

# **Авария на Саяно-Шушенской ГЭС и научно-техническое сопровождение ее восстановления**

член-корр. РАН, ректор Федоров М.П.  
д.т.н., профессор, зав. каф. Елистратов В.В.

**Санкт-Петербургский государственный  
политехн [900igr.net](http://900igr.net) университет**

# Вид здания ГЭС с гребня плотины и работа водосброса (2400 куб. м/с)





# Саяно-Шушенская ГЭС 29 января 2010 года





# Агрегат №2 в шахте 17.08.09



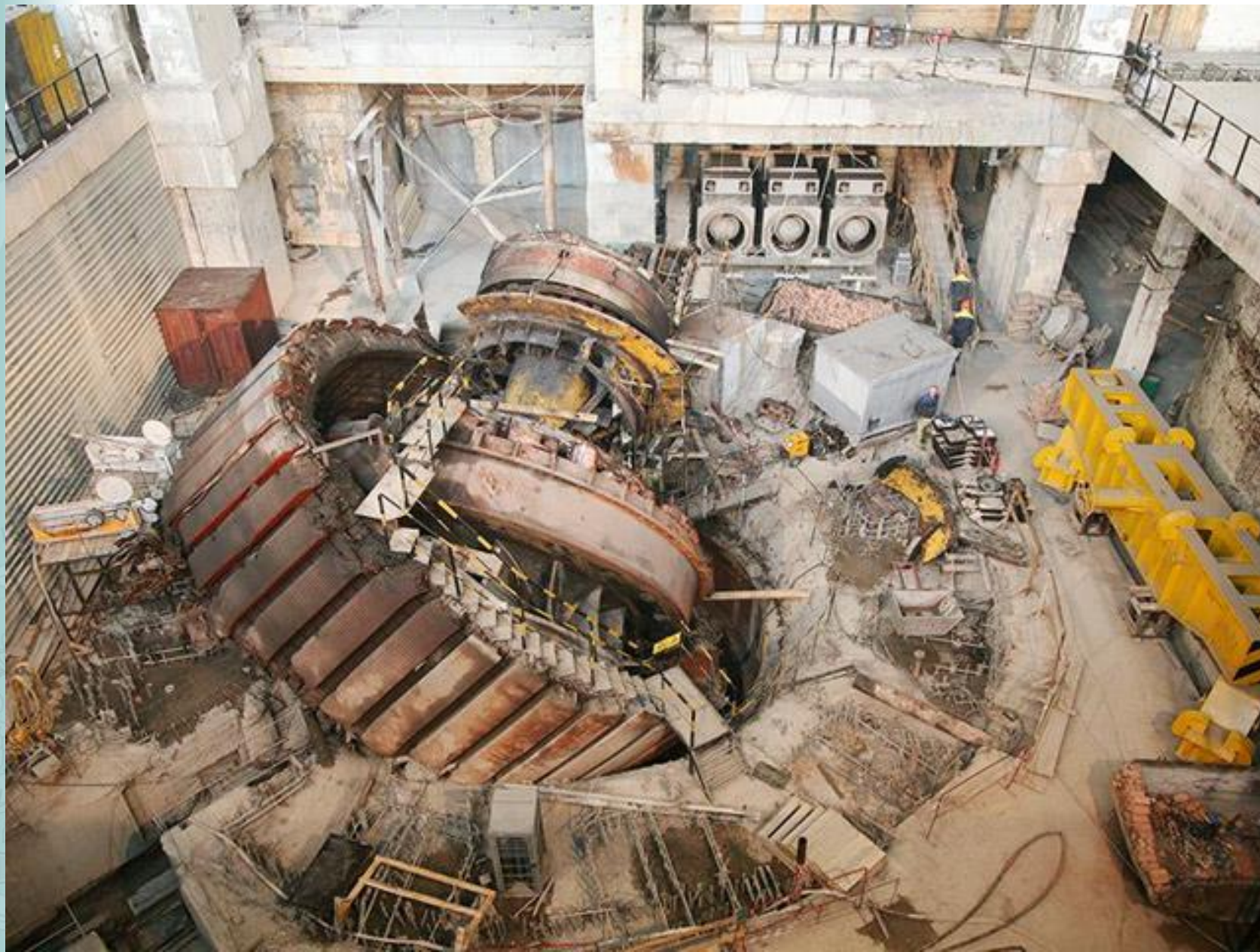




Разрушенный гидроагрегат



# Гидроагрегатный блок №2





# Вид здания ГЭС со стороны нижнего бьефа



# Зимняя эксплуатация водосброса





# Причины аварии

Анализ причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года на Саяно-Шушенской ГЭС, показывает, что это была **комплексная системная авария**, явившаяся сочетанием технических, организационных, управленческих причин,

## Технические

- в качестве катализатора аварии следует назвать повышенные вибрации в гидроагрегате №2, в том числе при прохождении запрещенной для работы зоны при пуско-остановочных операциях и регулировании нагрузки
- продолжительная эксплуатация ГА-2 с недопустимо сильной вибрацией;
- недопустимый усталостный износ шпилек крепления фланцевого соединения крышки турбины № 2 к статорному кольцу
- Отсутствие на гидроагрегатах защит, адекватными уровнем опасности и уникальности СШГЭС, отсутствие резервирования собственных нужд ,

