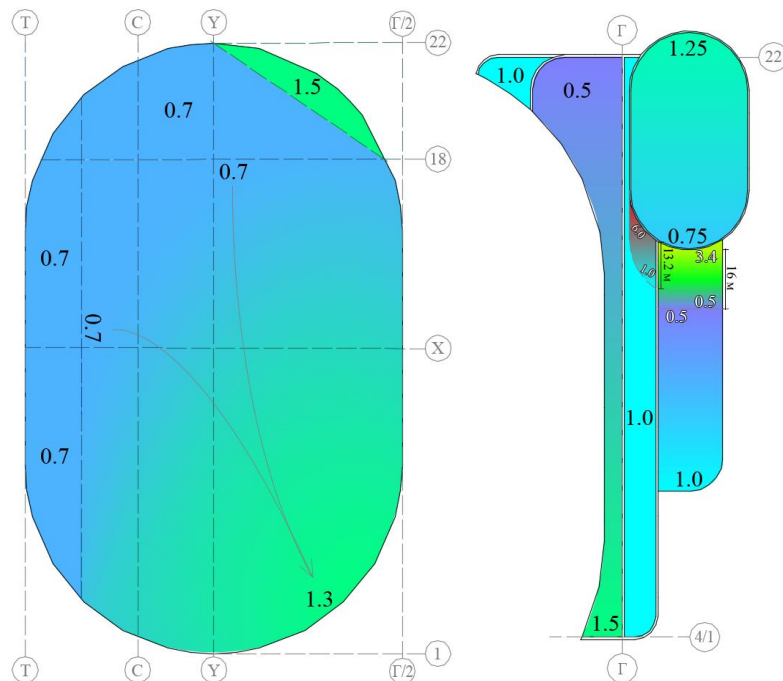
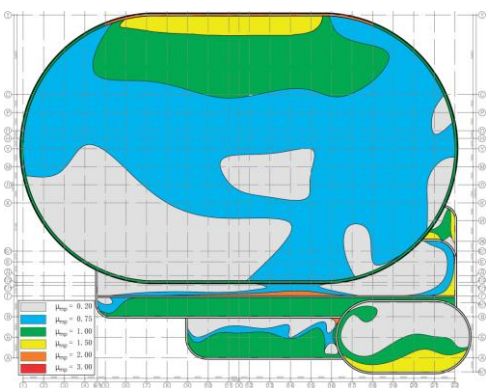
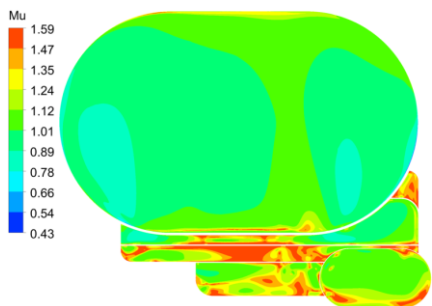
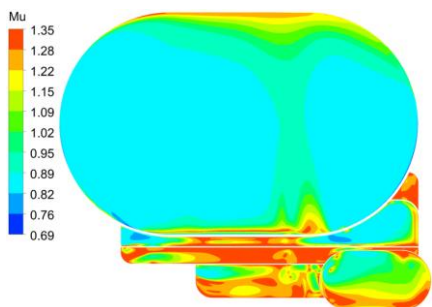
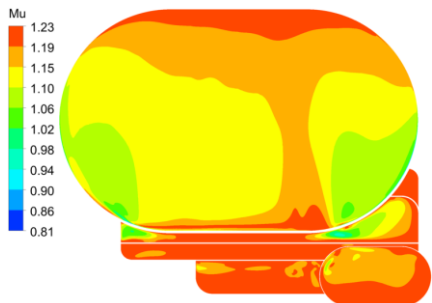
Сравнение средних ветровых давлений по результатам математического и физического моделирования



Сравнение положительных пиковых ветровых давлений по результатам математического и физического моделирования

1. НТС на этапе проектирования

Комплексные аэродинамические исследования при проектировании объекта
«Крытый футбольный манеж по ул. Университетской Набережной Калининском районе
г. Челябинска»

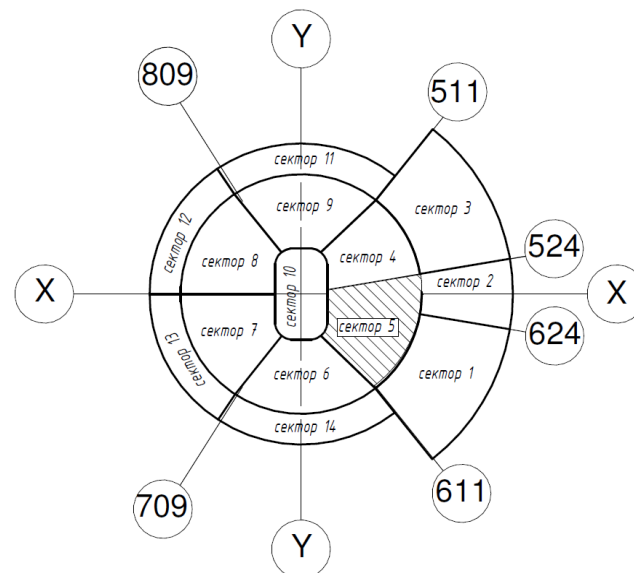
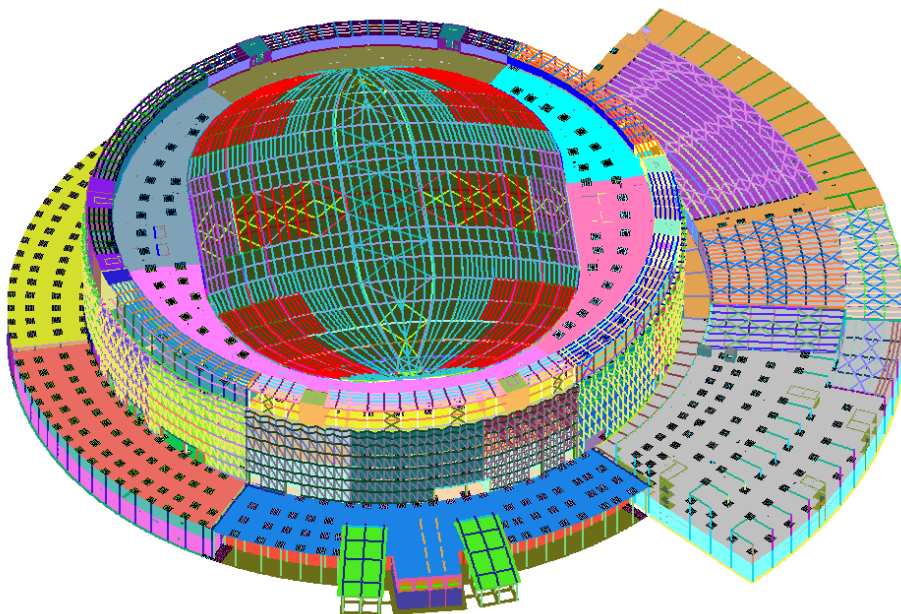


Разработанные инженерные схемы
коэффициента μ снеговых нагрузок

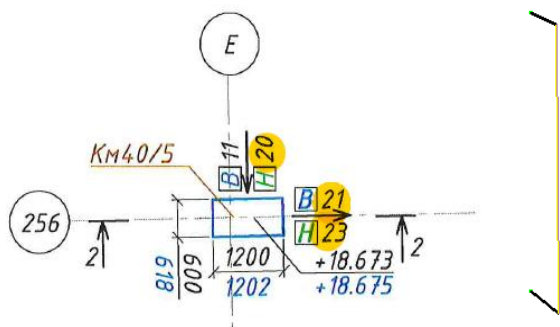
Анализ результатов математического и физического
моделирования снеготранспорта и снеготложения

1. НТС на этапе строительства

Научно-техническое сопровождение строительства в части расчетного обоснования механической безопасности несущих конструкций с учетом фактических отклонений от проекта Объекта:
«Реконструкция Петербургского спортивно-концертного комплекса, расположенного по адресу...»

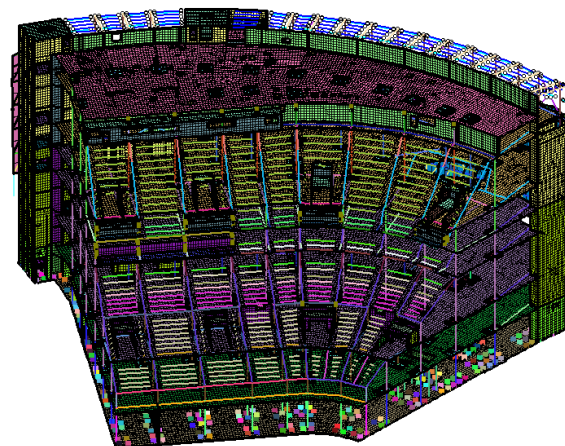


Количество учтенных отклонений колонн от проектного положения 776



Жесткие вставки стержней

в 1-м узле		во 2-м узле	
X1	0 м	X1	0 м
Y1	0.02 м	Y1	0.011 м
Z1	0.023 м	Z1	0.021 м



Сектор 5

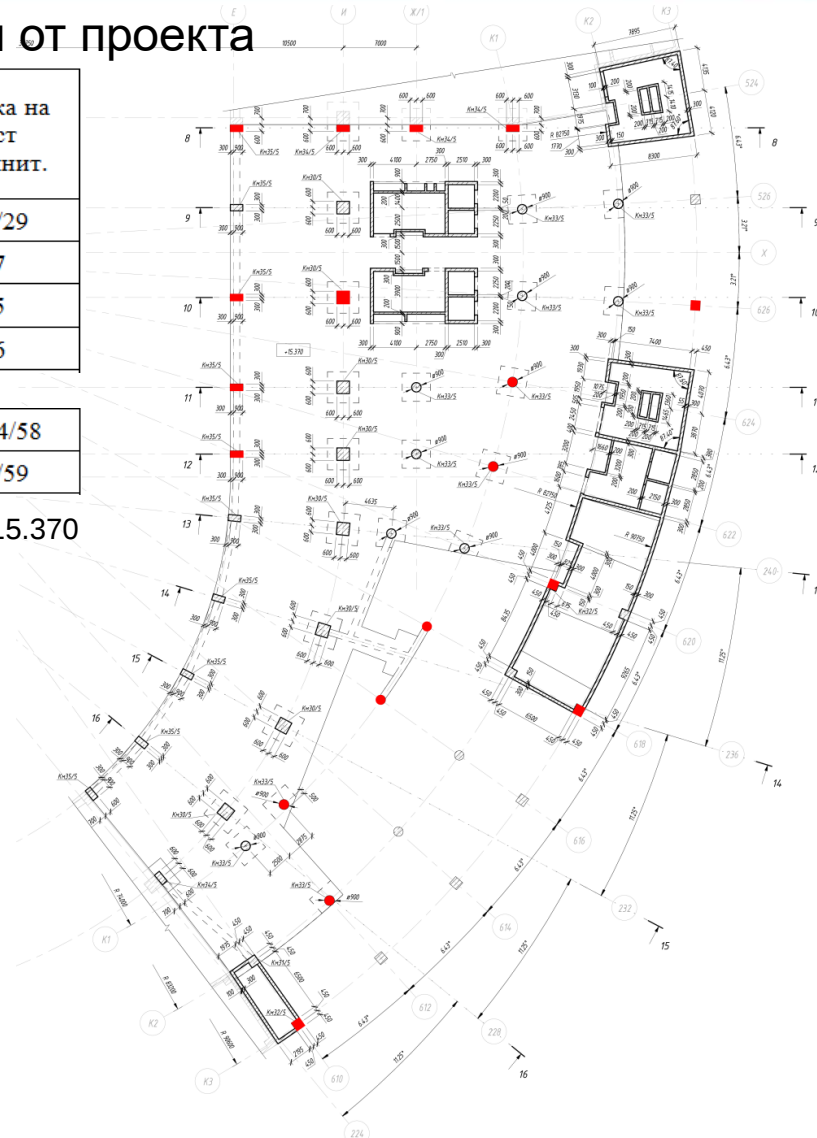
Пример учета в КЭ модели отклонений для колонны в осях E/256 на отм. 15.370

2. НТС на этапе строительства

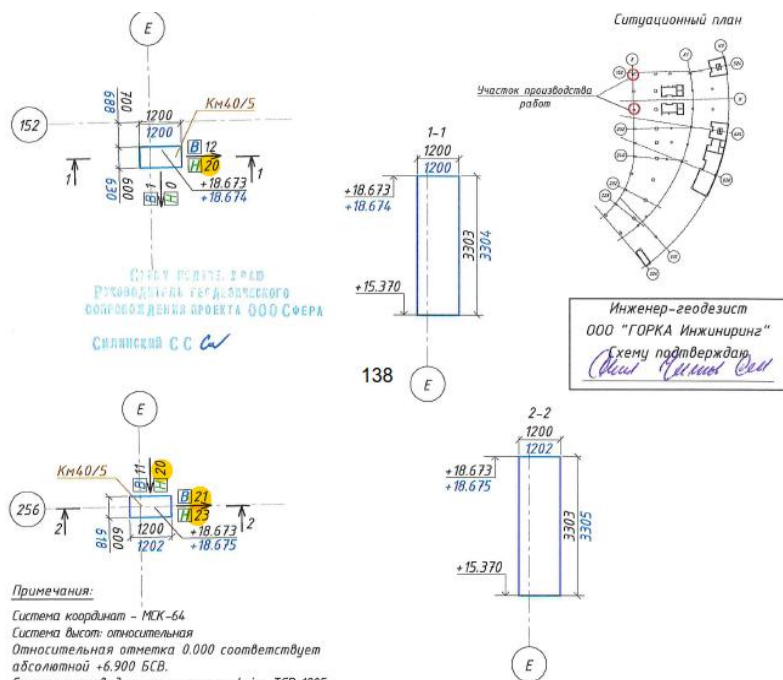


Анализ отступлений от проекта

№	Сектор	Колонна	Отметка	Сечение	Отклонение вдоль цифр осей, мм		Отклонение вдоль букв осей, мм		Ссылка на лист исполнит.
					Низ	Верх	Низ	Верх	
1	5	КЗ-620	-7,000	900×900	13	-3	10	7	787/29
2	5	Е-256	-7,000	1200×600	7	8	-1	15	67
3	5	Д-232	-7,000	400×400	-13	-12	-18	-13	65
4	5	Е-252	-7,000	1200×600	6	8	-6	-17	66
76	5	К1-618	+35,590	Ø900	6	13	20	22	302п4/58
77	5	К2-616	+35,590	Ø900	-1	4	25	24	709/59



Пример исполнительной схемы для колонн в осях Е/152, Е/256 на отм. 15.370



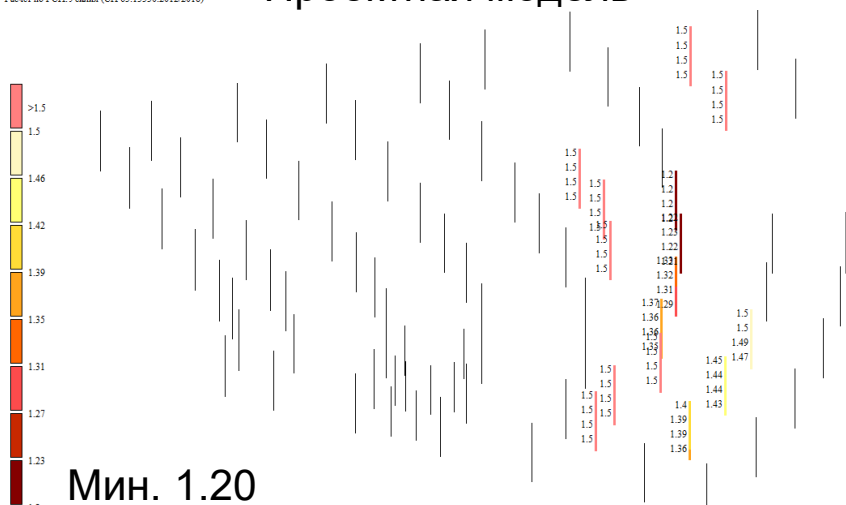
Расположение колонн на отм. +15.370, в которых выявлены превышения предельно допустимых значений по СП 70.13330.2012

