

Выполнила  
Попова  
Валерия  
группа СУЗ-61

# Методы мониторинга ж/б плотин




# Введение

Плотины являются крупными гидросооружениями, подвергающиеся воздействию водной среды. Они необходимы миру для использования и охраны водных ресурсов. Аварии в данных конструкциях могут быть значительны и сопоставимы с последствиями природных катастроф, поэтому гидротехнические сооружения являются чрезвычайно опасными. Для контроля целостности конструкций и для предотвращения чрезвычайных ситуаций необходим мониторинг и анализ изменений различных параметров сооружения.







# 1. Мониторинг состояния конструкций бетонных плотин с помощью вибрации

---

Данный мониторинг конструкции основан на том принципе, что повреждение обычно изменяет структурные характеристики, такие как жесткость, которые проявляются в измеренной вибрационной реакции сооружения. Следовательно, извлеченные признаки изменения из периодически отбираемых динамических ответов конструкции могут служить индикаторами структурного состояния оцениваемой системы.



# 1.1 Особенности

- Постоянный динамический мониторинг бетонной арочной плотины.
- Автоматический модальный анализ с использованием метода (SSI-Cov).
- Снижение эксплуатационного и экологического воздействия на собственные частоты.
- Численное моделирование повреждений и обнаружения повреждений.





## 1.2 Инструменты, используемые для обнаружения повреждений на основе вибрации

Основная идея установки систем мониторинга работоспособности конструкций (SHM) состоит в хранении данных, когда система или конструкция работают в нормальных условиях, и использовании данных для построения эталонной модели. Во время последующей эксплуатации системы новые данные сравниваются с эталонными, и любые существенные отклонения принимаются, чтобы указать на новое поведение, которое может соответствовать структурному повреждению.