## Организационные

- ослабление технологической дисциплины и ответственности, отсутствие полноценного контроля за техническим состоянием оборудования
- снижение роли ремонтно-восстановительных работ, ремонты выполняют неквалифицированные организации без шеф-контроля со стороны производителей оборудования.
- отсутствие в нормативной документации положений о систематическом контроле и дефектоскопии наиболее нагруженных и сложных узлов и креплений, особенно для уникального по своим характеристикам оборудования
- отсутствие научно-технического сопровождения процесса эксплуатации уникальных гидроэнергетических комплексов и развития подотрасли в целом



# Причины аварии

## Управленческие

- Неоправданная передача со стороны Системного Оператора функций частотного регулирования с Братской ГЭС на Саяно-Шушенскую ГЭС, приведшая к частому переходу агрегатов (в том числе и 2-ого) через запрещенную зону
- Неправильное перераспределение нагрузки между агрегатами при внутростанционной оптимизации из-за отсутствия полноценной системы диагностики оборудования и мониторинга его состояния



# Научно-технические предложения для повышения безопасности ГЭС

- 1) Решения по сокращению времени принятия решения и минимизации ущерба
  - Новые конструкции аварийно-ремонтных затворов с уменьшенным временем закрытия
  - Использование дополнительных предтурбинных или кольцевых затворов
  - Применение холостых выпусков из спиральной камеры
  - Дублирование и резервирование устройств срабатывания аварийных и предтурбинных затворов
  - Разработка новых систем управления и диагностики агрегатов
- 2) Технические и технологические решения по повышению надежности при проектировании и реконструкции ГЭС и гидроэнергетического оборудования
  - Компоновочные решения приплотинных ГЭС с выносом водосбросов из створа и сооружение береговых водосбросов
  - Ограничение зоны применения приплотинных ГЭС напорами 120-150 м, рекомендовать при больших напорах использовать деривационные схемы
  - Применение каскадных схем и выносом регулирующих емкостей на притоки
  - Выбор единичной мощности агрегата и типа гидротурбины с учетом возможностей регулирования мощности, надежности крепежа и диагностики
  - Применять гидротурбины, не имеющие запрещенных зон (диагональные, двухярусные)
  - Внедрение систем диагностики оборудования на агрегатном уровне и ниже с формированием статистических баз данных состояния оборудования и создание системы управления операционными рисками ГЭС



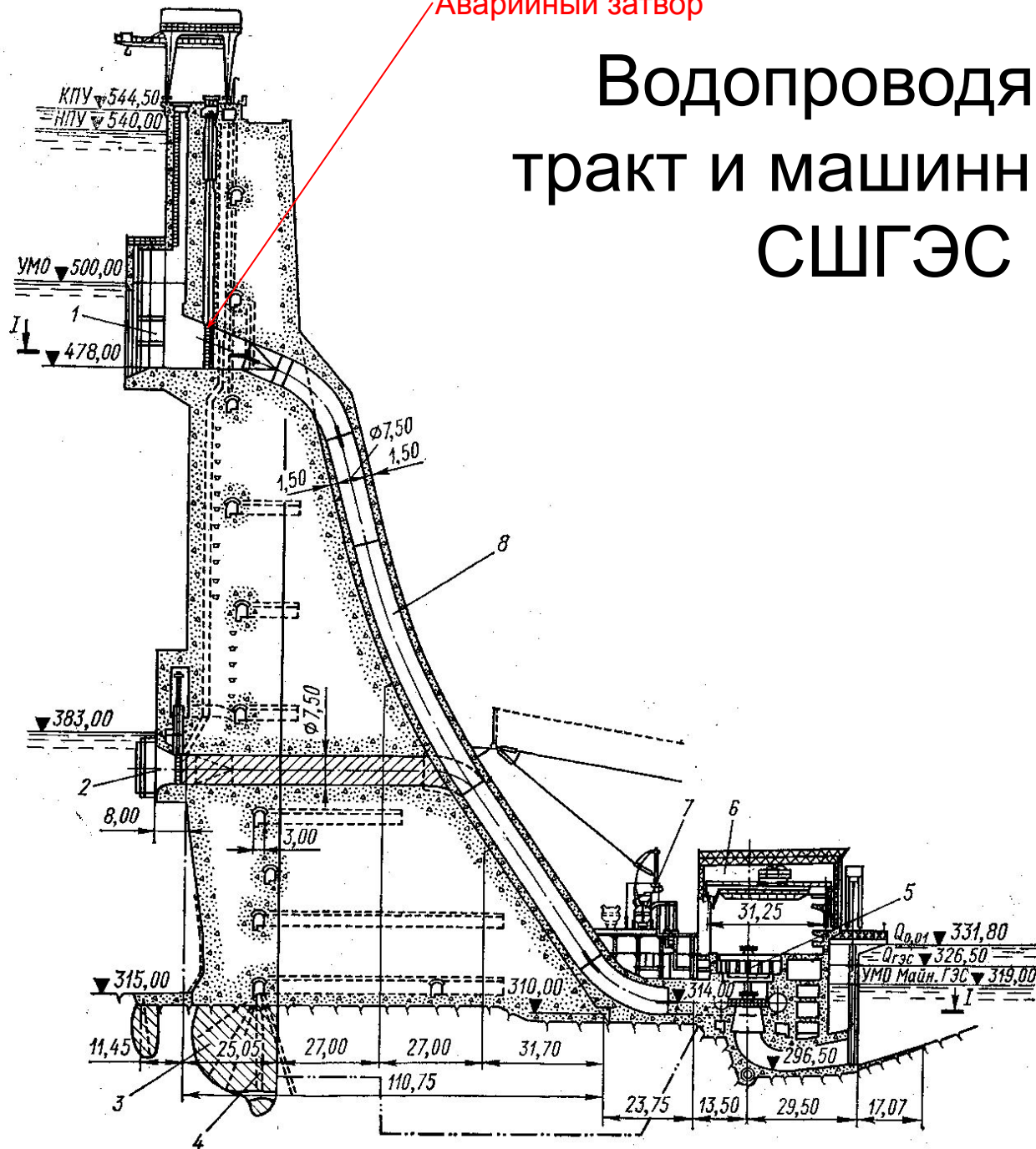
# Научно-технические предложения для повышения безопасности ГЭС (Продолжение...)