2. НТС на этапе строительства



Вариант конструирования РСН
Расчет по РСН:Условия (СП 63.13330.2012/2018)

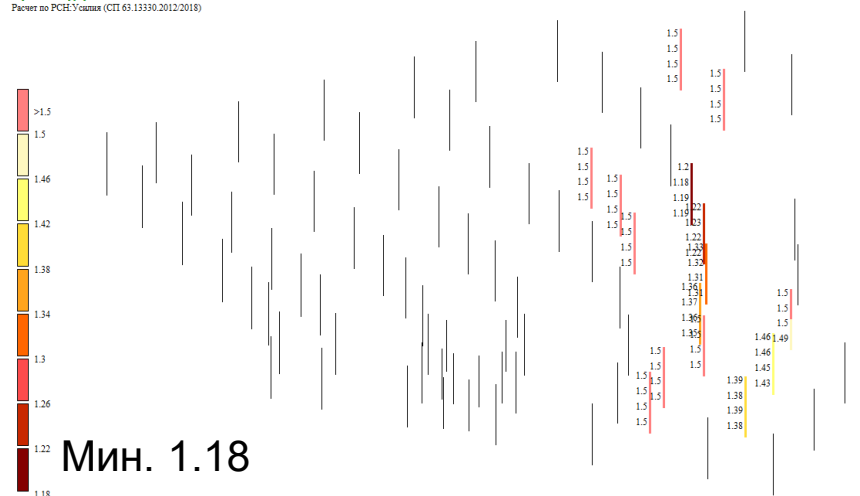
Проектная модель



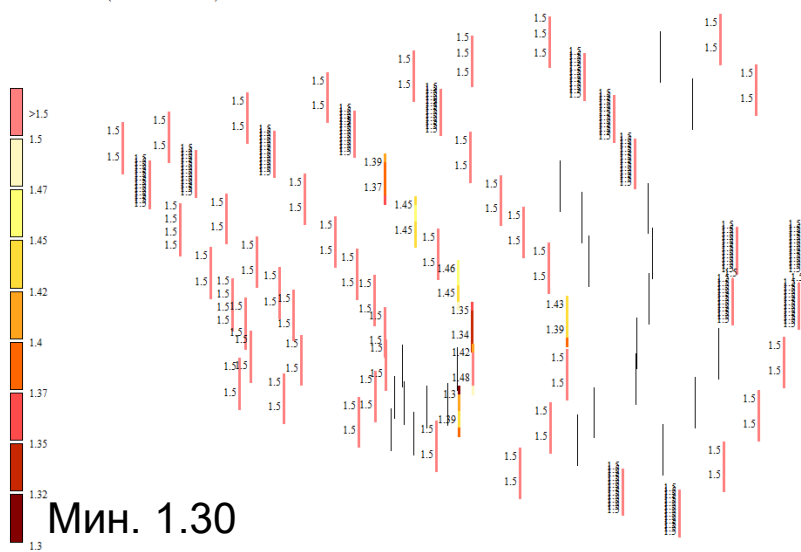
Коэф. запаса круглых колонн на отм. -7.000

Вариант конструирования РСН
Расчет по РСН:Условия (СП 63.13330.2012/2018)

Фактическая модель

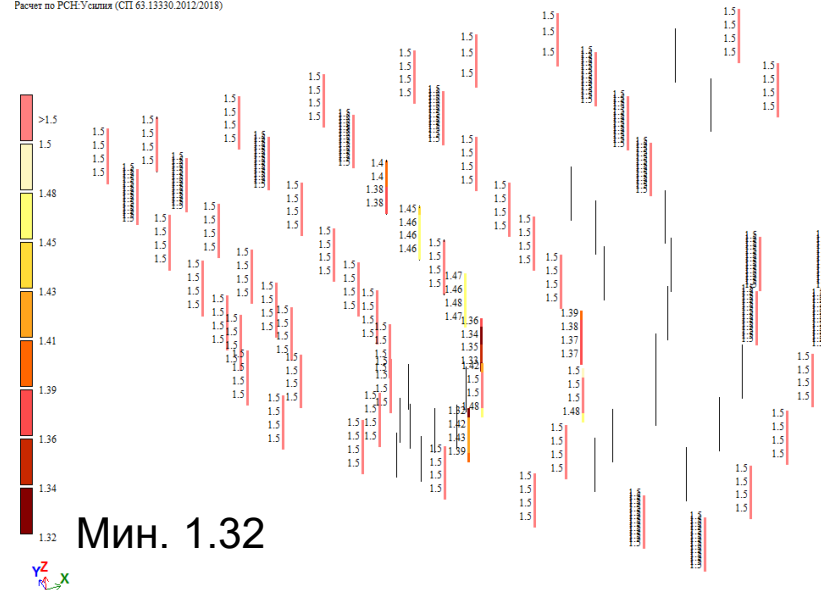


Вариант конструирования РСН
Расчет по РСН:Условия (СП 63.13330.2012/2018)



Коэф. запаса прямоугольных колонн на отм. -7.000

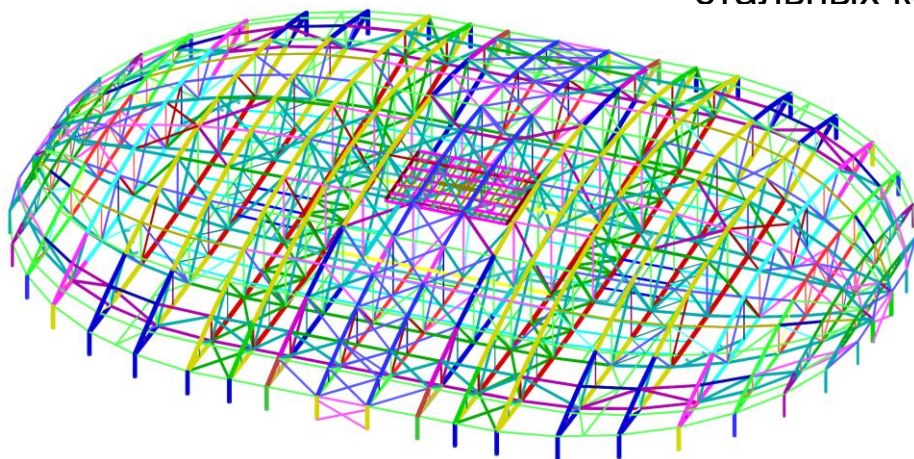
Вариант конструирования РСН
Расчет по РСН:Условия (СП 63.13330.2012/2018)



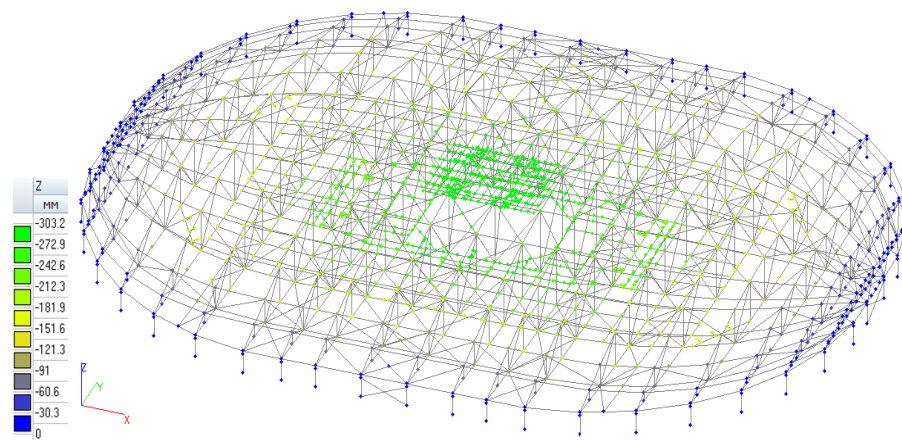
2. НТС на этапе строительства



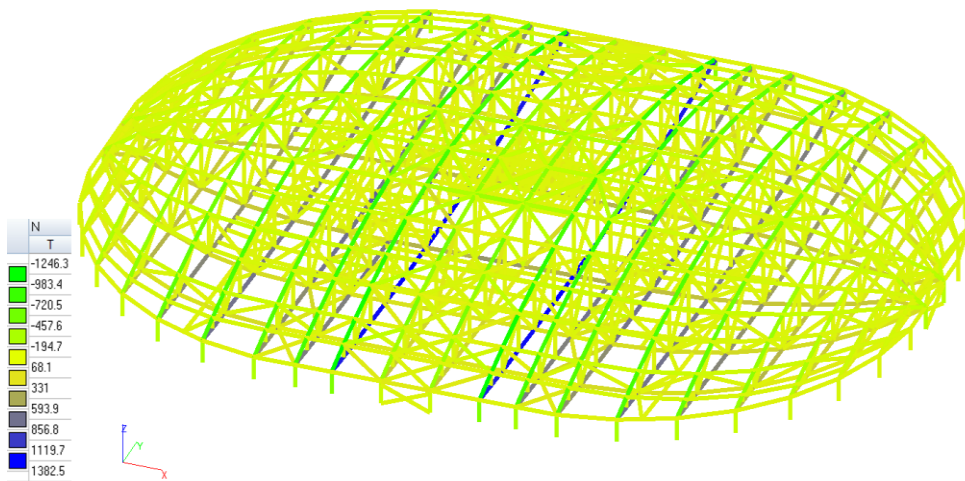
Научно-техническое сопровождение строительства Петербургского спортивно-концертного комплекса (г. Санкт-Петербург), выполнение альтернативных расчетов железобетонных и стальных конструкций



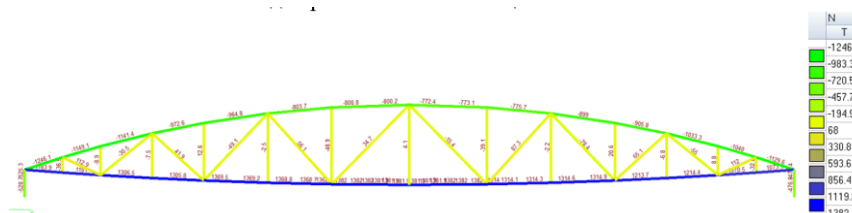
КЭ-модель купола



Вертикальные перемещения конструкций купола от нормативных нагрузок, мм



Продольные усилия в конструкциях купола от расчетных нагрузок, т

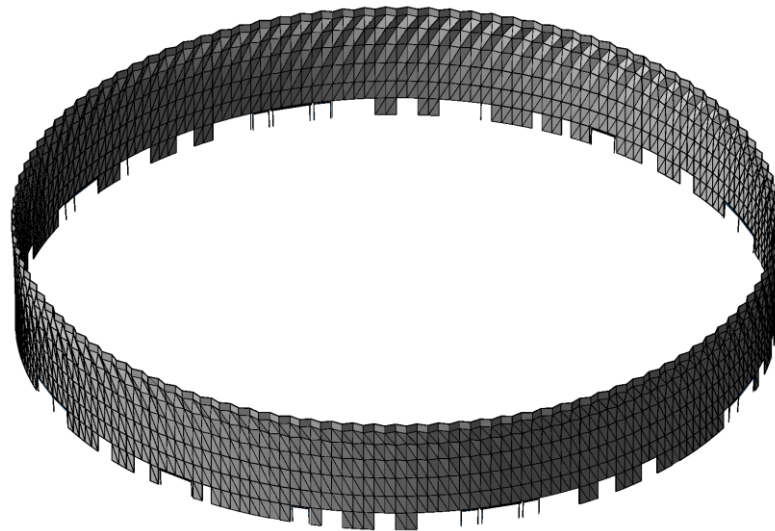


Продольные усилия в главной ферме по оси А10 от расчетных нагрузок, т

2. НТС на этапе строительства

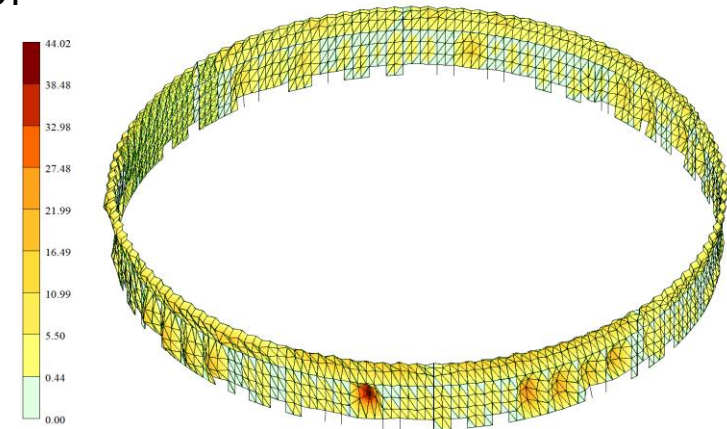


Научно-техническое сопровождение строительства Петербургского спортивно-концертного комплекса (г. Санкт-Петербург), выполнение альтернативных расчетов железобетонных и стальных конст



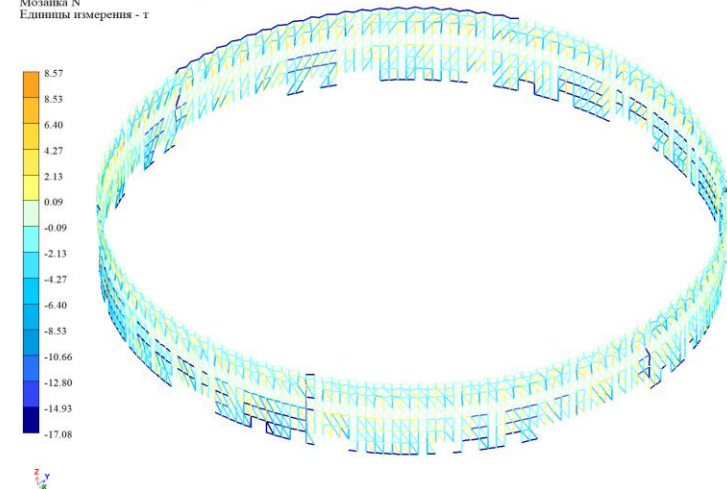
КЭ-модель витражных ограждающих конструкций