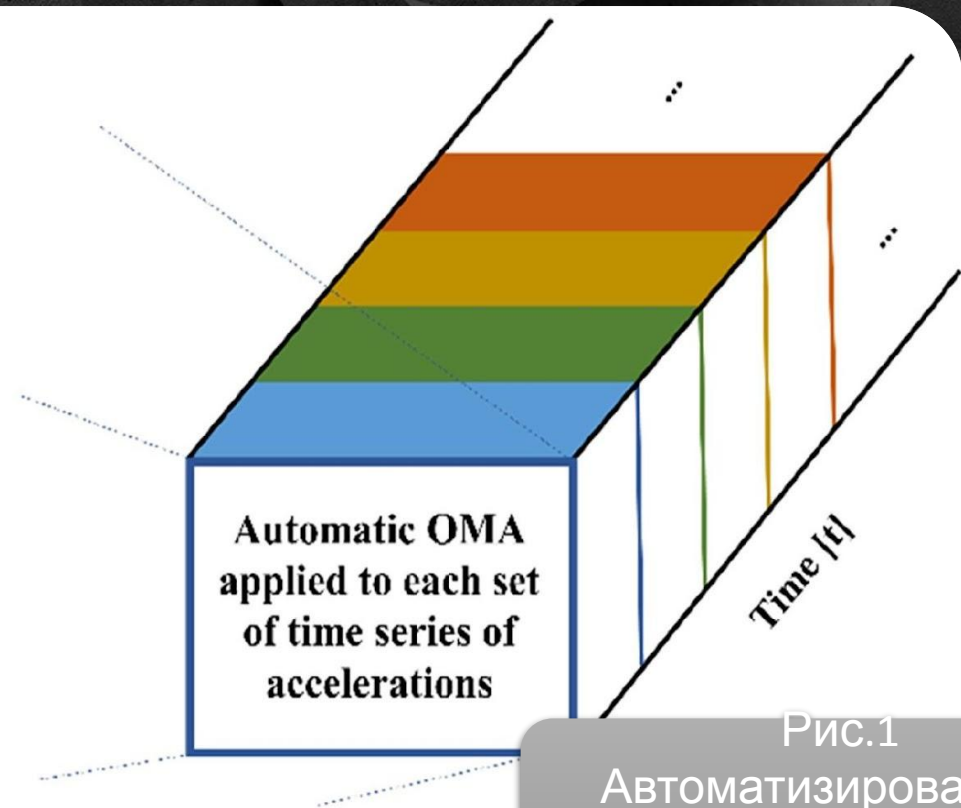
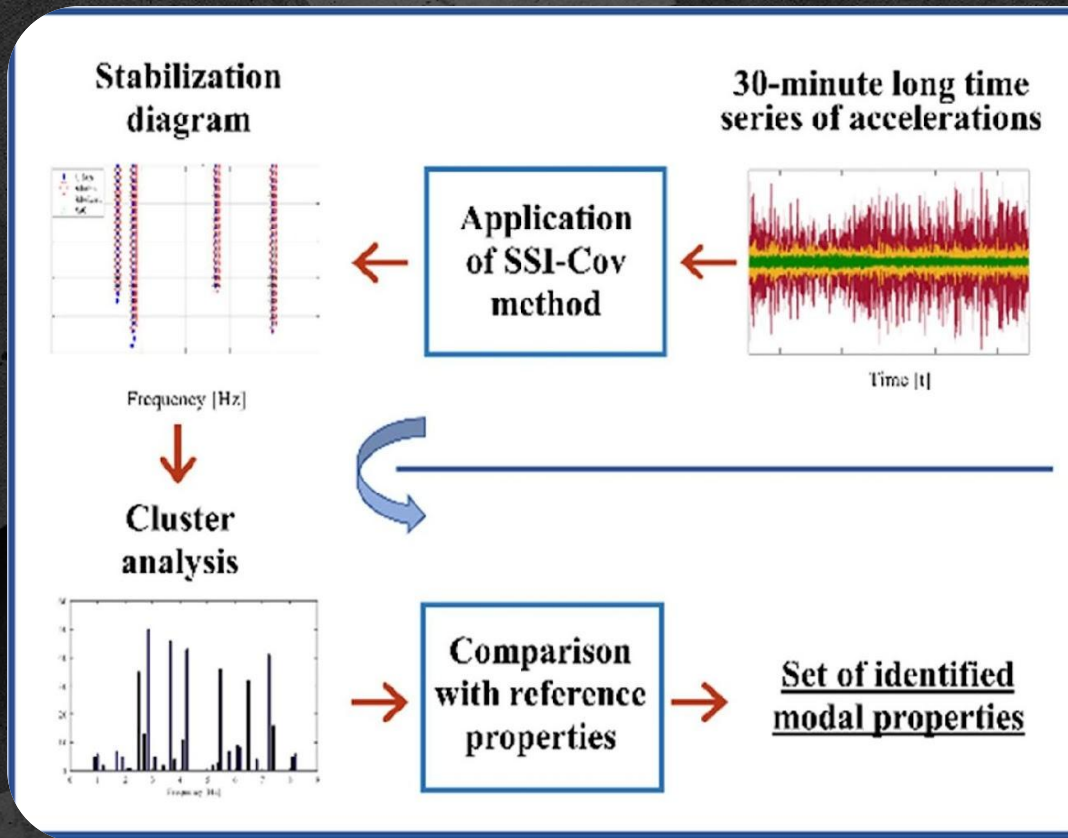


Рис.1  
Автоматизированный операционный модальный анализ

В данной методике используется автоматизированный операционный модальный анализ (АОМА) для непрерывной оценки модальных свойств конструкции, из которых собственные частоты выбираются в качестве функций мониторинга. Процедура начинается с применения метода SSI-Cov к 30-минутным временным рядам частот, после чего все стабильные оценки группируются и сравниваются с нормативными свойствами, что позволяет автоматически идентифицировать собственные частоты, коэффициенты демпфирования и формы колебаний (рис 1).



Важно минимизировать влияние условий окружающей среды и условий эксплуатации на конечный результат по модальным оценкам (нормализация данных) . Простой способ установления взаимосвязей между экологическими и эксплуатационными факторами и оцененными собственными частотами состоит в построении моделей множественной линейной регрессии (MLR) , которые используют линейные корреляции между зависимыми (собственными частотами) и независимыми переменными (частоты от внешних условий).

В данном мониторинге используется многомерный статистический метод, известный как анализ главных компонент (РСА). Он используется для сокращения информации, содержащейся в исследуемых переменных, путем объяснения структуры ее дисперсии с использованием новых, независимых и ортогональных переменных.