## 3) Мероприятия по обеспечению надежности напорного фронта и плотины

- Проведение расчетов напряженно-деформированного состояния плотины с учетом времени эксплуатации и новых методов и средств расчета, учитывающих податливость основания, совместной работы арки и гравитационной составляющей
- Усиление контроля плотины, системы диагностики, всесторонний анализ результатов многолетних наблюдений, разработка рекомендаций по прогнозированию поведения плотины.

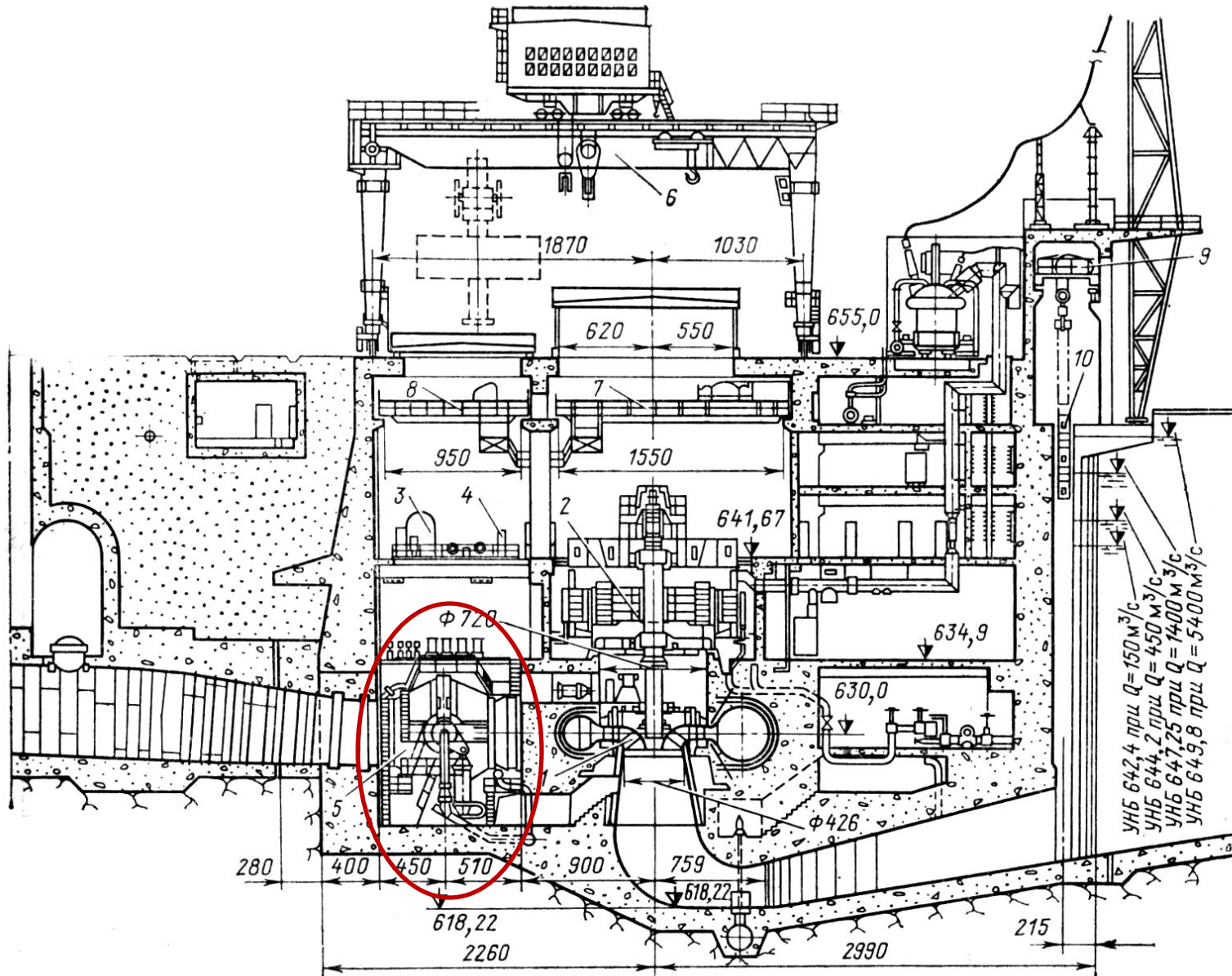
Аварийный затвор

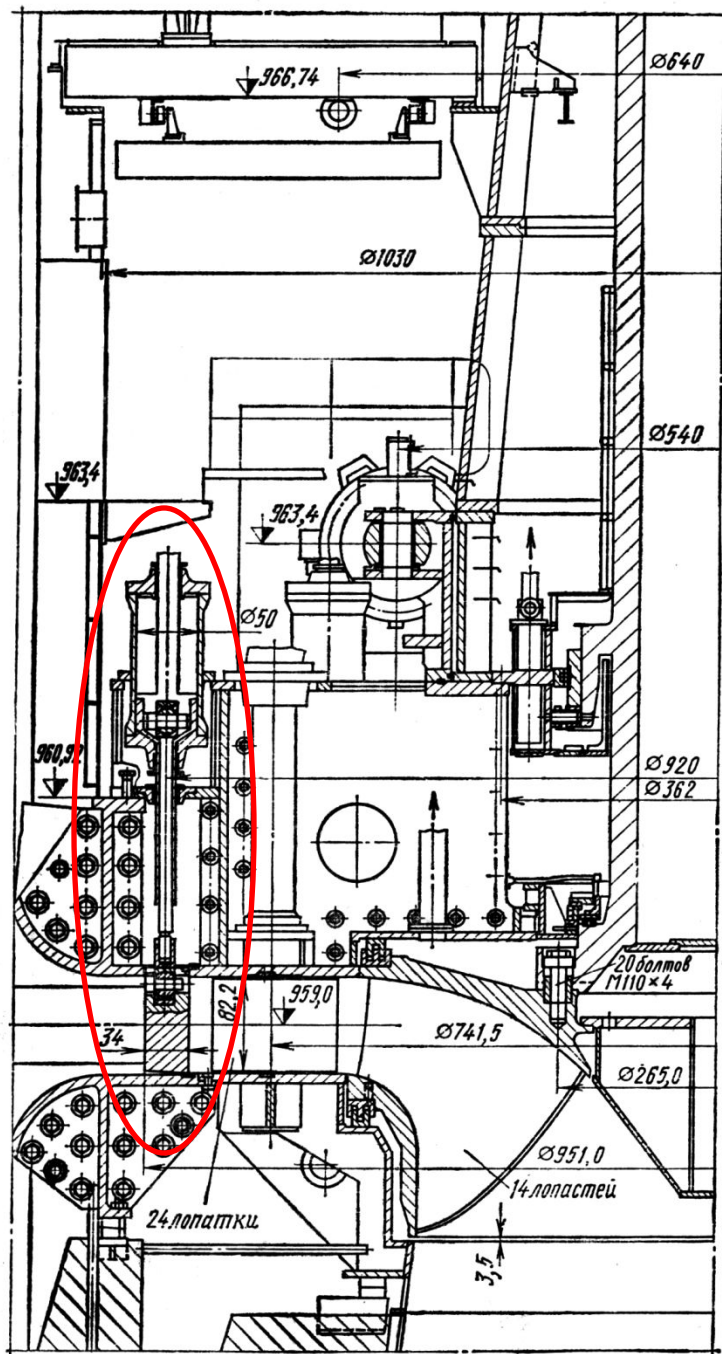
# Водопроводящий тракт и машинный зал СШГЭС