Изополюс суммарных перемещений по XY(G)
Единицы измерения - мм



Мозаика N
Единицы измерения - т

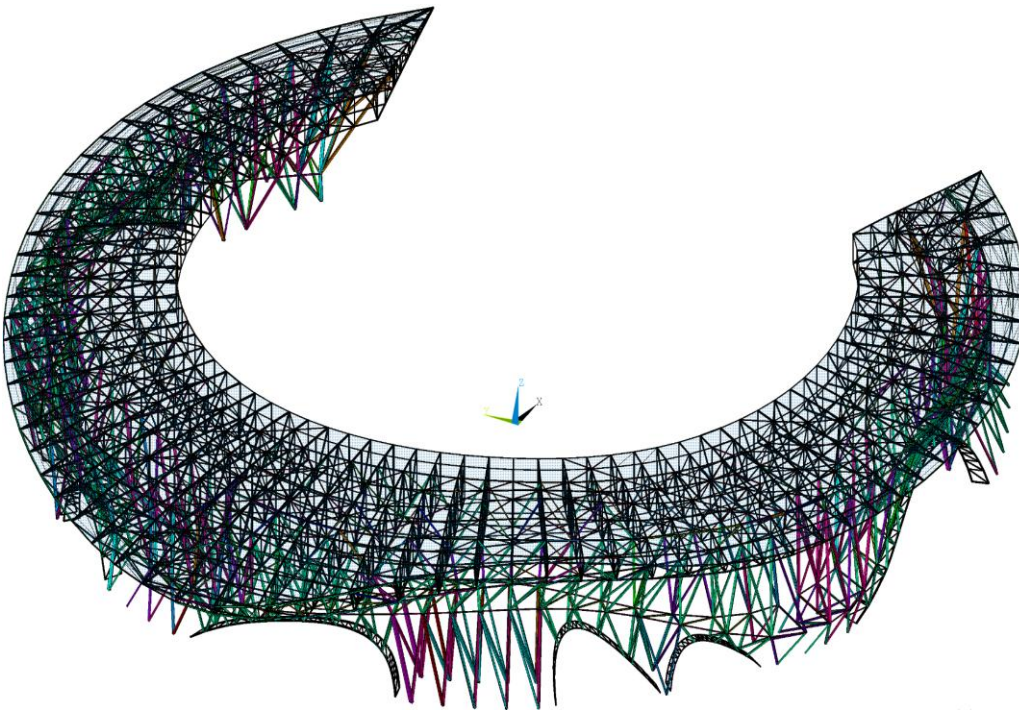
Горизонтальные перемещения, мм



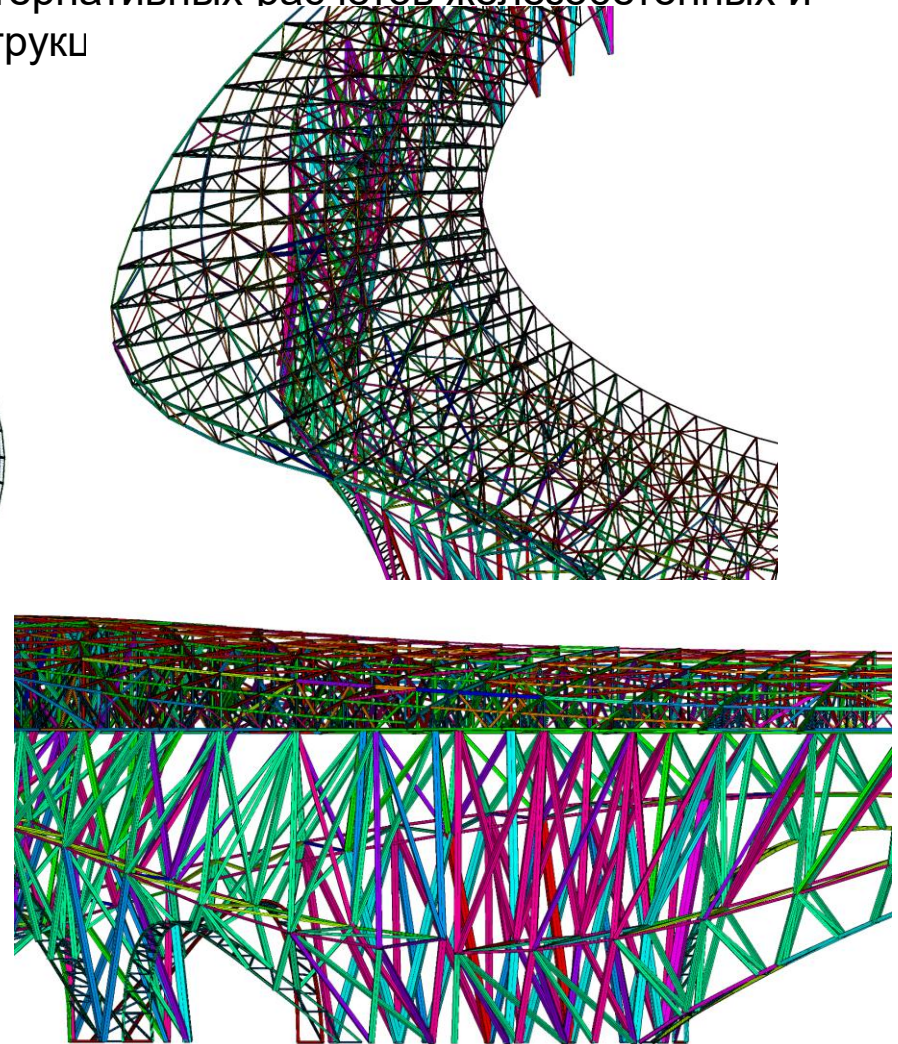
Продольные усилия в алюминиевых элементах, т

2. НТС на этапе строительства

Научно-техническое сопровождение строительства Петербургского спортивно-концертного комплекса (г. Санкт-Петербург), выполнение альтернативных расчетов железобетонных и стальных конструкции



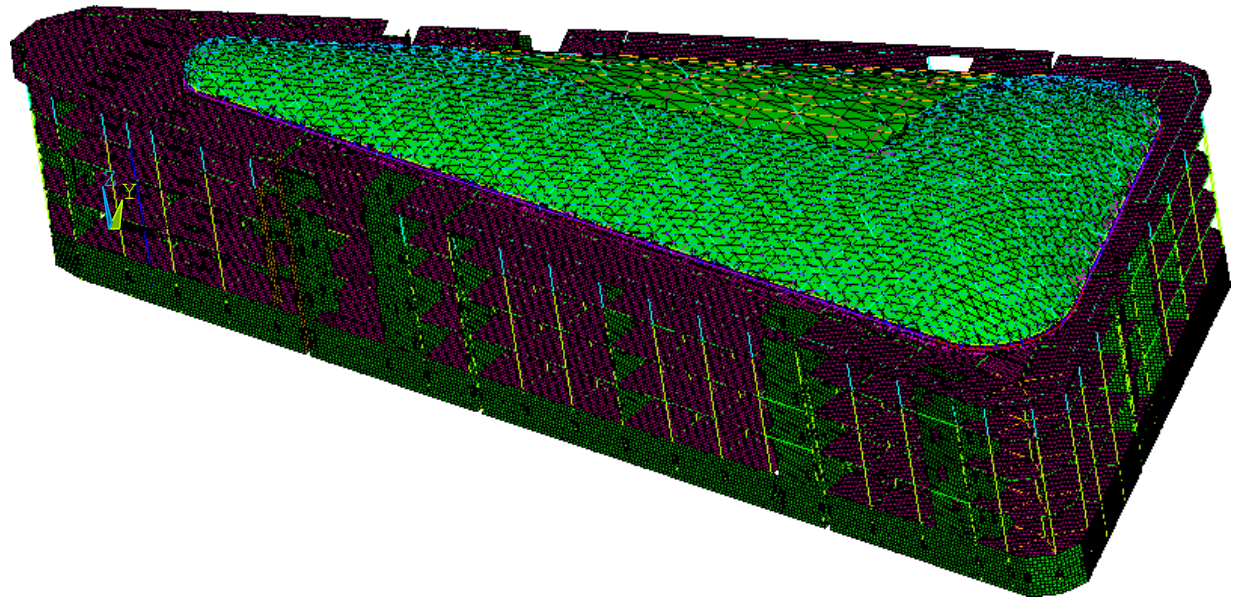
КЭ-модель декоративного козырька



Фрагменты КЭ-модели декоративного козырька

2. НТС на этапе строительства

Расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости несущих конструкций ТРЦ 12.35 (комплекс «Горная Карусель Адлерский р-н, с. Эсто-Садок») при нормативно регламентированных основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий

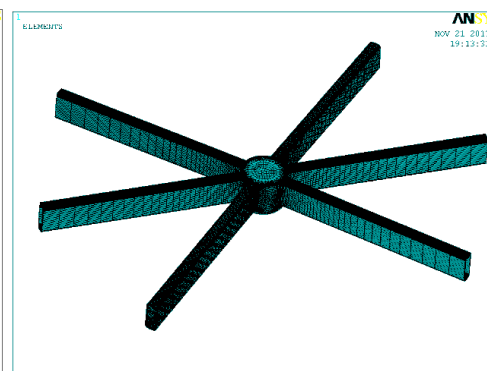
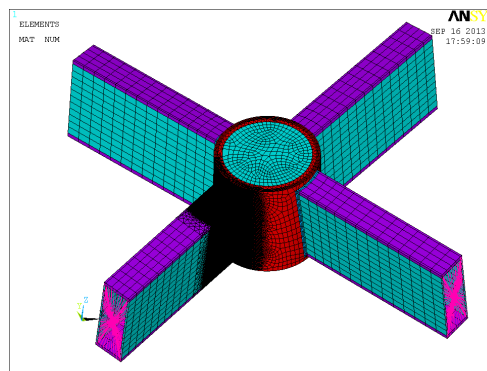
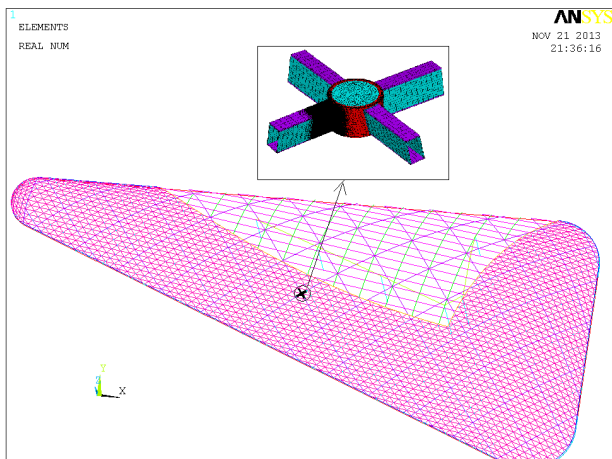


*Полная оболочечно-стержневая КЭ-модель системы
“основание – железобетонные конструкции – эластомеры
– покрытие”*

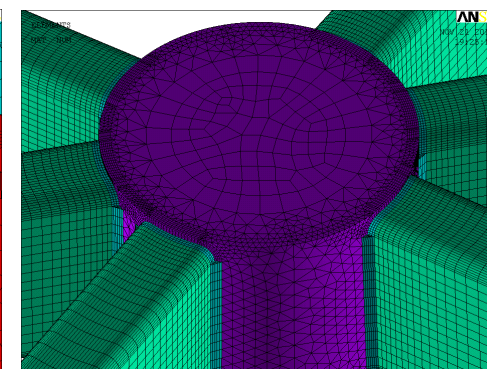
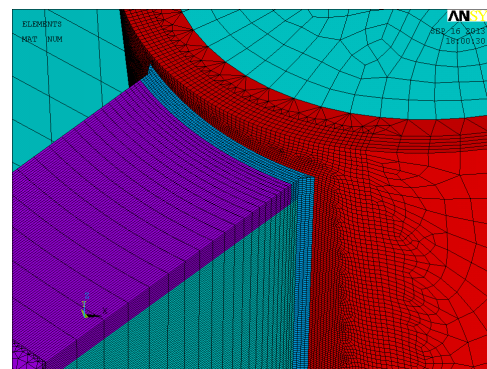
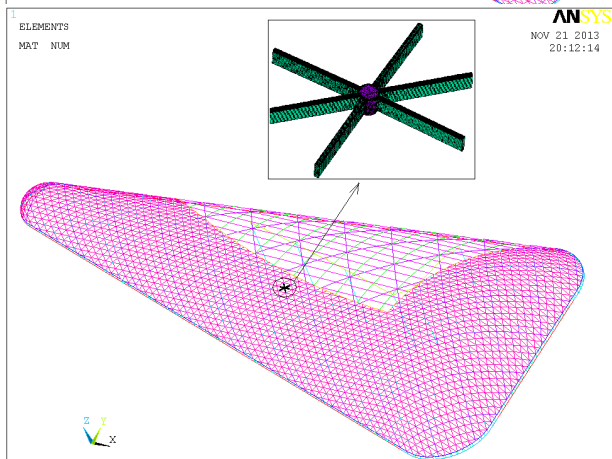
НТС на этапе строительства



Расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости несущих конструкций ТРЦ 12.35 (комплекс «Горная Карусель Адлерский р-н, с. Эсто-Садок») при нормативно регламентированных основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий



Визуализация материалов



Трёхмерные КЭ-модели большого узла (слева) и маленького узла (справа) с подробной сеткой

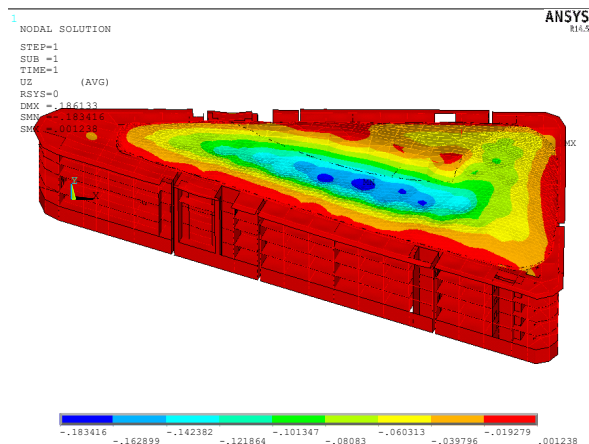
Местоположение трёхмерных КЭ-моделей большого узла (Модель 6) и маленького узла (Модель 7) в составе стержневой модели покрытия. Общий вид. Нагрузочные элементы не показаны

2. НТС на этапе строительства

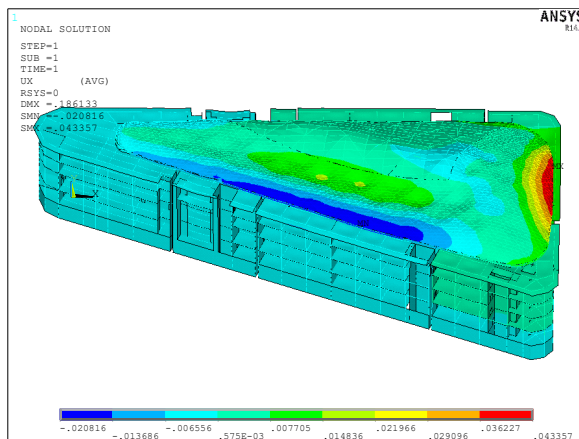


Расчетные исследования НДС, прочности и устойчивости несущих конструкций
ТРЦ 12.35 (комплекс «Горная Карусель Адлерский р-н, с. Эсто-Садок») при нормативно
регламентированных основных и особых сочетаниях нагрузок и воздействий

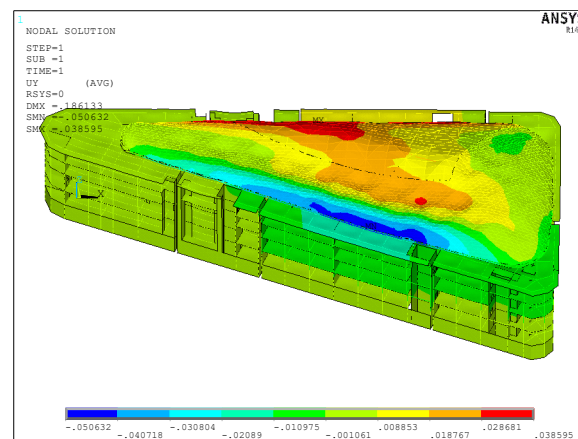
Вертикальные перемещения – макс. 183 мм



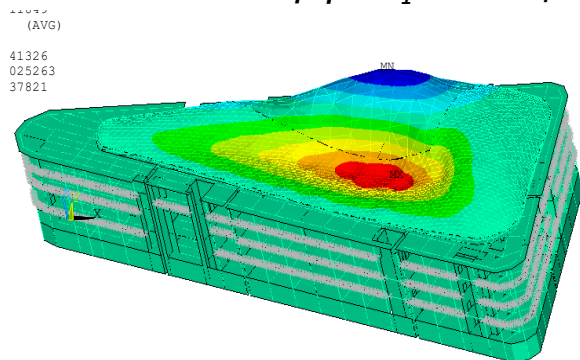
Перемещения по X – 43.4/-20.8 мм



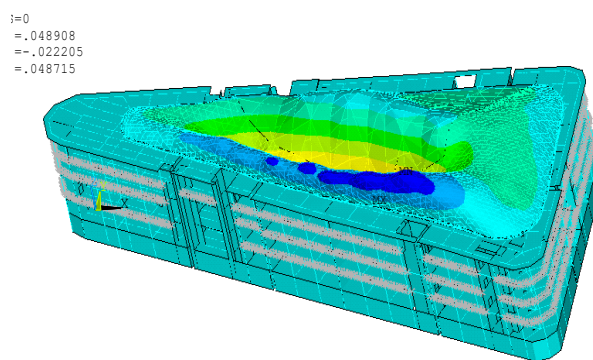
Перемещения по Y – 38.6/-50.6 мм



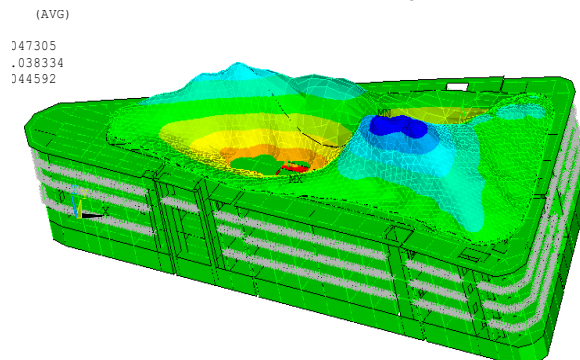
1-я собственная форма $f_1 = 1.119$ Гц



2-я собственная форма $f_2 = 1.591$ Гц



3-я собственная форма $f_3 = 1.674$ Гц

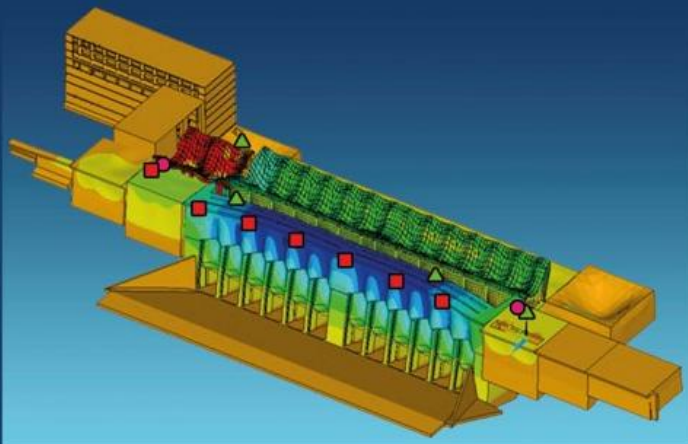


3. Математические модели в составе систем мониторинга



А.М. Белостоцкий П.А. Акимов Т.Б. Кайтуков

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ



Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Кайтуков Т.Б.
Математическое и компьютерное
моделирование в основе мониторинга зданий
и сооружений: Учебное пособие. – М.: АСВ,
2018. – 712 с.