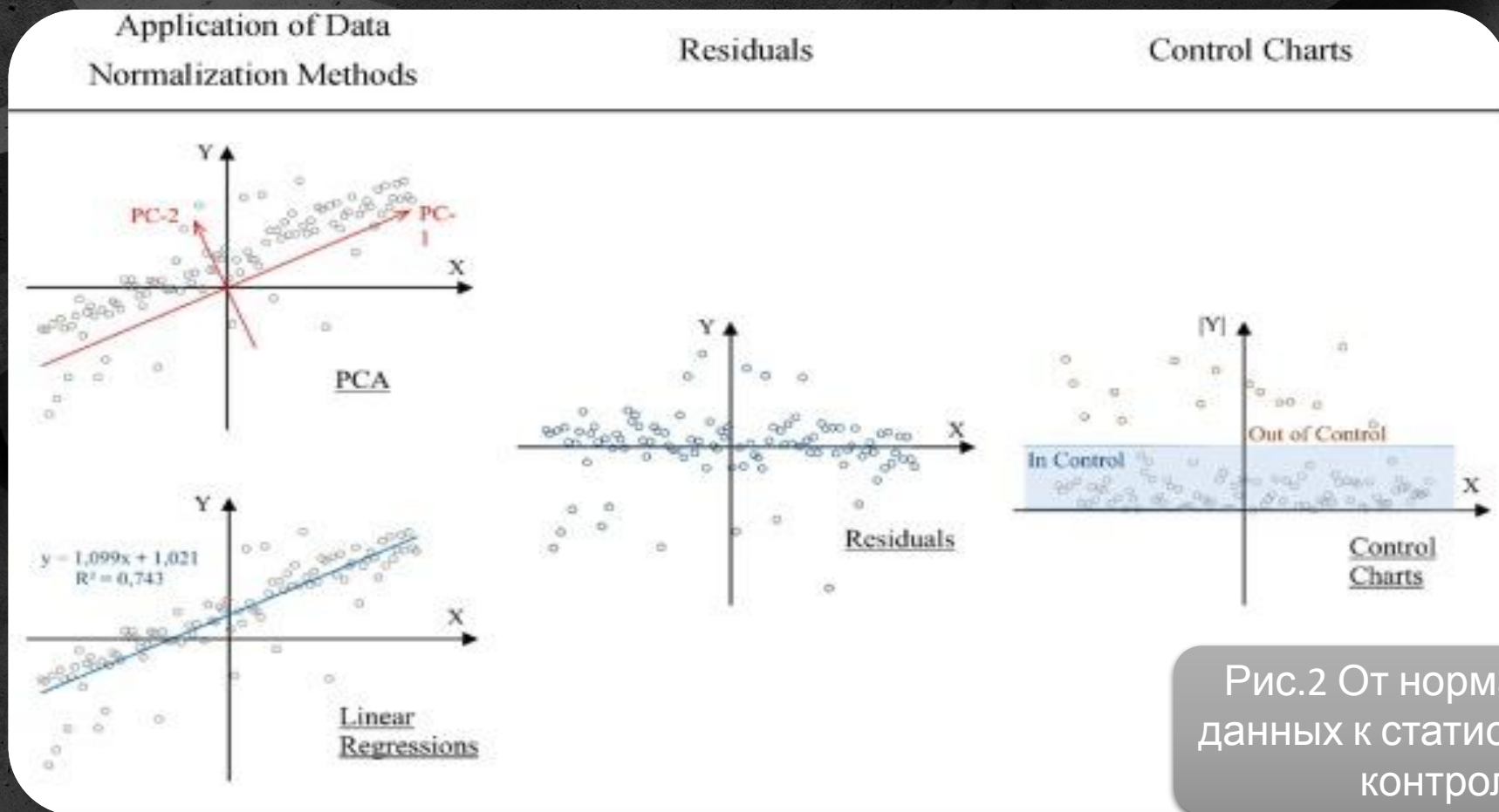


Рис.2 От нормализации данных к статистическому контролю

После применения методов нормализации данных к собственным частотам, полученные остаточные явления, которые были не подвержены влиянию внешних условий, и их эволюция может быть изучена для обнаружения нового структурного поведения конструкции. Инструменты для статистического контролирования процессов, такие как контрольные графики, могут использоваться для оценки эволюции остаточных явлений в заранее определенных пределах, которые отмечают границы допустимых отклонений данных по общим причинам. Графическое представление из рассматриваемых процедур представлена на рис 2 .



### 1.3 Мониторинг арочной плотины Байшу-Сабор. Описание системы динамического мониторинга.

Байшу-Сабор - бетонная арочная плотина двойной кривизны, расположенная на северо-востоке Португалии. Высота плотины 123 м, ширина гребня 6 м, длина 505 м. Тридцать два вертикальных бетонных блока, разделенных вертикальными усадочными швами, составляют арку, которую пересекают шесть горизонтальных посещаемых галерей и одна общая галерея для дренажа, которая контактирует с фундаментом на всей восходящей стороне конструкции. Плотина снабжена водосбросом, состоящим из четырех шлюзов длиной по 16 м. Полный уровень хранения находится на высоте 23 над уровнем моря.