# Компоновка здания ГЭС с предтурбинным затвором (Нурекская ГЭС)

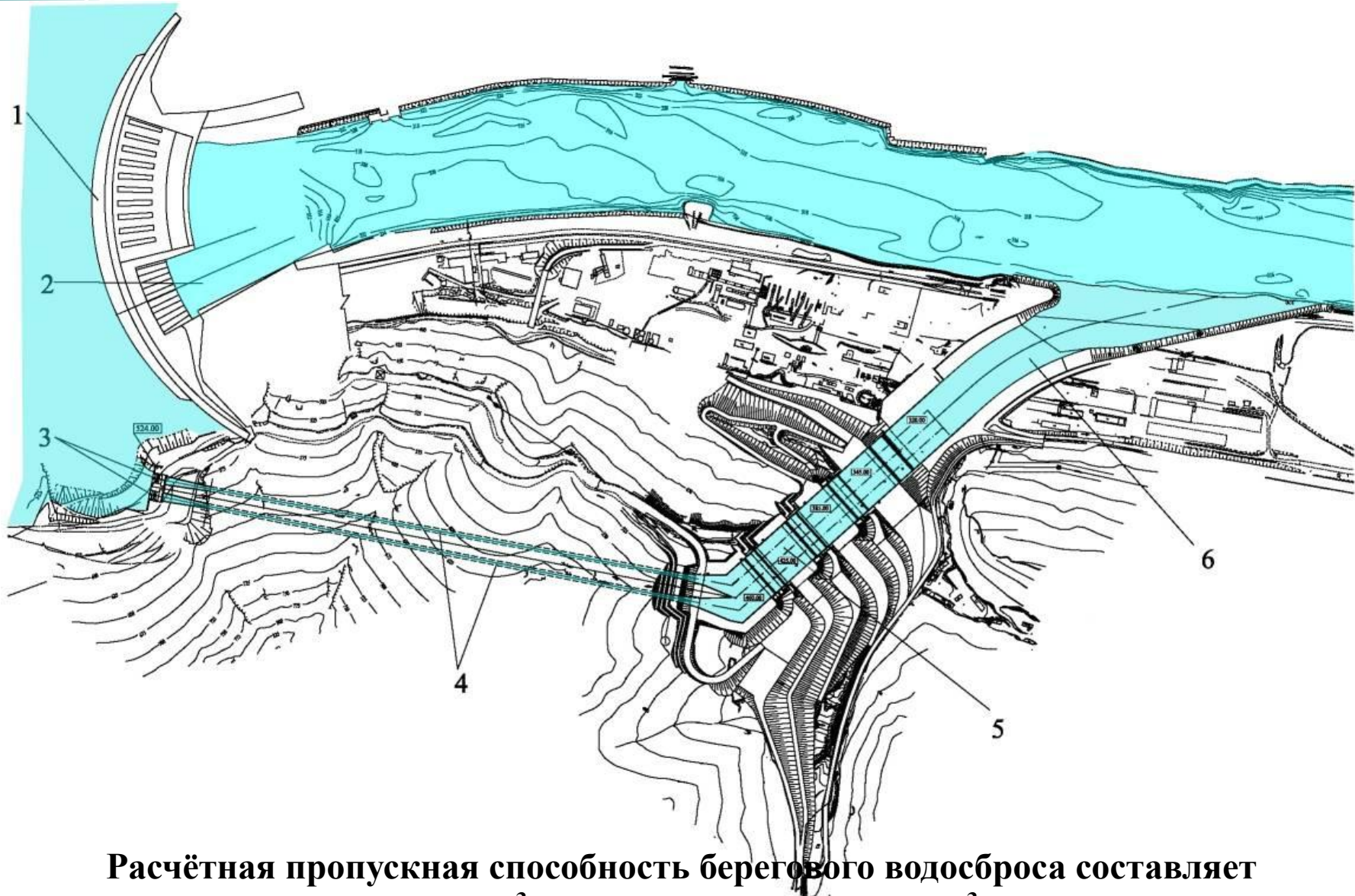




**Кольцевой затвор  
между статором и  
направляющим  
аппаратом  
(проект гидротурбинного  
агрегата Рогунской ГЭС)**

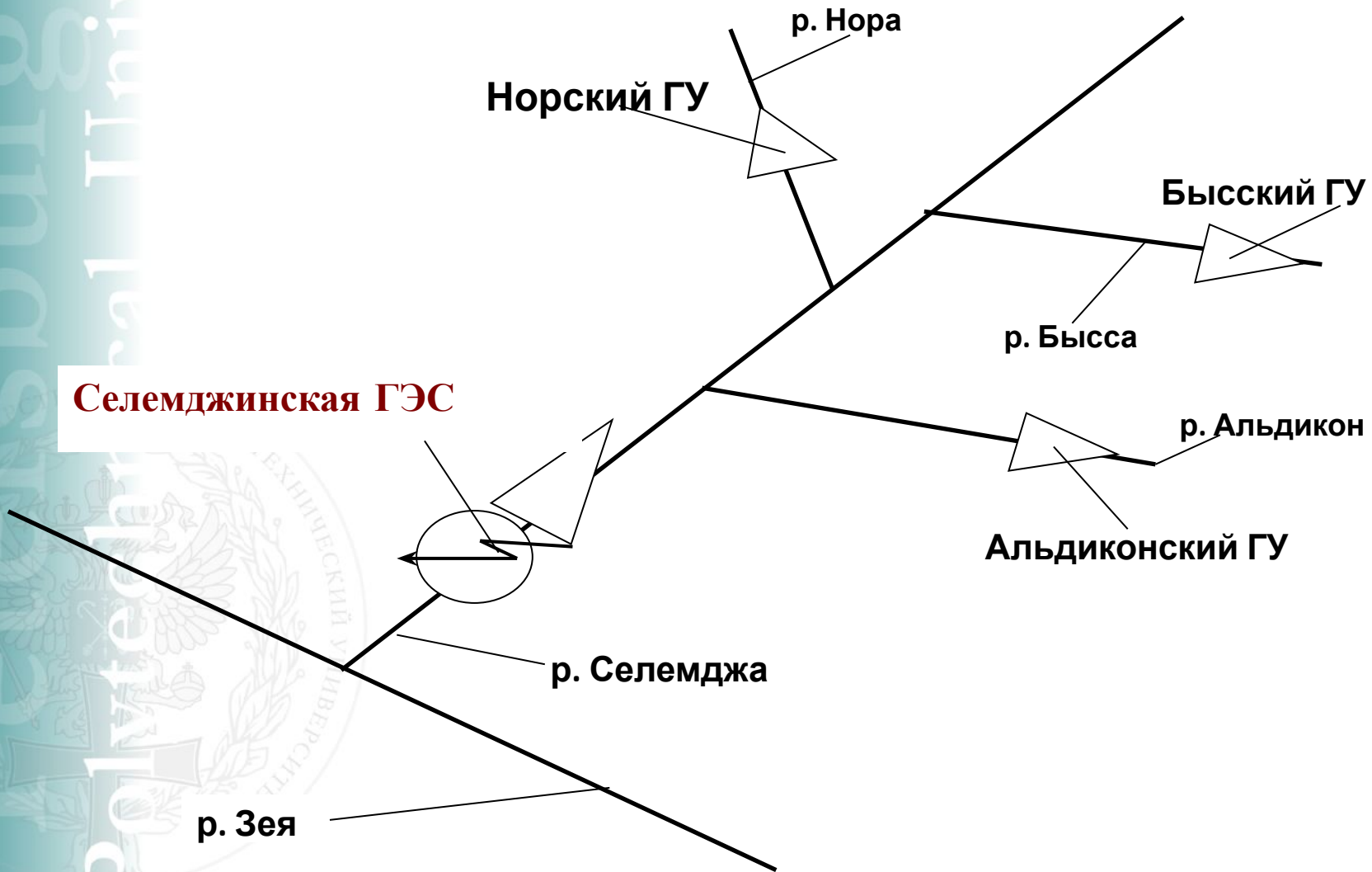


# Разнесение энергетических и водосбросных сооружений ГЭС на примере берегового водосброса СШГЭС)



Расчётная пропускная способность берегового