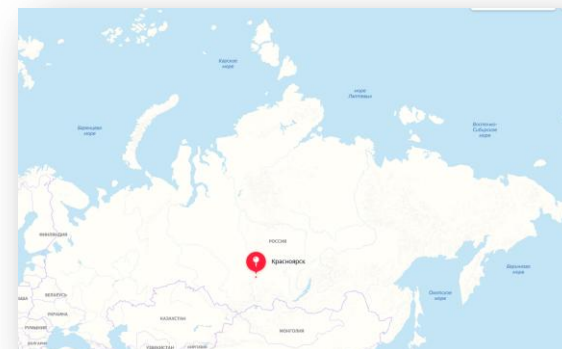
В книге рассматриваются теоретические основы мониторинга зданий и сооружений (в том числе оригинальная авторская численная методика в основе и составе систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений на значимых стадиях возведения и эксплуатации), реализующее программно-алгоритмическое и аппаратное обеспечение, а также некоторые верификационные, модельные, тестовые и практически важные примеры. Издание аккумулирует мировой опыт и собственные достижения коллектива Научно-исследовательского центра СтаДиО, Российской академии архитектуры и строительных наук и ранее существовавшего Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов Национального исследовательского Московского государственного строительного университета.

3. Математические модели в составе систем мониторинга

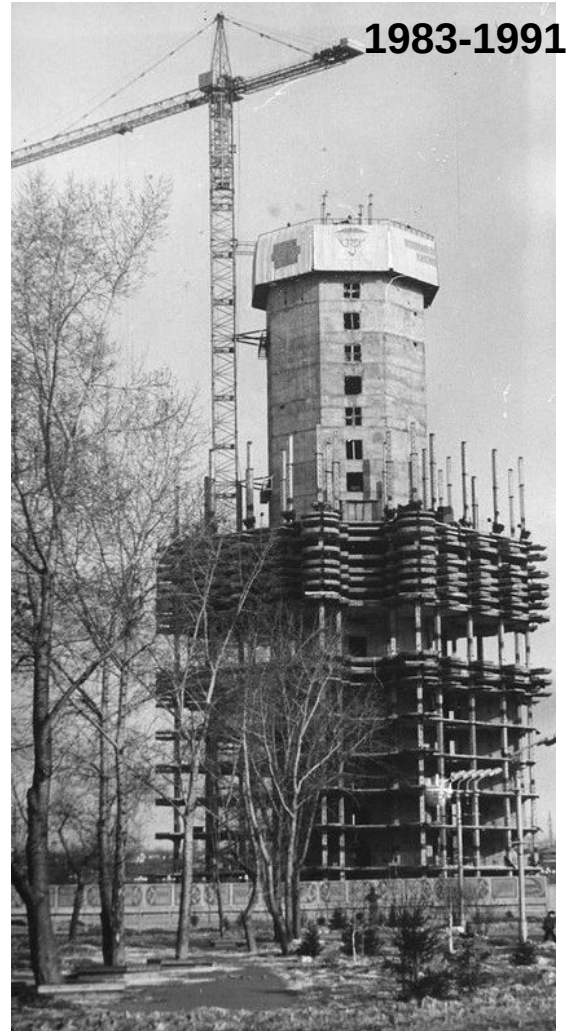
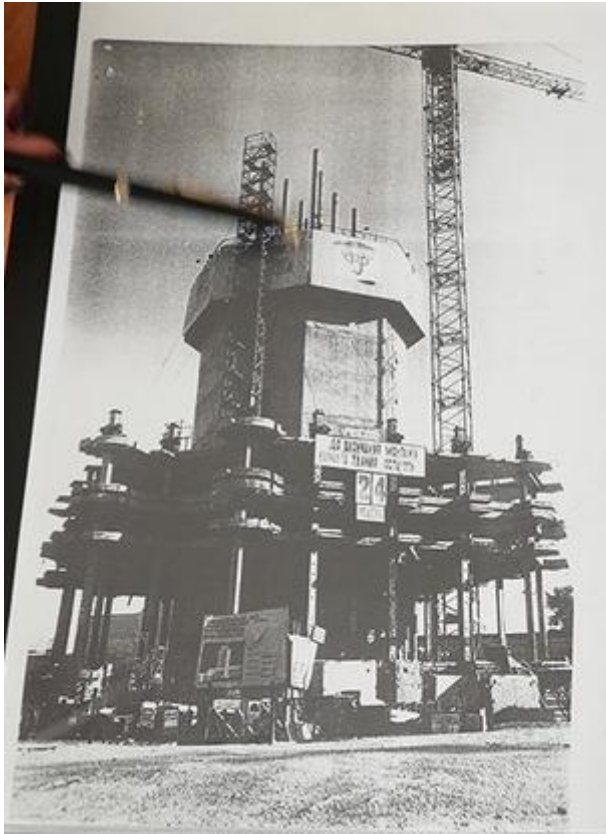
**Здание «КАТЭК НИИУголь». Красноярск
НТС на этапе реконструкции**



Высота 103,50м



3. Математические модели в составе систем мониторинга



3. Математические модели в составе систем мониторинга



Устройство опирания вневольных плит перекрытий на колонны

3. Математические модели в составе систем мониторинга

Различного рода дефекты конструкций



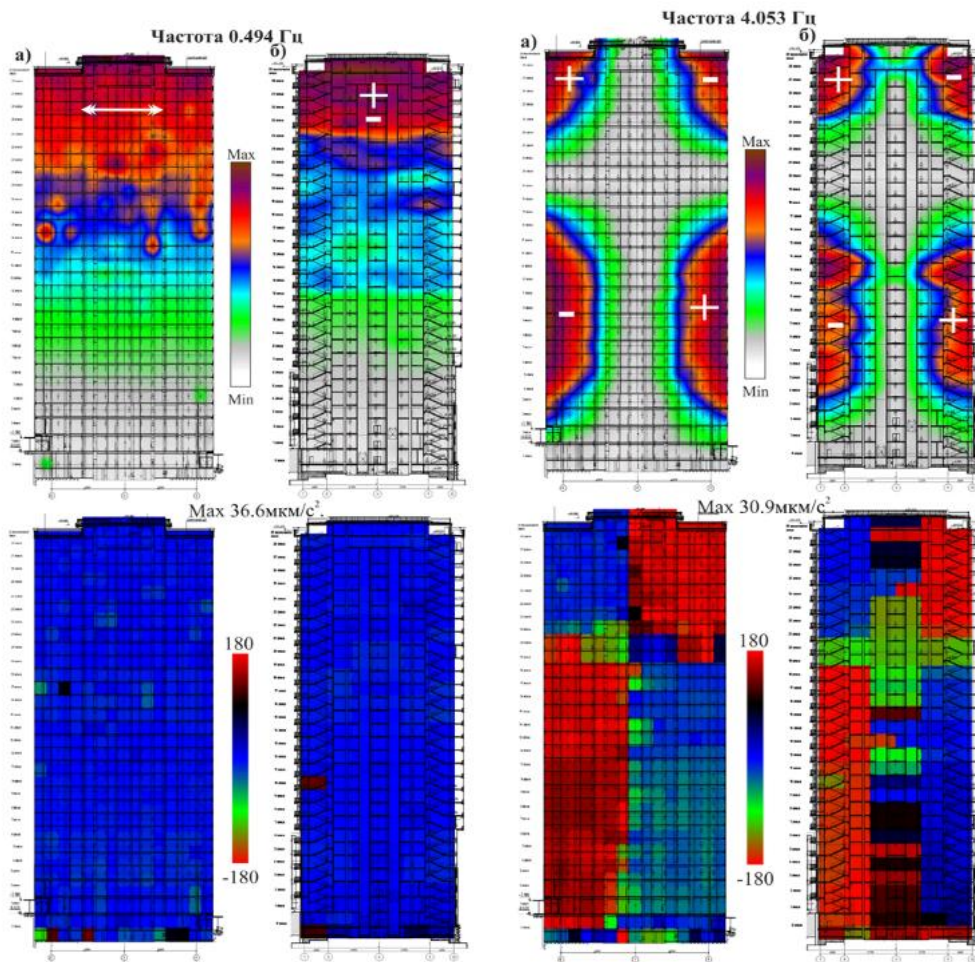
3. Математические модели в составе систем мониторинга



Результаты измерений

Собственные формы
горизонтальных колебаний

№ п/п	Направление	Частота (Гц)	Номер формы
1	X	0.494	1
2	X	2.539	2
3	X	5.713	3
4	X	9.131	4
5	X	11.167	5
6	Y	0.500	1
7	Y	2.393	2
8	Y	5.371	3
9	Y	8.398	4
10	Y	11.133	5
11	вращение	1.465	1
12	вращение	4.053	2
13	вращение	6.201	3
14	вращение	7.764	4
15	вращение	8.887	1



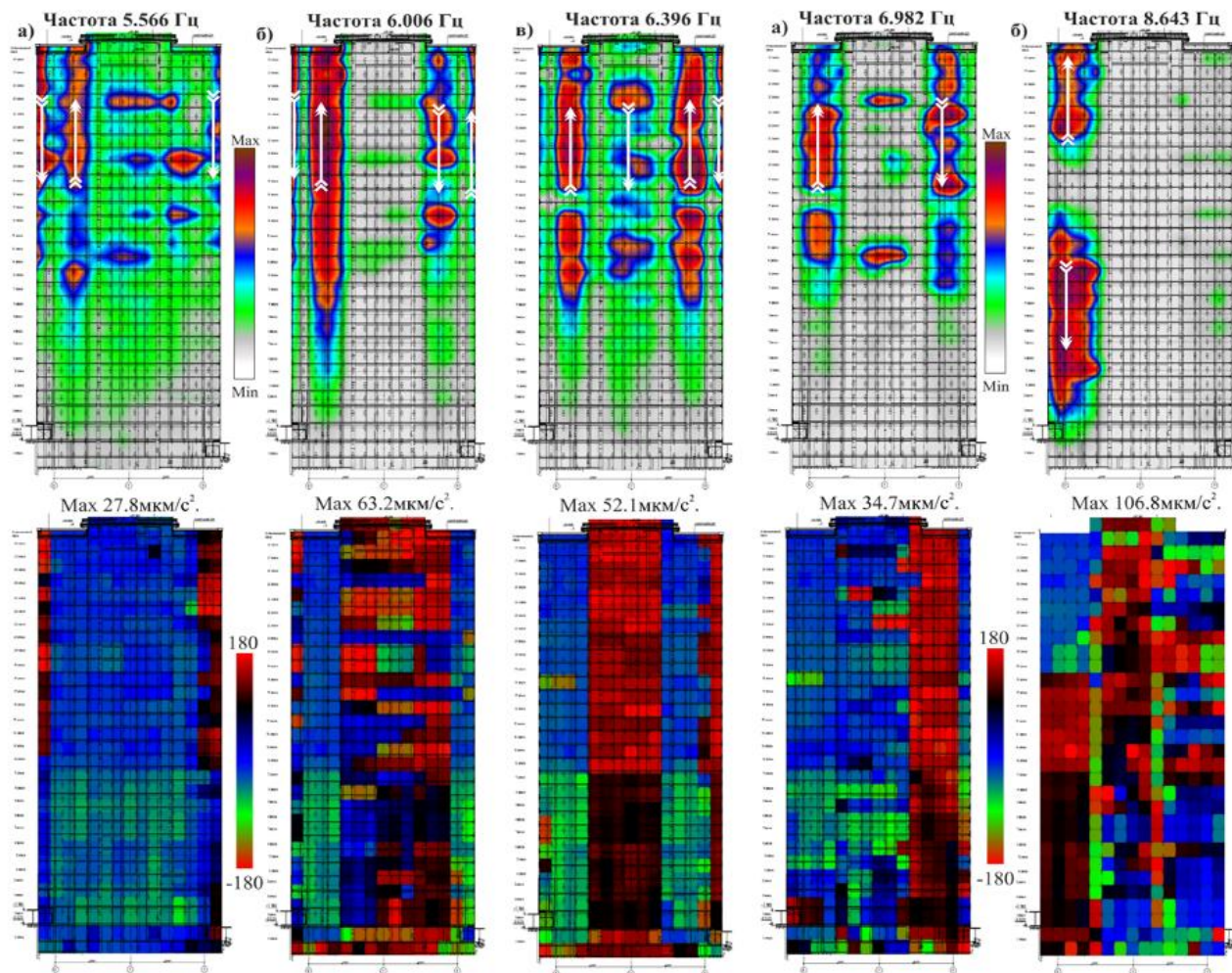
Собственные колебания. Направление
относительных перемещений показано стрелками и
знаками + и -.

3. Математические модели в составе систем мониторинга

Результаты измерений

Собственные формы вертикальных колебаний вдоль оси V

№ п/п	Направление	Частота (Гц)	Номер формы
1	Z	3.955	2
2	Z	4.346	3
3	Z	4.883	2
4	Z	5.566	3
5	Z	6.006	4
6	Z	6.396	4
7	Z	6.982	3
8	Z	8.643	2



Собственные формы вертикальных колебаний вдоль оси H

№ п/п	Направление	Частота (Гц)	Номер формы
1	Z	4.102	2
2	Z	4.346	3
3	Z	5.078	2
4	Z	5.566	1

Собственные колебания. Направление относительных перемещений показано стрелками и знаками + и -.