Рис.3 Арочная плотина на Байшу-Сабор





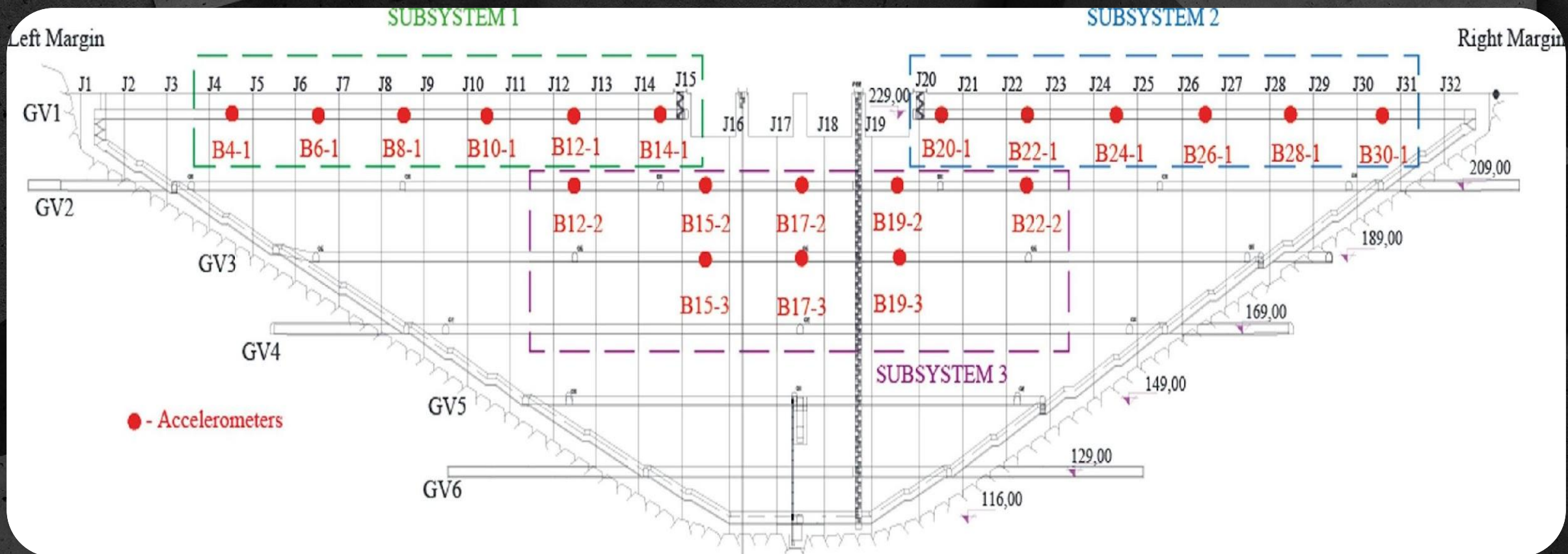


Рис.4 Расположение точек измерения и компонентов подсистем системы динамического мониторинга плотины Байшу-Сабор