водосброса составляет при НПУ 539,0м - 3650 м<sup>3</sup>/с, при ФПУ 540,0 – 3800 м<sup>3</sup>/с.

# Применение каскадных схем и выносом регулирующих емкостей на притоки

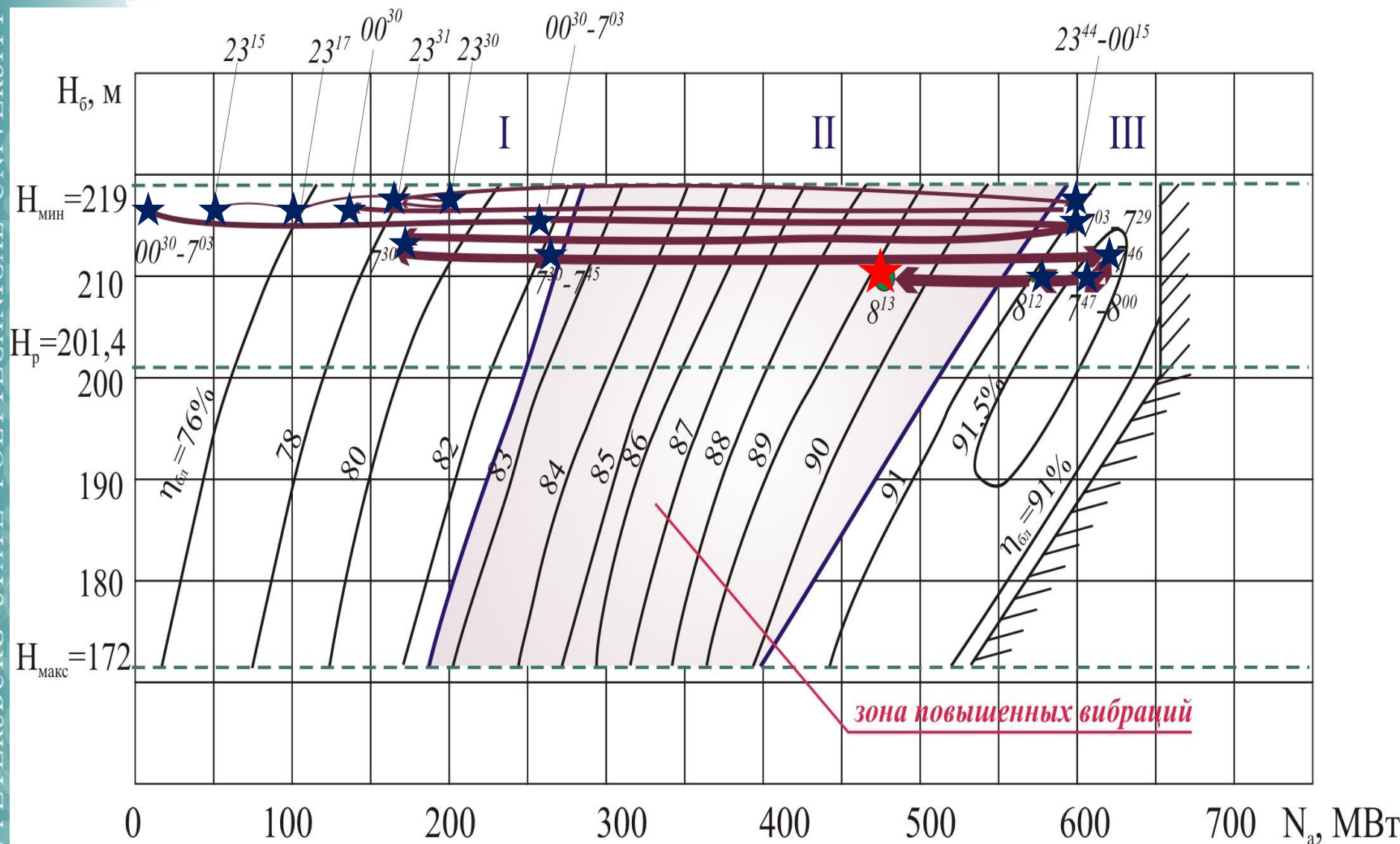




# Соотношение давления на крышку турбины и массы гидроагрегата для ряда ГЭС России

Наименование ГЭС	Мощ-ть агрегата, МВт	Макс. напор, м	Диаметр рабочего колеса, м	Масса гидроагрегата, тн	Макс. возм. отношения силы давления и массы ГА
Волжская	126	27,0	9,3	1500	1,6
Богучанская	340	69,3	7,5	1250	2,4
Усть-Илимская	245	90,0	5,5	800	4,1
Красноярская	500	100,5	7,5	1250	4,7
Братская	255	106,0	5,5	850	4,5
Бурейская	333	122,0	6,0	900	5,8
Ирганайская	205	201,7	4,25	600	8,1
Чиркейская	256	207,0	4,5	700	7,7
Саяно-Шушенская	650	220	6,77	1400	9,1
Ингурская	265	404	4,5	600	19,4
Нурекская	310	275	4,75	850	9,7 18