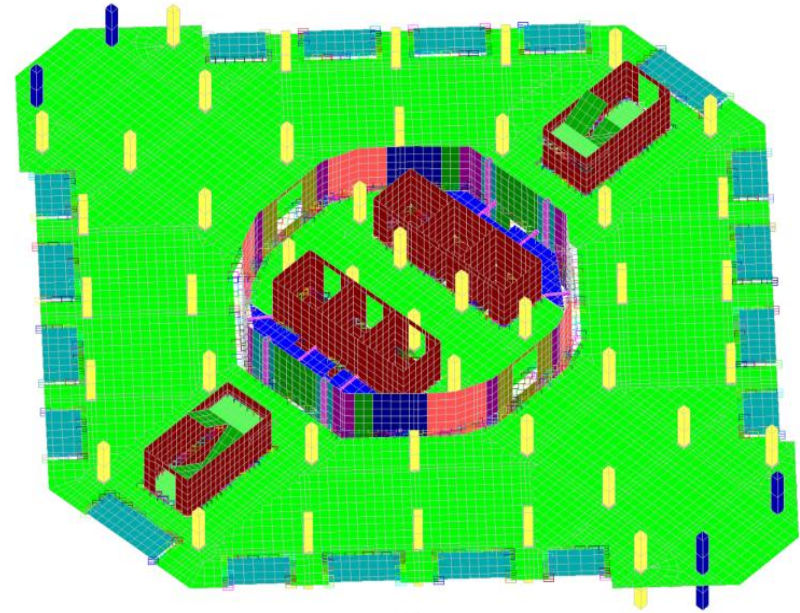
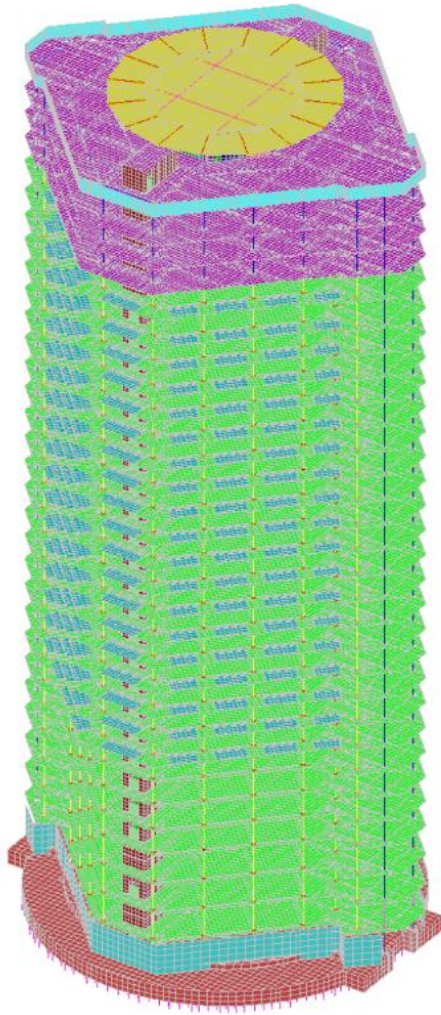
3. Математические модели в составе систем мониторинга



Сопоставление измеренных собственных частот и форм колебания и вычисленных с учетом масс только от собственного веса несущих конструкций.

Обследование, МСВ		Расчет в ПК SCAD		Δ, %	Описание формы колебаний
		Колонны – по 3 КЭ. Согласованная матрица масс.			
№ формы	Частота (Гц)	№ формы	Частота (Гц)		
1	0,494	1	0,43	13,0	Горизонтальная X
2	0,500	2	0,44	12,0	Горизонтальная Y
3	1,465	3	1,86	21,2	Вращение
4	2,393	4	2,28	4,7	Горизонтальная Y
5	2,539	5	2,32	8,6	Горизонтальная X
6	3,955	8	2,84	28,2	Вертикальная
7	4,053	23	4,59	11,7	Вращение
8	4,346	16	3,79	12,8	Вертикальная
9	4,883	21	4,46	8,7	Вертикальная
10	5,371	30	5,24	2,4	Горизонтальная Y
11	5,566	33	5,52	0,8	Вертикальная
12	5,713	32	5,46	4,4	Горизонтальная X
13	6,006	43	6,52	7,9	Вертикальная
14	6,201	102	7,39	16,1	Вращение
15	6,396	56	7,06	9,4	Вертикальная
16	6,982	54	7,00	0,3	Вертикальная
17	7,764	295	9,84	21,1	Вращение
18	8,398	134	8,31	1,0	Горизонтальная Y
19	8,643	129	8,07	6,6	Вертикальная
20	8,887	385	10,37	14,3	Вращение
21	9,131	183	8,87	2,9	Горизонтальная X
22	11,133	973	12,83	13,2	Горизонтальная Y
23	11,167	659	11,48	2,7	Горизонтальная X
...	...	...	...	...	...

3. Математические модели в составе систем мониторинга



Фрагмент расчетной КЭ модели. Типовой этаж

Шов моделируется объединениями горизонтальных перемещений узлов ядра и плиты перекрытия

Математические модели в составе систем мониторинга

Сопоставление измеренных собственных частот и форм колебания и вычисленных с учетом собственного веса несущих конструкций, фасадов и кирпичных перегородок.

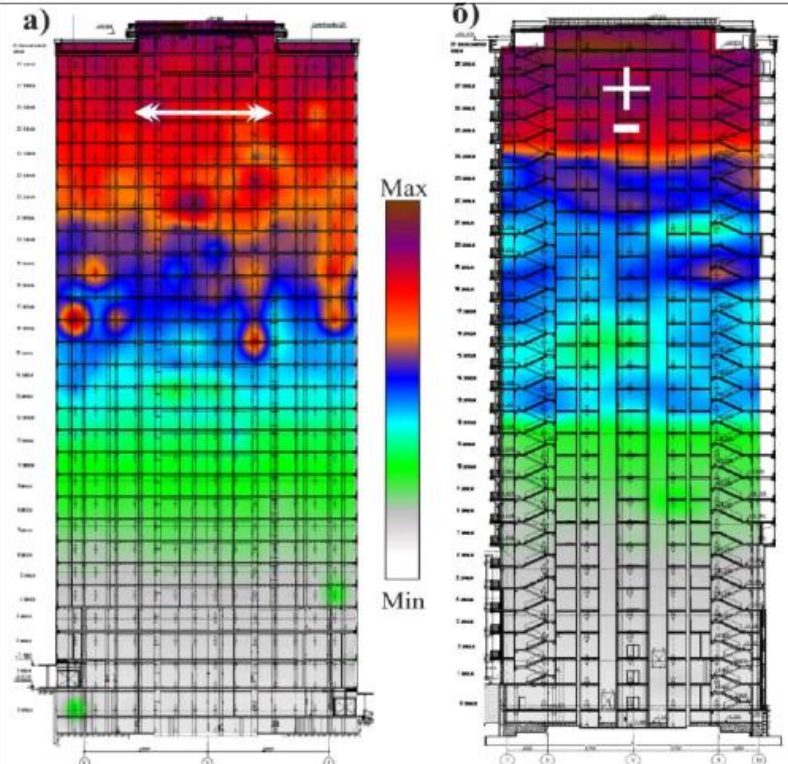
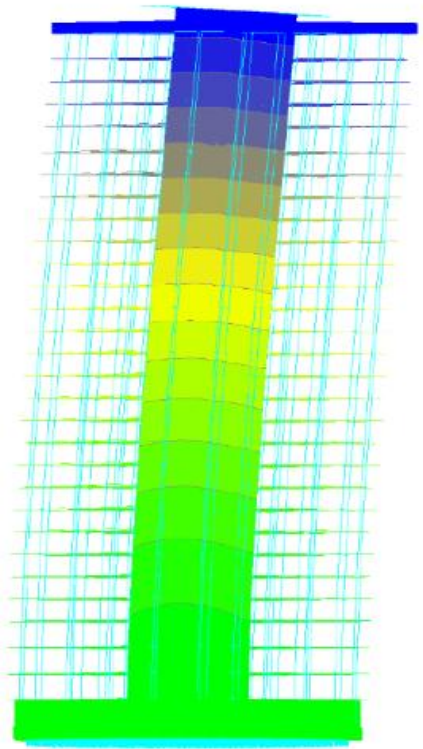
Обследование, МСВ		Расчет в ПК SCAD		Δ, %	Δ, % до адаптации модели	Описание формы колебаний
		Колонны – 3 КЭ. Согласованная матрица масс. Шов включен в работу				
№ формы	Частота (Гц)	№ формы	Частота (Гц)			
1	0,494	1	0,48	2,8	13,0	Горизонтальная X
2	0,500	2	0,54	7,4	12,0	Горизонтальная Y
3	1,465	3	1,42	3,1	21,2	Вращение
4	2,393	4	2,42	1,1	4,7	Горизонтальная Y
5	2,539	5	2,43	4,3	8,6	Горизонтальная X
6	3,955	6	3,41	13,8	28,2	Вертикальная
7	4,053	13	4,23	4,2	11,7	Вращение
8	4,346	15	4,70	7,5	12,8	Вертикальная
9	4,883	17	4,84	0,9	8,7	Вертикальная
10	5,371	18	5,44	1,3	2,4	Горизонтальная Y
11	5,566	19	5,53	0,6	0,8	Вертикальная
12	5,713	20	5,65	1,1	4,4	Горизонтальная X
13	6,006	22	6,05	0,7	7,9	Вертикальная
14	6,201	29	6,91	10,3	16,1	Вращение
15	6,396	21	5,70	10,9	9,4	Вертикальная
16	6,982	24	6,23	10,8	0,3	Вертикальная
17	7,764	37	7,83	0,8	21,1	Вращение
18	8,398	53	8,54	1,7	1,0	Горизонтальная Y
19	8,643	47	8,35	3,4	6,6	Вертикальная
20	8,887	83	9,29	4,3	14,3	Вращение
21	9,131	70	9,03	1,1	2,9	Горизонтальная X
22	11,133	251	10,99	1,3	13,2	Горизонтальная Y
23	11,167	659	11,86	5,8	2,7	Горизонтальная X
...	...	...	...	...	...	...

Тем самым, достигнуто приемлемое соответствие (различие менее 7,5%) общесистемных натурных и расчетных собственных частот/форм колебаний (изгибных и крутильных) - для модифицированной расчетной SCAD-модели, отражающей специфику динамической работы конструкций при микросейсмическом фоне колебаний (включение в работу швов между ядрами жесткости и перекрытиями). Это подтверждает обоснованность основных физико-механических характеристик материалов и конструктивных особенностей здания, принятых в модели.

3. Математические модели в составе систем мониторинга



Собственные частоты и формы сооружения колебания вычислены с учетом собственного веса, фасадов и кирпичных перегородок, без учета коэффициентов надежности по нагрузке и ответственности. Метод Ланцоша. Матрица масс согласованная.

№ формы	Обследование	Расчет в ПК SCAD
1	 $f_1 = 0,494 \text{ Гц}$ Горизонтальная, вдоль оси X	 $f_1 = 0,480 \text{ Гц}$

3. Математические модели в составе систем мониторинга



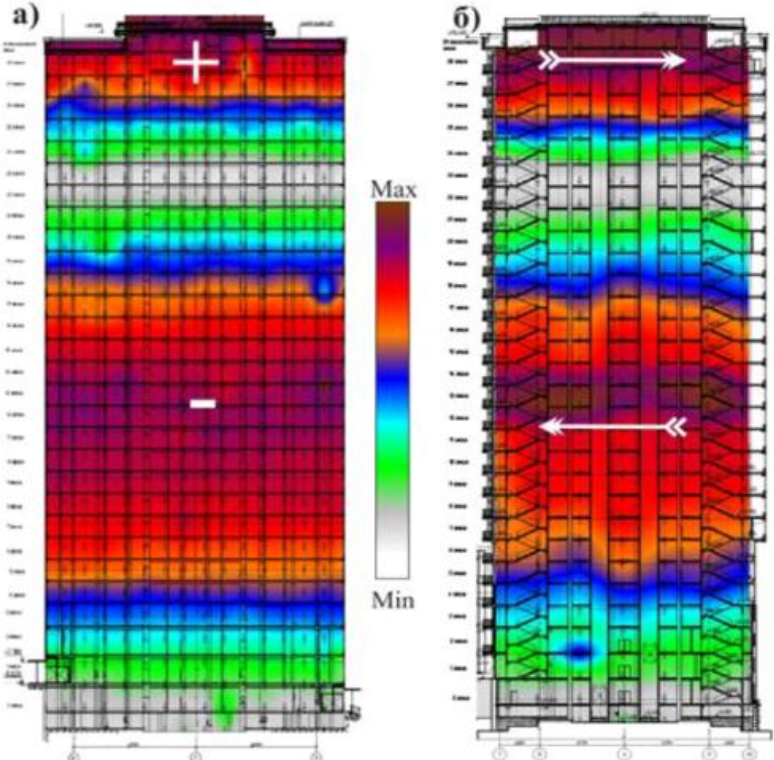
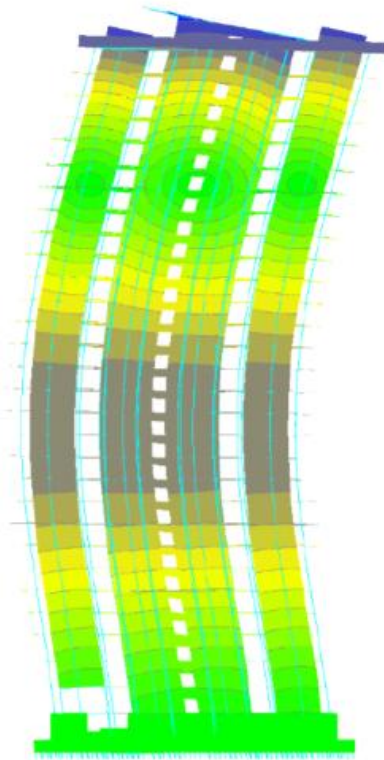
Собственные частоты и формы сооружения колебания вычислены с учетом собственного веса, фасадов и кирпичных перегородок, без учета коэффициентов надежности по нагрузке и ответственности. Метод Ланцоша. Матрица масс согласованная.

№ формы	Обследование	Расчет в ПК SCAD
3		
	$f_3 = 1,465 \text{ Гц}$ Вращательная	$f_3 = 1,420 \text{ Гц}$

3. Математические модели в составе систем мониторинга



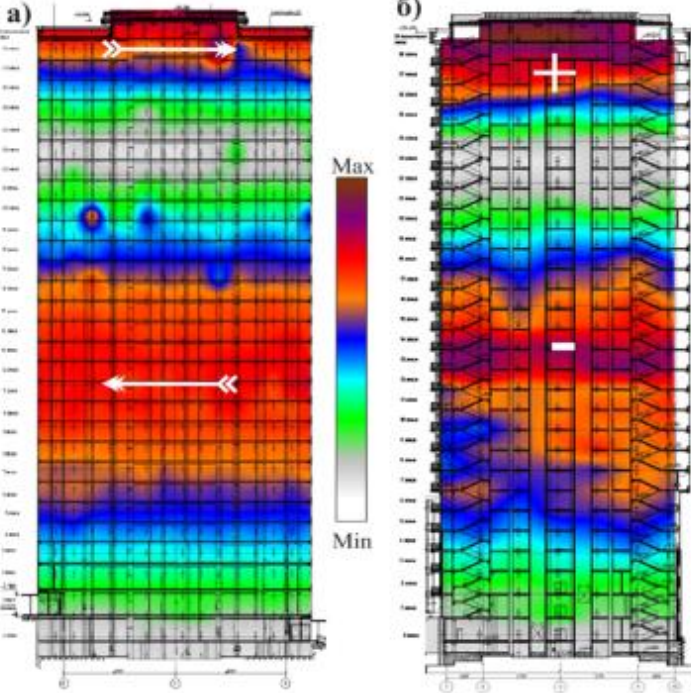
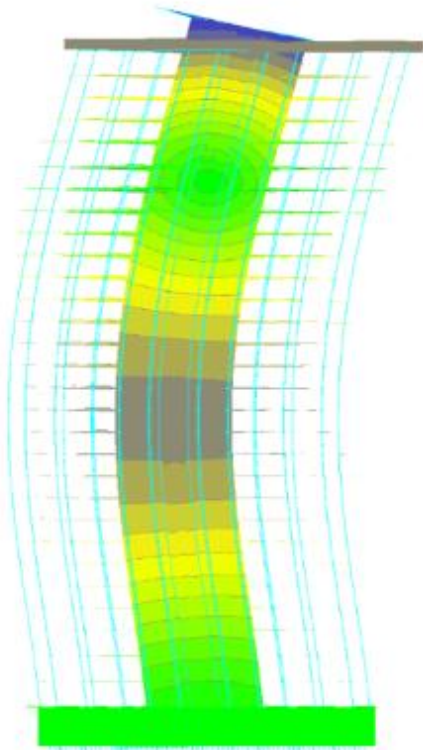
Собственные частоты и формы сооружения колебания вычислены с учетом собственного веса, фасадов и кирпичных перегородок, без учета коэффициентов надежности по нагрузке и ответственности. Метод Ланцоша. Матрица масс согласованная.

№ формы	Обследование	Расчет в ПК SCAD
4	 $f_4 = 2,393 \text{ Гц}$ Горизонтальная, вдоль оси Y	 $f_4 = 2,420 \text{ Гц}$

3. Математические модели в составе систем мониторинга



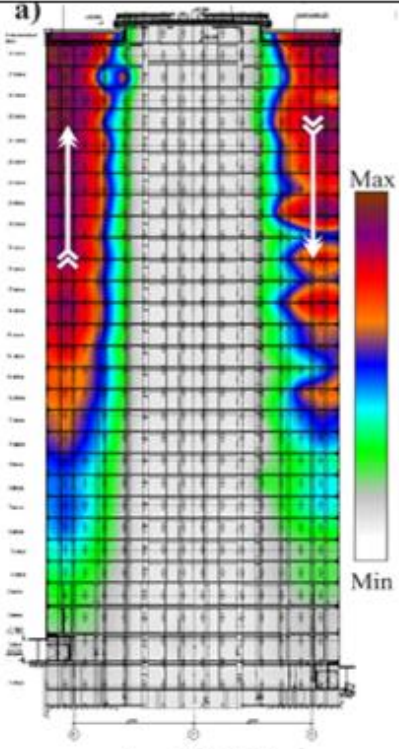
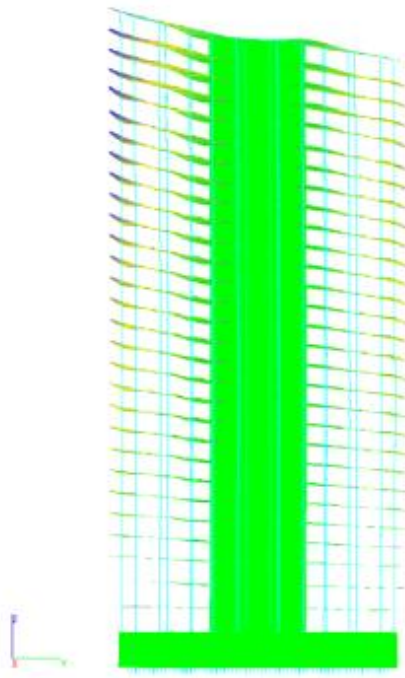
Собственные частоты и формы сооружения колебания вычислены с учетом собственного веса, фасадов и кирпичных перегородок, без учета коэффициентов надежности по нагрузке и ответственности. Метод Ланцоша. Матрица масс согласованная.

№ формы	Обследование	Расчет в ПК SCAD
5	Частота 2.539 Гц 	
	$f_5 = 2,539 \text{ Гц}$ Горизонтальная, вдоль оси X	$f_5 = 2,430 \text{ Гц}$

3. Математические модели в составе систем мониторинга



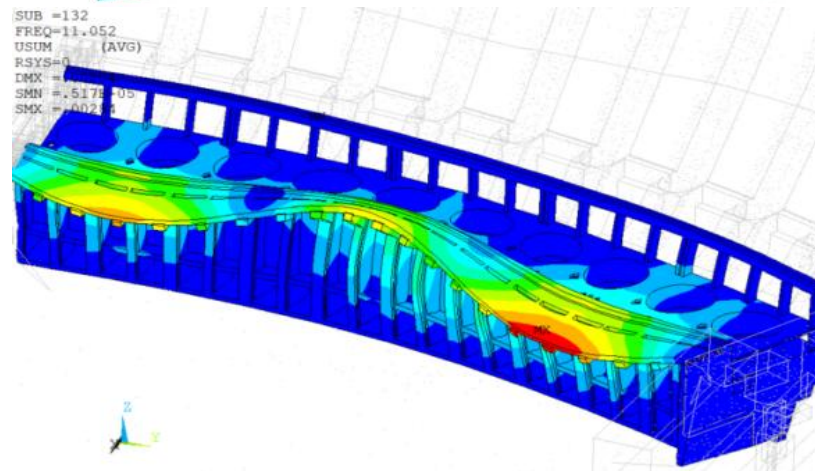
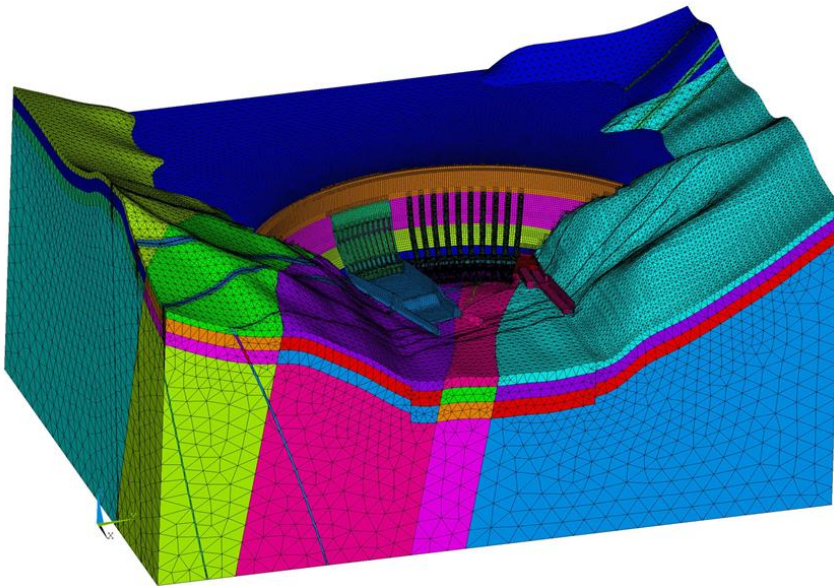
Собственные частоты и формы сооружения колебания вычислены с учетом собственного веса, фасадов и кирпичных перегородок, без учета коэффициентов надежности по нагрузке и ответственности. Метод Ланцоша. Матрица масс согласованная.

№ формы	Обследование	Расчет в ПК SCAD
6		
	$f_6 = 3,955 \text{ Гц}$ Вертикальная	$f_7 = 3,410 \text{ Гц}$

3. Математические модели в составе систем мониторинга

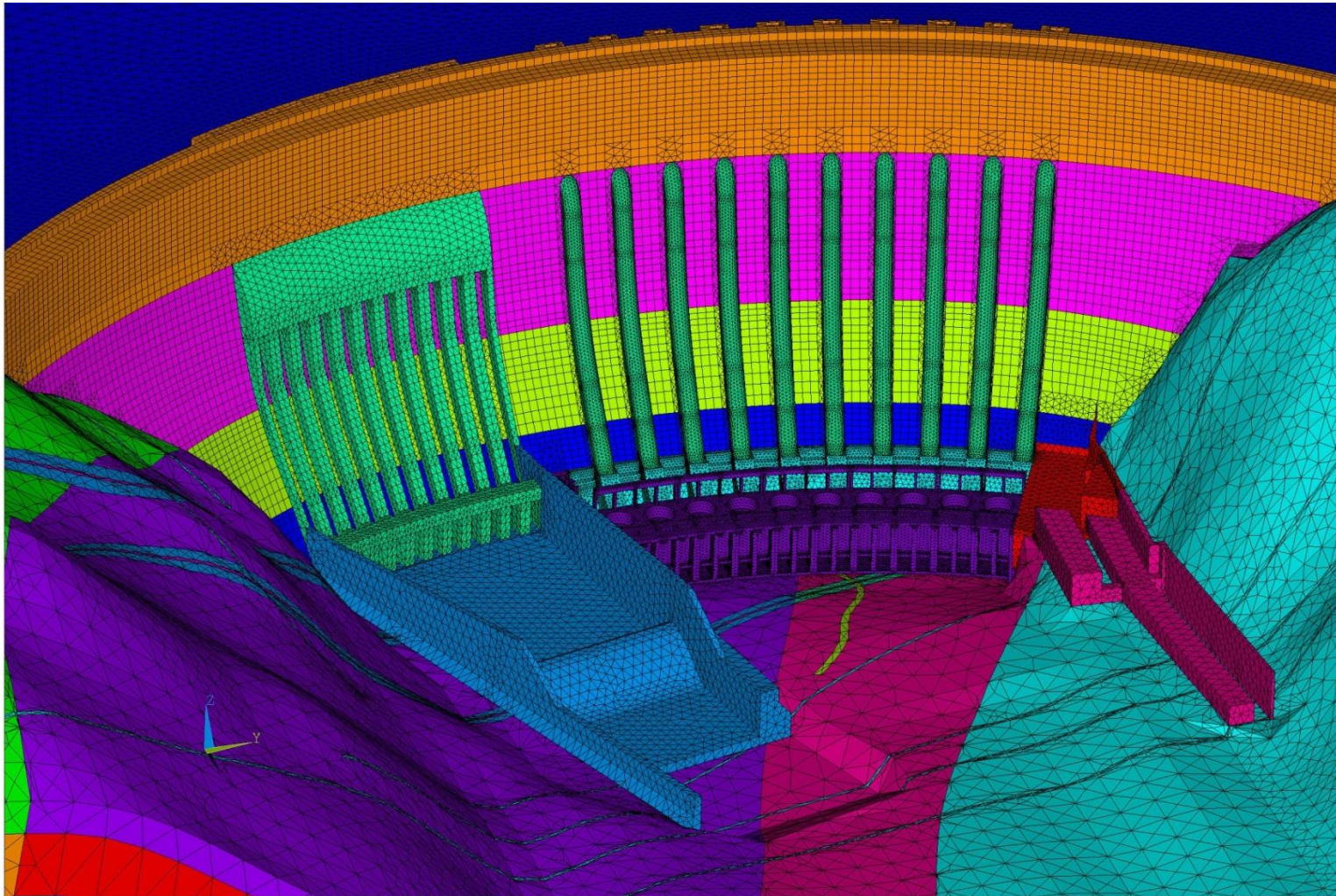


**«Разработка, верификация и апробация параметризуемой
объемной конечноэлементной модели системы
«основание – водохранилище – плотина – здание станции
Саяно-Шушенской ГЭС»**



3. Математические модели в составе систем мониторинга

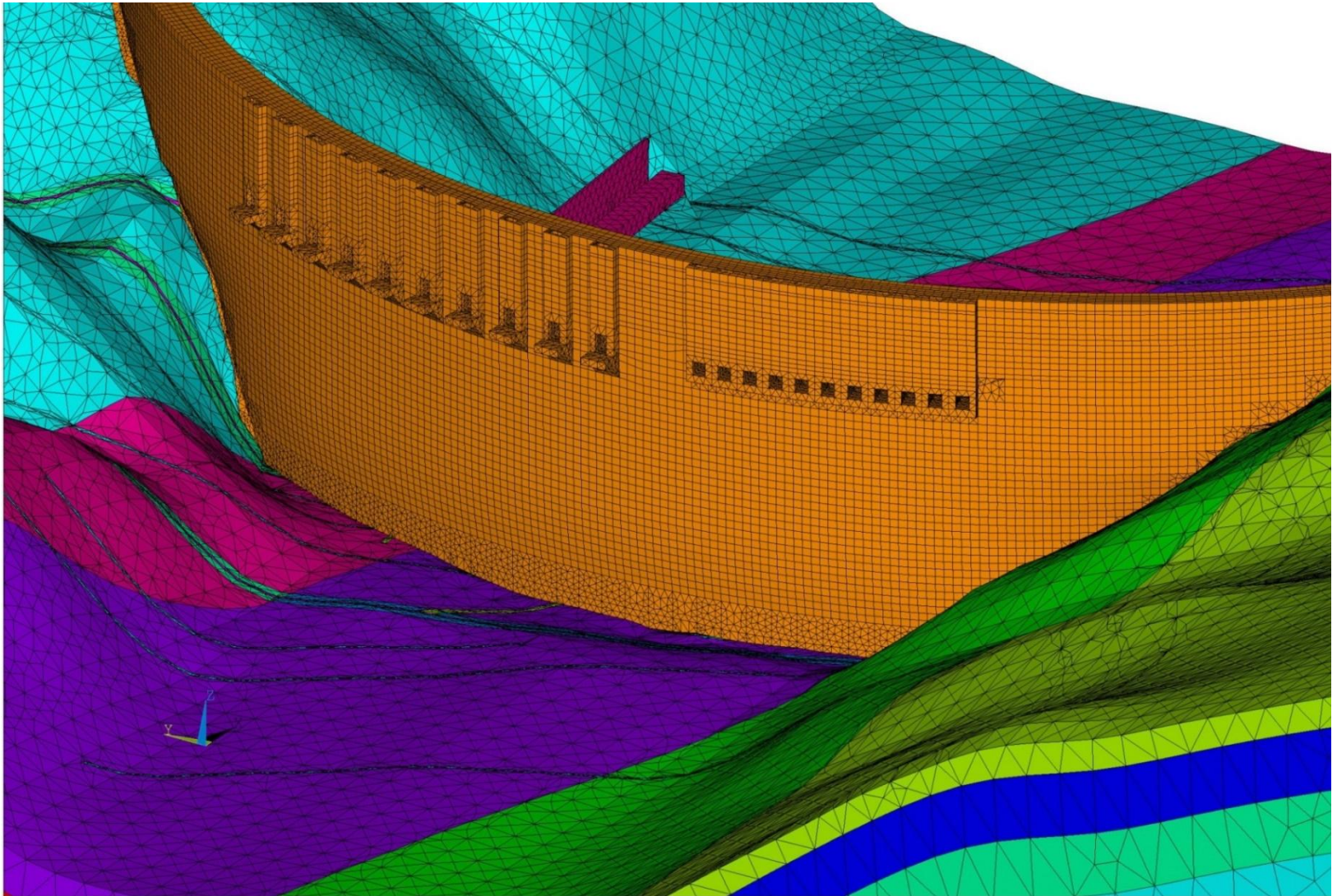
Динамическая базовая КЭ-модель системы «основание – водохранилище – плотина – здание станции Саяно-Шушенской ГЭС»



В водохранилище для верификации реализовано три уровня наполнения 500 м, 520 м и 540 м.
Размерность модели – **500 606** узлов, **1 331 689** степеней свободы.

3. Математические модели в составе систем мониторинга

Динамическая базовая КЭ-модель системы «основание – водохранилище – плотина – здание станции Саяно-Шушенской ГЭС»



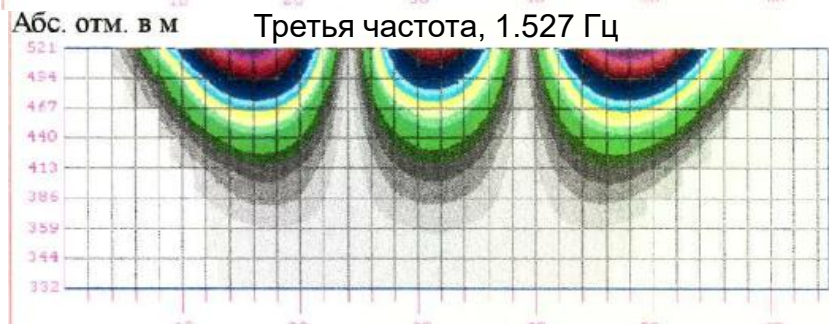
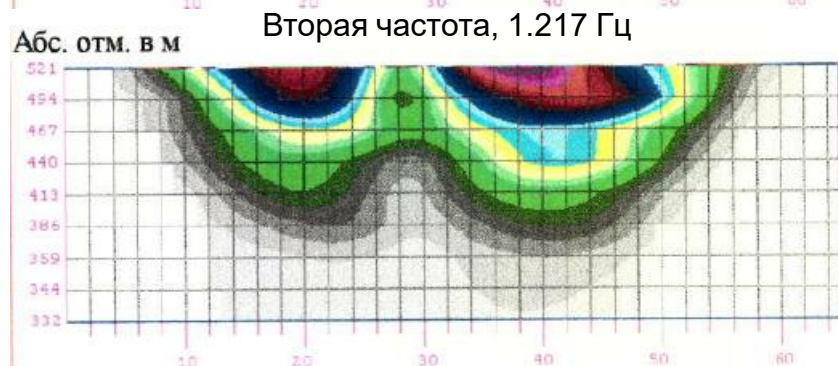
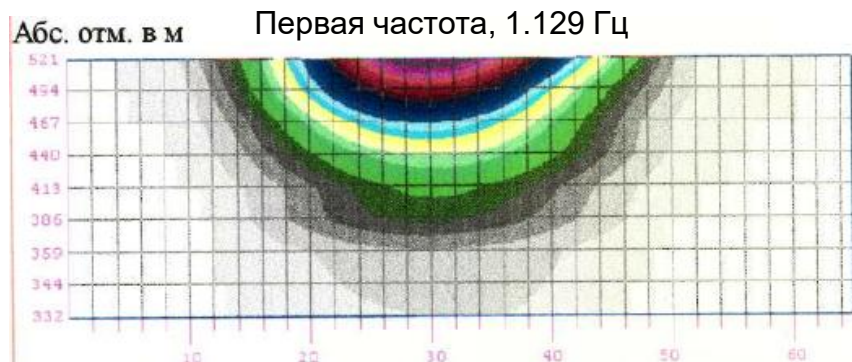
Водохранилище не показано