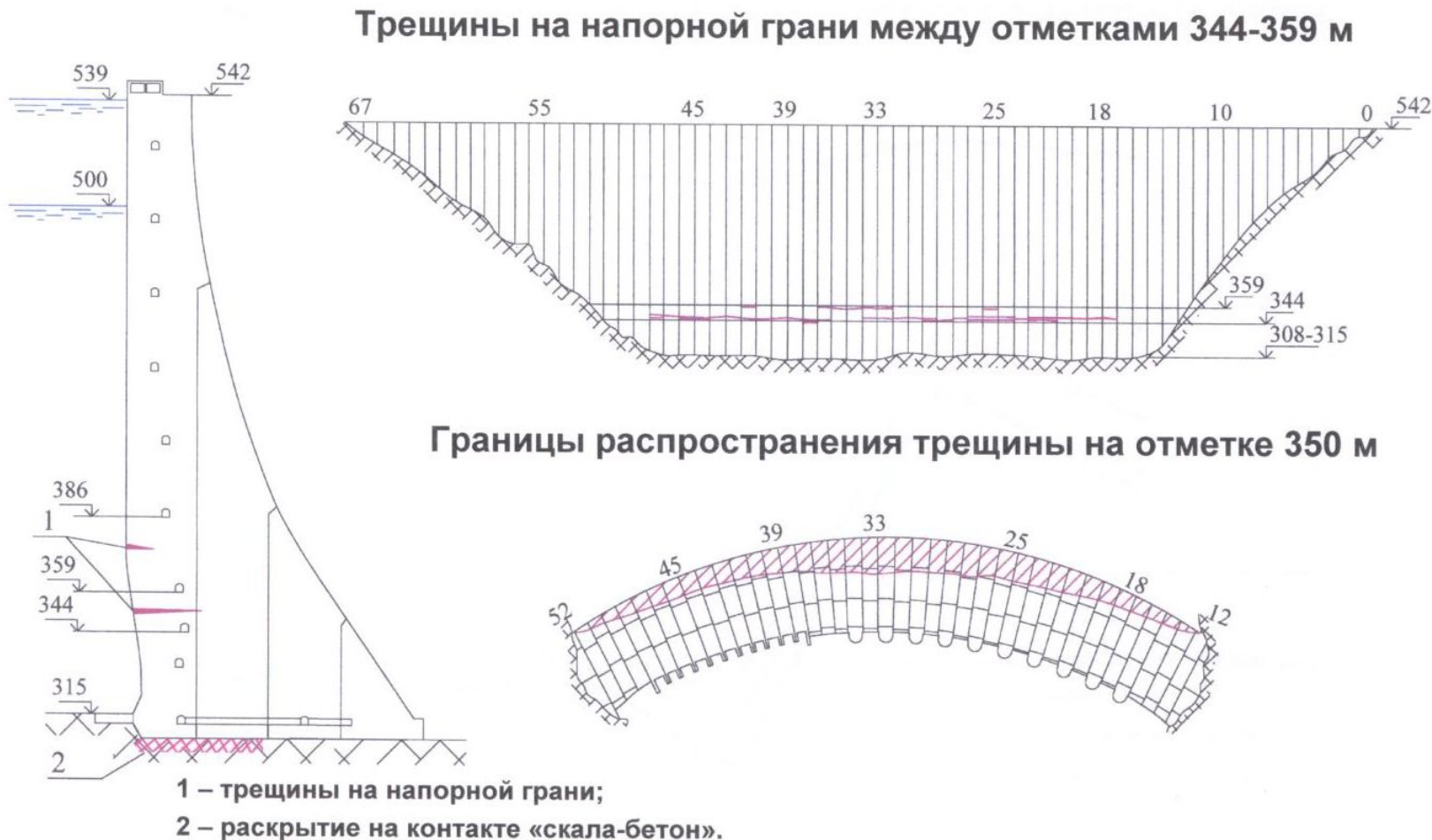
# Эксплуатационная характеристика ГА2 и характер работы перед аварией