3. Математические модели в составе систем мониторинга



Динамическая базовая модель системы «основание – водохранилище – плотина – здание станции Саяно-Шушенской ГЭС»

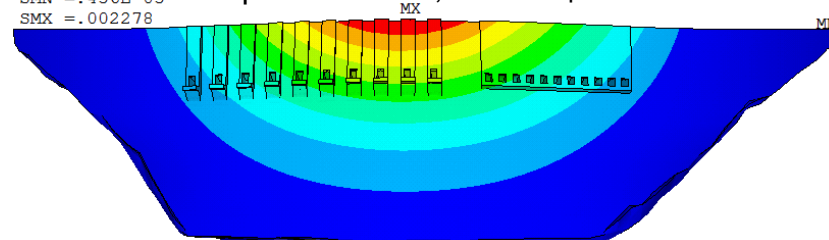
МСВ 1997/98 г. УВБ 539 м



УВБ 540 м

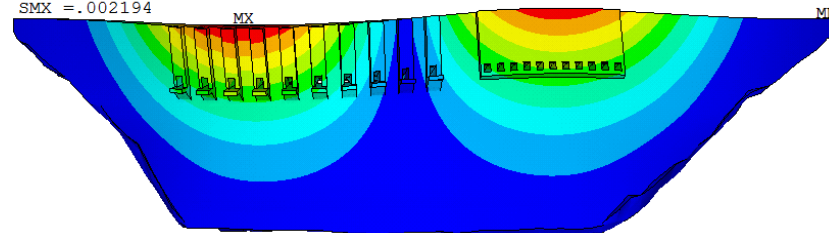
SUB =1
FREQ=1.11818
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.002278
SMN =.456E-05
SMX =.002278

Первая частота, 1.118 Гц



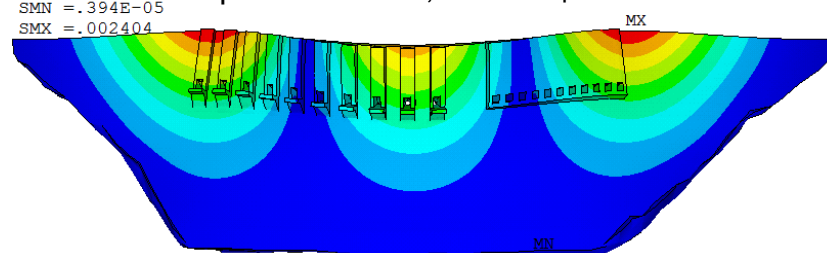
RSYS=0
DMX =.002194
SMN =.595E-05
SMX =.002194

Вторая частота, 1.216 Гц



USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.002404
SMN =.394E-05
SMX =.002404

Третья частота, 1.537 Гц



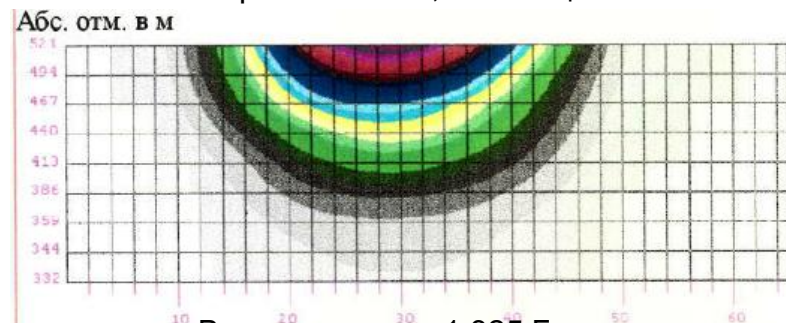
3. Математические модели в составе систем мониторинга



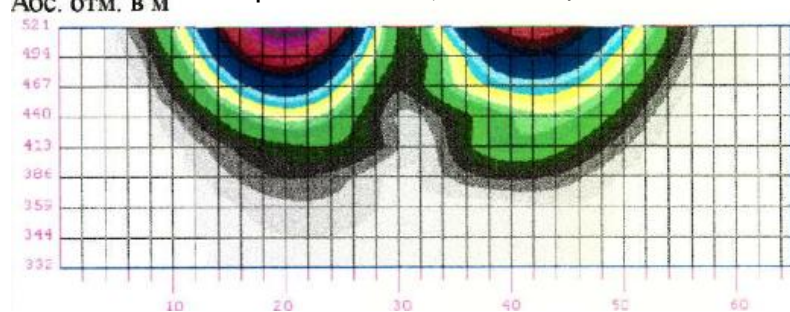
Динамическая базовая модель системы «основание – водохранилище – плотина – здание станции Саяно-Шушенской ГЭС»

МСВ 1997/98 г. УВБ 500 м

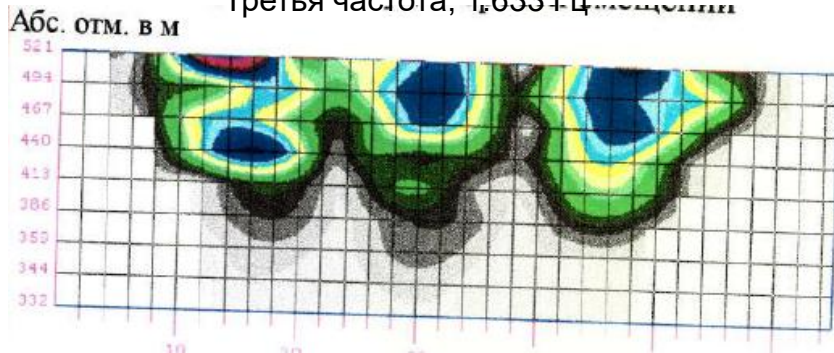
Первая частота, 1.236 Гц



Вторая частота, 1.325 Гц

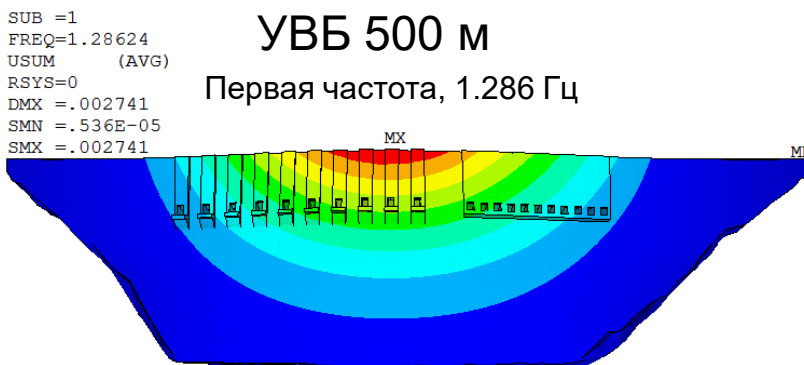


Третья частота, 1.633 Гц

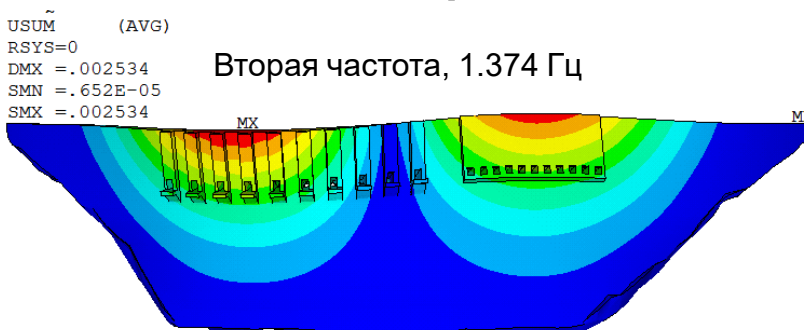


УВБ 500 м

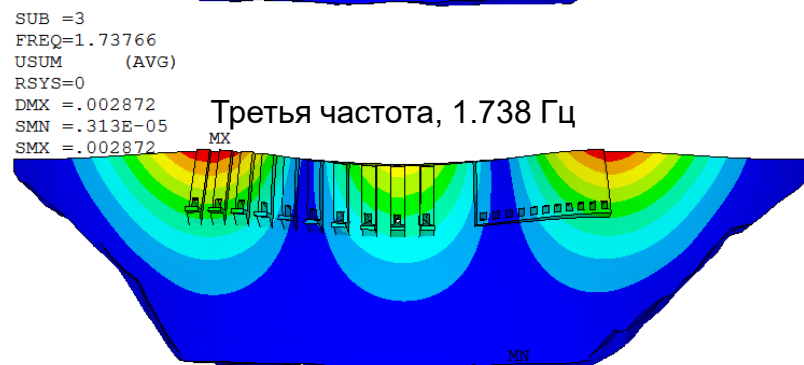
Первая частота, 1.286 Гц



Вторая частота, 1.374 Гц



Третья частота, 1.738 Гц



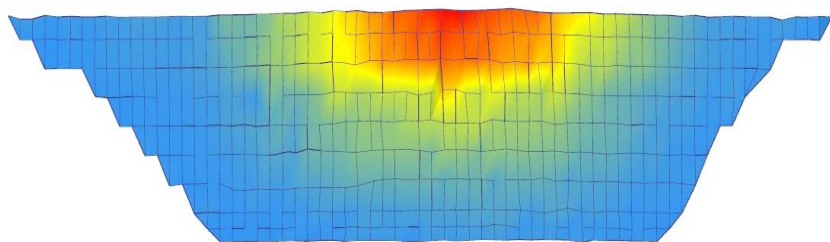
3. Математические модели в составе систем мониторинга



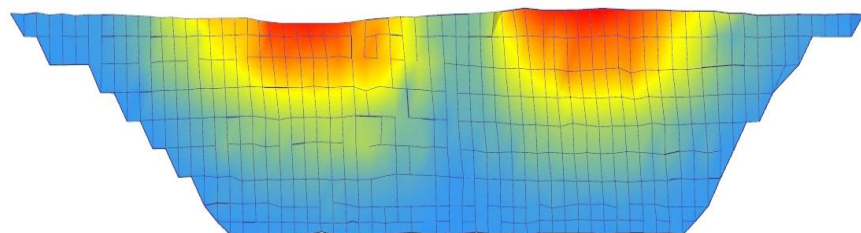
Динамическая базовая модель системы «основание – водохранилище – плотина – здание станции Саяно-Шушенской ГЭС»

ВНИИГ 2022 г. УВБ 500 м

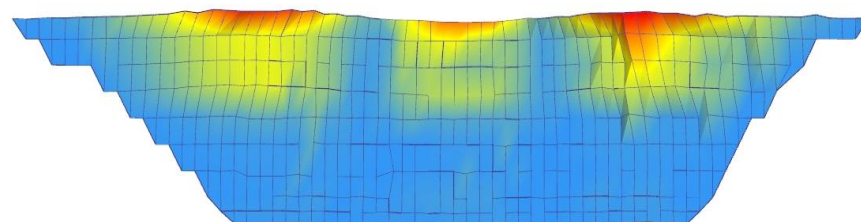
Первая частота, 1.27 Гц



Вторая частота, 1.37 Гц

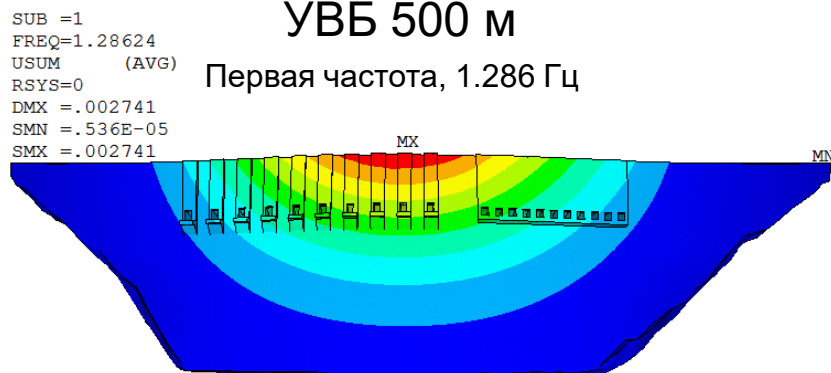


Третья частота, 1.68 Гц

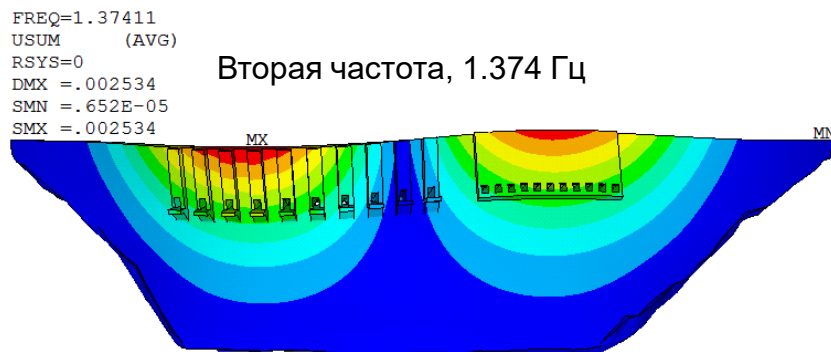


УВБ 500 м

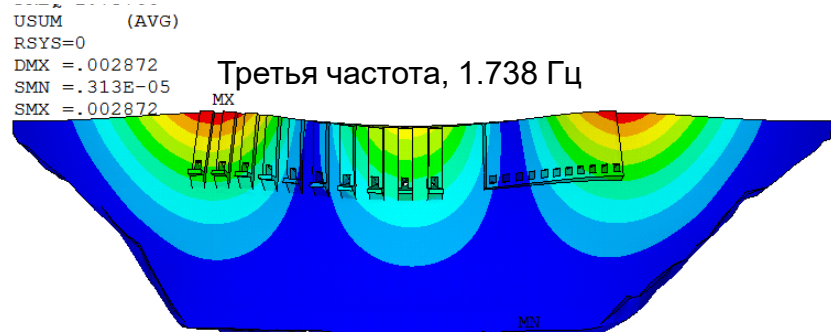
Первая частота, 1.286 Гц



Вторая частота, 1.374 Гц



Третья частота, 1.738 Гц



3. Математические модели в составе систем мониторинга



Сопоставление расчетных и натуральных собственных частот плотины

Сопоставление с данными МСВ, 1999 г.