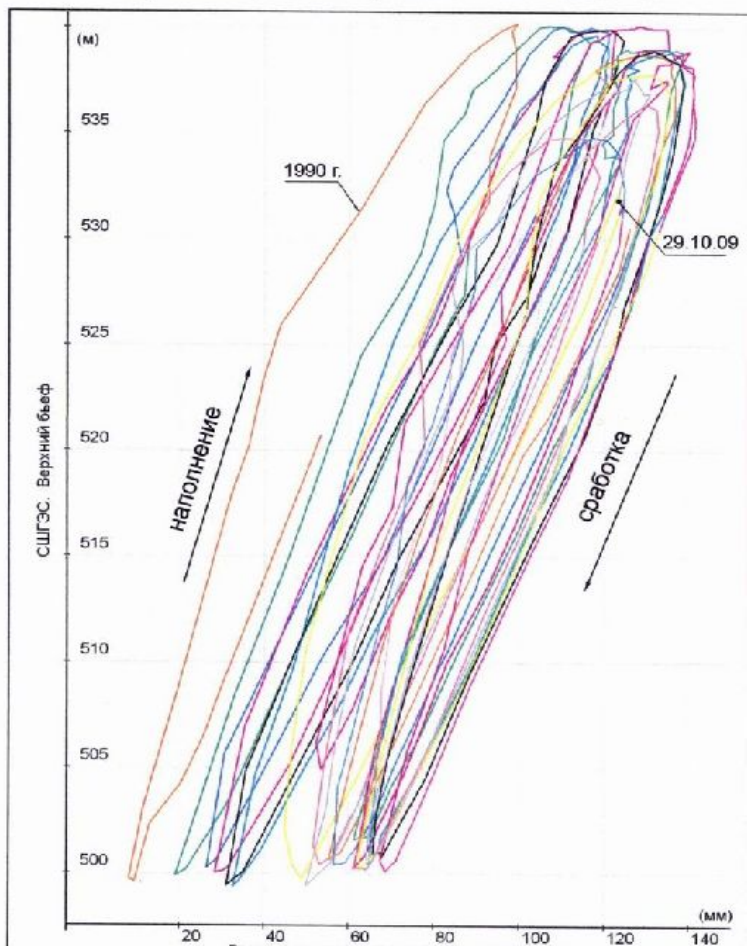
# Мероприятия по обеспечению надежности напорного фронта и плотины

1) Достоверная оценка состояния плотины на основе многолетнего инструментального наблюдения за ее состоянием



2) Создание пространственной (трехмерной) конечно-элементной модели «плотина-основание-береговые примыкания) с учетом межсекционных швов, нелинейных свойств бетона, скальных пород, необратимых перемещений гребня плотины и данных натурных наблюдений с общим количеством неизвестных в модели порядка 1,5- 2,0 миллиона

Перемещение гребня секции 33



Необратимые радиальные перемещения гребня плотины по годам, мм

Год	Секции		
	18	33	45
1990	10.2	15.0	9.9
1991	5.8	8.5	6.4
1992	8.7	4.0	3.7
1993	4.7	5.1	4.3
1994	-	-	-
1995	0.6	1.0	0.2
1996	3.6	10.9	4.4
1997	-	0.6	1.1
1998	-	-	-
1999	2.5	3.7	0.7
2000	2.2	4.4	1.5
2001	-	-	-
2002	1.2	-	-
2003	3.4	3.6	1.3
2004	1.3	1.2	1.4
2005	0.7	1.1	0.4
2006	-	-	-
2007	-	-	-
2008	-	-	-
<b>сумма 90-08</b>	<b>44.9</b>	<b>59.3</b>	<b>35.3</b>

3) Расчет трехмерного напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС, в том числе с учетом изменения условий эксплуатации



# **Научные исследования в рамках ВЦП «Повышение безопасности ГЭС России»**

- **Анализ действующей законодательной и нормативной документации и предложения по их изменению в части повышения надежности и безопасности гидроэнергетических объектов.**
- **Научные основы и методы обоснования продления срока службы гидроэнергетического оборудования и сооружений ГЭС за пределами проектного срока.**
- **Анализ перспективных требований к вторичному регулированию частоты и мощности с участием ГЭС и разработка методов проектирования и управления агрегатами ГЭС.**
- **Разработка методов каскадного и внутростанционного регулирования и управления ГЭС в штатных и аварийных ситуациях в результате механических, гидравлических воздействий и системного регулирования нагрузкой**

# Продолжение...

- **Разработка принципов оптимального формирования сложных природно-технических систем с гидроэнергетическими объектами и оценка надежности и безопасности ее элементов с учетом безопасных проектных компоновочных решений, безопасных и независимых схем управления и обеспечения экологической безопасности бьефов**
- **Разработка основ и принципов создания систем мониторинга и диагностики и расчет состояния оборудования и сооружений на гидроэнергетических объектах.**
- **Разработка методов и исследование трехмерного напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС с учетом взаимодействия плотины с основанием, взаимодействия с водосбросными и водопроводящими сооружениями, нелинейных свойств материала плотины и основания.**



**Спасибо за внимание!**

# Из отзыва СПбГПУ на работу Лобановского Ю.И. «Технические причины катастрофы на Саяно-Шушенской ГЭС (итоги расследования)»

- по мнению автора причиной аварии послужил отказ датчика частоты вращения, приведшего к угону ротора гидроагрегата и отказу систем регулирования и управления. Однако, отказ систем управления произошел в результате короткого замыкания в гидрогенераторе в течении менее 4 секунд после разрушения крепления крышки турбины и попадания воды на обмотки. Если бы угон ГА2 произошел до момента его разрушения, то прошел бы сигнал на сброс аварийного затвора (который срабатывает при угоне на 15%), а этого не произошло;



- **гидроакустический резонанс не может явиться причиной аварии, т.к. наложение спектров, один из которых фиксированный (спектр частот водовода), а другой плавающий (от жгута под рабочим колесом) может приводить в определенные моменты к повышению уровня вибраций, но не к гидроудару. К тому же такое прохождение режимов, сочетание спектров и вибрации происходили неоднократно в процессе эксплуатации гидроагрегата до аварии.**