№	Натурные измерения [40], МСВ, 1999, Гц		№	Расчетная частота собственных колебаний, Гц					
				540 м			500 м		
	539 м	500 м		f , Гц	Δ , Гц	δ , %	f , Гц	Δ , Гц	δ , %
1	1.129	1.236	1	1.1181	0.0109	0.97	1.2861	0.0501	3.90
2	1.217	1.325	2	1.2162	0.0008	0.07	1.3738	0.0488	3.55
3	1.527	1.633	3	1.5365	0.0095	0.62	1.7373	0.1043	6.00
4	1.921	2.035	5	1.9651	0.0441	2.24	2.2044	0.1694	7.68
5	2.448	2.531	8	2.4709	0.0229	0.93	2.7457	0.2147	7.82
6	2.972	3.064	11	3.0077	0.0357	1.19	3.3118	0.2478	7.48

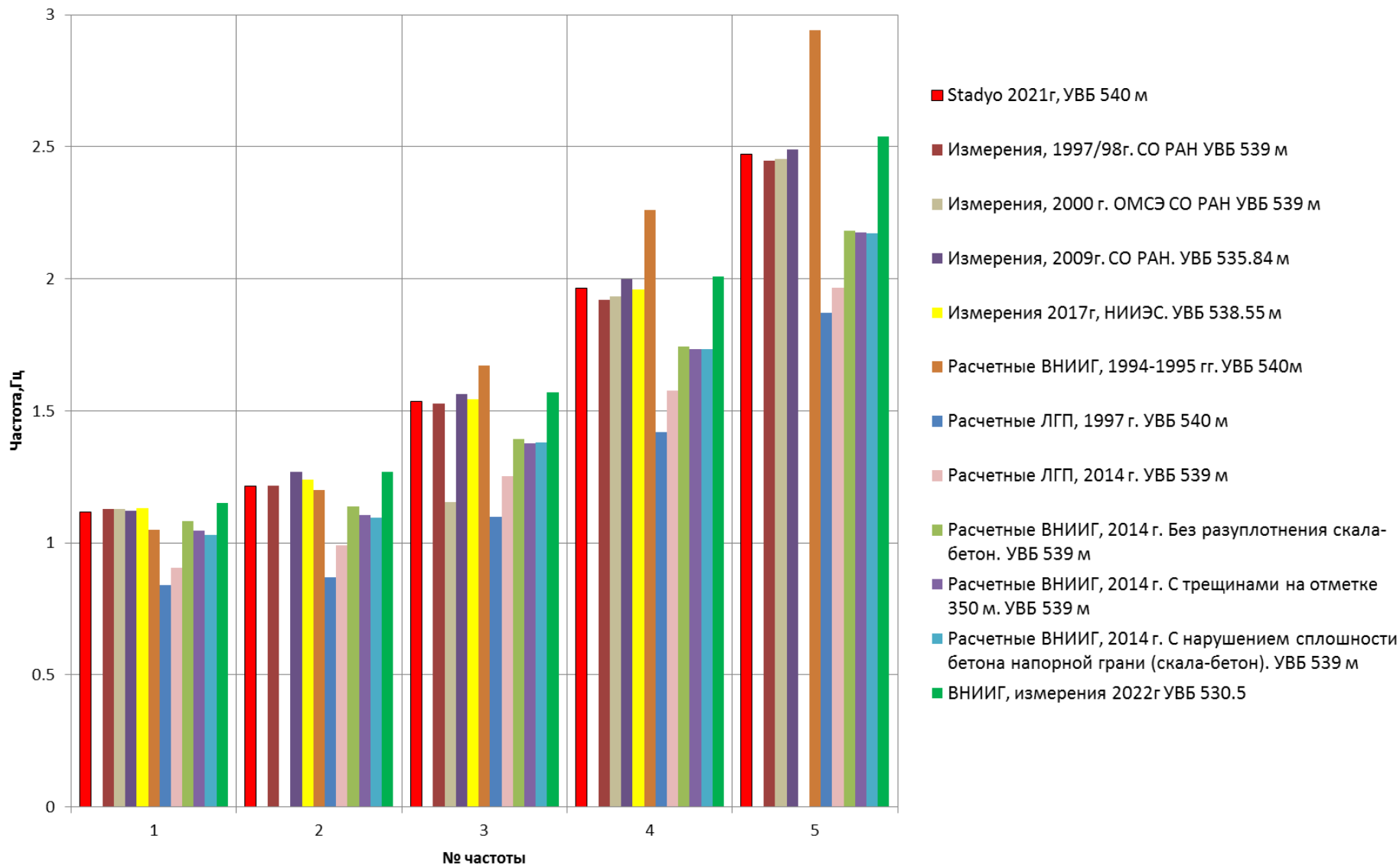
Сопоставление с данными ВНИИГ, 2022 г.

№	Динамический паспорт, ВНИИГ, 2022, Гц		№	Расчетная частота собственных колебаний, Гц					
				540 м			500 м		
	539 м	500.5 м		f , Гц	Δ , Гц	δ , %	f , Гц	Δ , Гц	δ , %
1	-	1.27	1	1.1181	-	-	1.2861	0.0161	1.25
2	-	1.37	2	1.2162	-	-	1.3738	0.0038	0.28
3	-	1.68	3	1.5365	-	-	1.7373	0.0573	3.30
4	-	2.10	5	1.9651	-	-	2.2044	0.1044	4.74
5	-	2.61	8	2.4709	-	-	2.7457	0.1357	4.94
6	-	3.16	11	3.0077	-	-	3.3118	0.1518	4.58

3. Математические модели в составе систем мониторинга



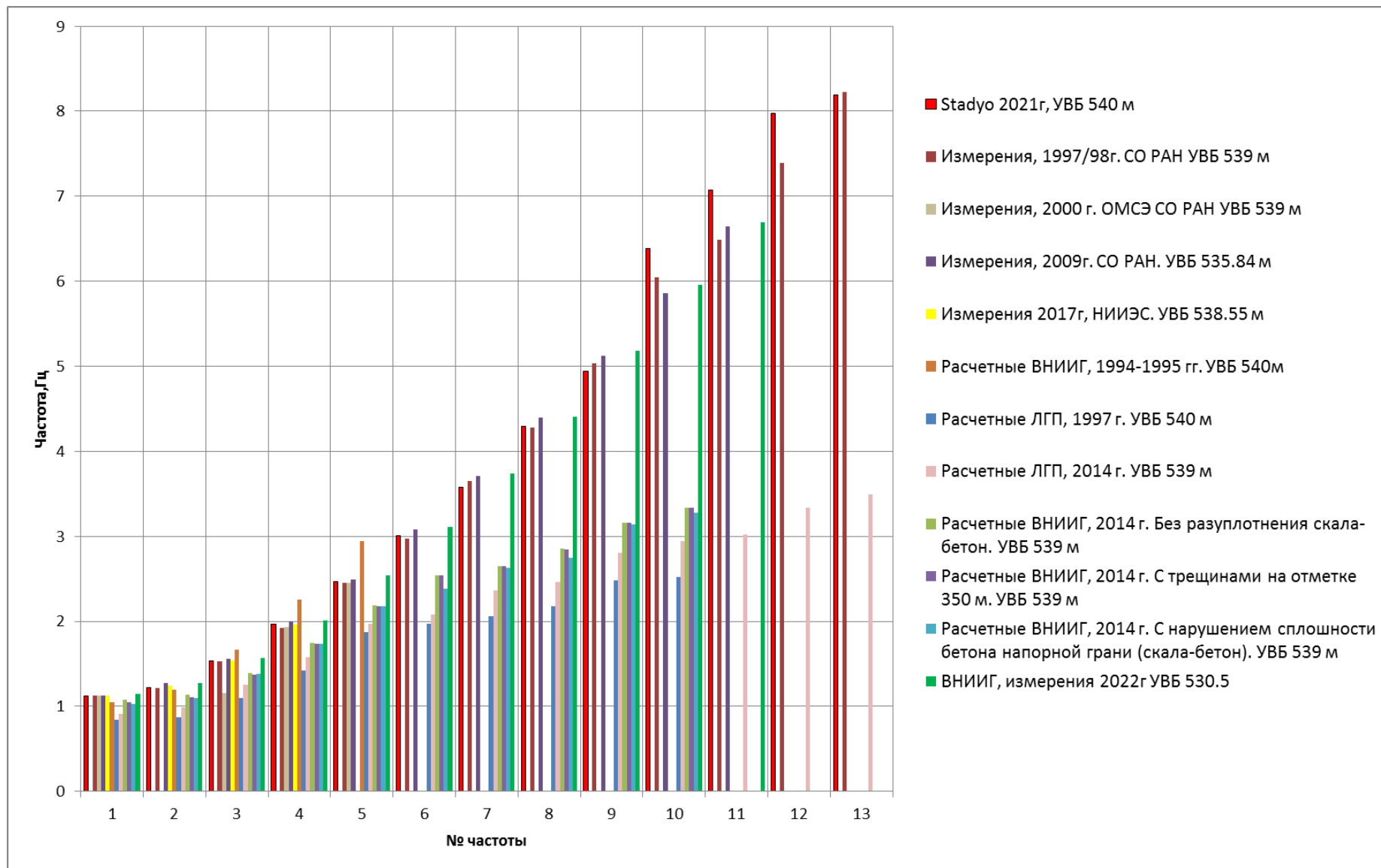
Сопоставление расчетных и натурных собственных частот плотины, Гц. УВБ: 535-540 м



3. Математические модели в составе систем мониторинга



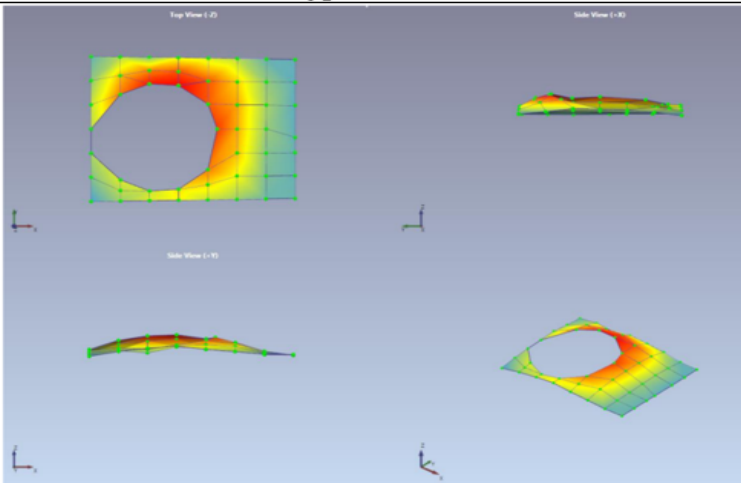
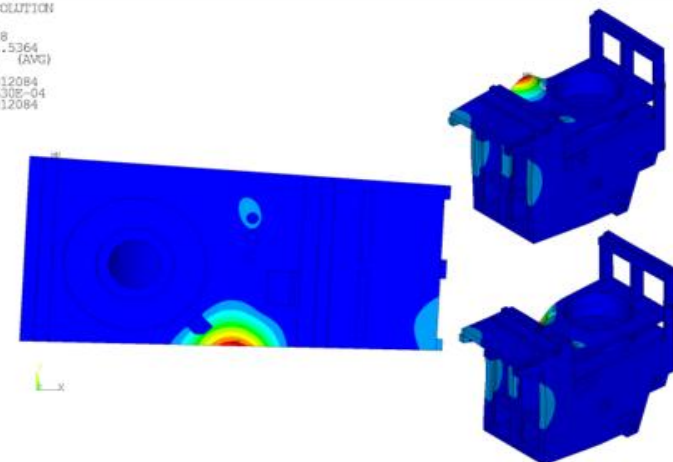
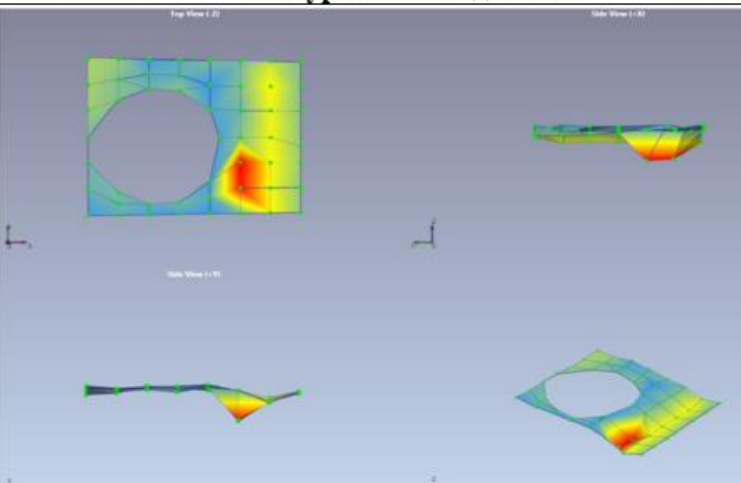
Сопоставление расчетных и натурных собственных частот плотины, Гц. УВБ: 535-540 м



3. Математические модели в составе систем мониторинга



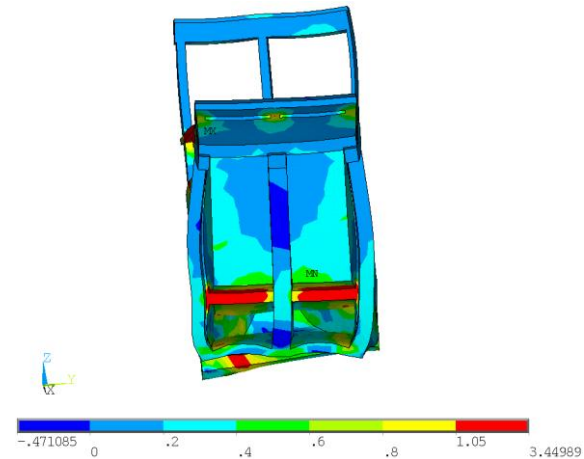
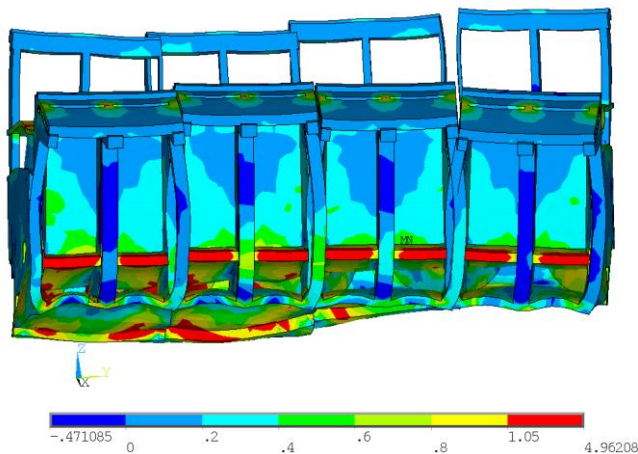
Верификация по динамическим характеристикам плиты машинного зала на отм. +327,00

Численная модель №9 Не выявлена	Натурные исследования  3.6 Гц
Численная модель №9 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =318 FREQ=14.5364 USUM (AVG) REYS=0 LXX =.012084 SNX =.530E-04 SNX =.012084  14.54 Гц (13.42 – 26.24 Гц)	Натурные исследования  15.5 Гц

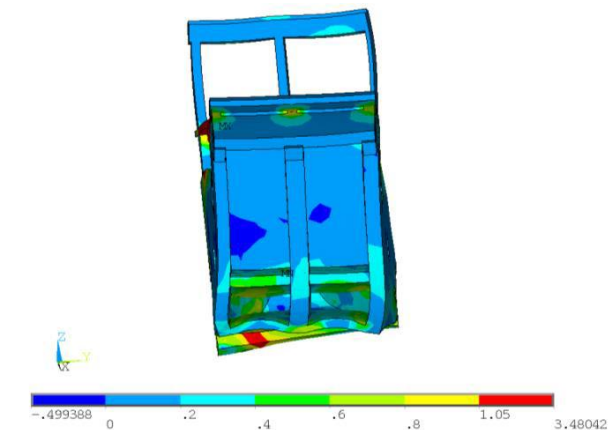
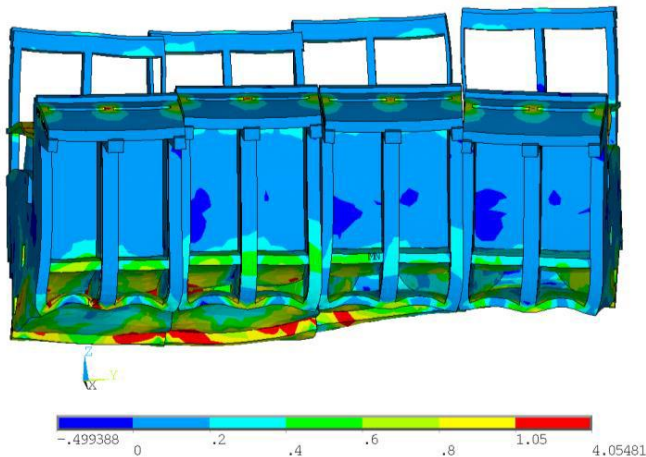
3. Математические модели в составе систем мониторинга

Оценка влияния изменения деформационных свойств основания относительно их проектных значений на изменение НДС здания СШГЭС

Проведена оценка влияния гидростатического давления на НДС конструкций здания станции
Первые главные (растягивающие) напряжения, МПа



С гидростатикой НБ. УНБ 324 м.



Без гидростатики НБ.

4. Экспертиза причин обрушения

Экспертиза расчетов зданий и сооружений с использованием верифицированных программных комплексов:

- ↪ экспертиза расчетов зданий и сооружений с использованием верифицированных программных комплексов;
- ↪ экспертиза расчетных методов и программных средств, используемых при проектировании и исследованиях зданий и сооружений;
- ↪ квалификационная проверка и аттестация специалистов, выполняющих расчеты по программным комплексам, прежде всего, при разработке экспертных заключений;
- ↪ строительно-техническая экспертиза состояния, причин локальных разрушений и обрушений зданий и сооружений.