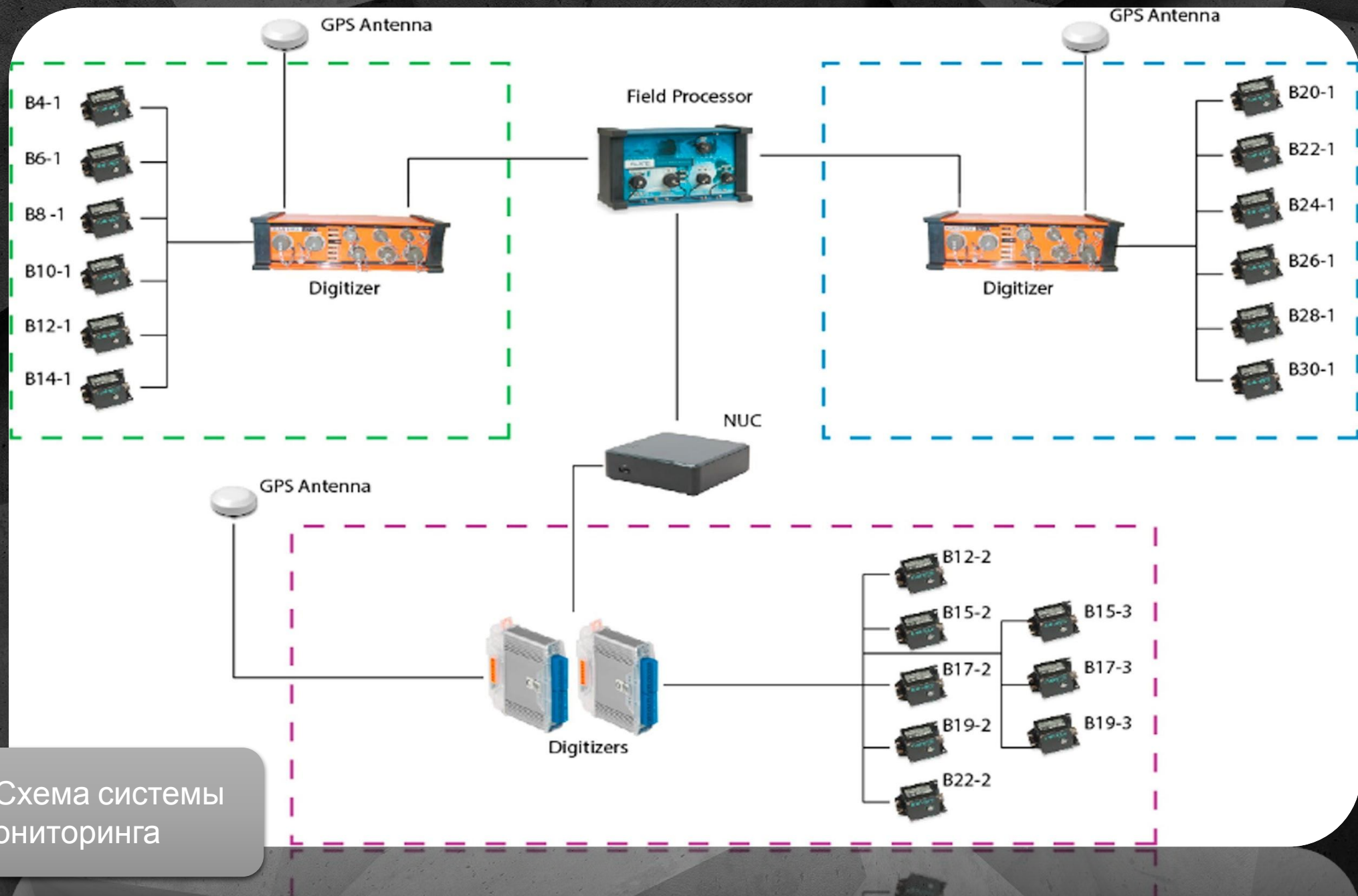



Рис.5 Схема системы мониторинга



# Вывод

- Алгоритмы отслеживания хорошо подходят для приложений с высокой изменчивостью собственных частот
- Уровень воды в водохранилище - это внешний фактор, который больше всего влияет на собственные частоты. Повышение уровня воды приводит к снижению собственных частот и наоборот.
- Сезонные колебания температуры вносят важный вклад в частотные сдвиги, которыми нельзя пренебрегать.
- С помощью моделей множественной линейной регрессии (MLR) можно свести к минимуму влияние факторов окружающей среды и производственных факторов на значения собственных частот и значительно уменьшить изменчивость данных.
- Стабильные контрольные диаграммы стали результатом как прямого применения анализа главных компонент (PCA) к собственным частотам, так и комбинированного применения PCA и MLR.
- Небольшие повреждения вызывают меньшие сдвиги собственной частоты, чем те, которые возникают в результате эксплуатации и воздействия окружающей среды.
- PCA позволило получить контрольные диаграммы, наиболее подходящие для обнаружения





## 2. Мониторинг состояния конструкций бетонных плотин с помощью интерферометрии постоянного рассеивателя GB-SAR на основе серии поднаборов изображений с короткими временными базовыми линиями

---

Появление и развитие технологии наземного SAR (GB-SAR) предлагает эффективные средства контроля деформации для различных типов объектов на земле. Системы GB-SAR, такие как изображение с помощью интерферометрической съемки, собирать данные изображения с высоким пространственным и временным разрешением, а их точность измерения деформации обычно может достигать субмиллиметрового уровня.



## 2.1 Инструменты, используемые для обнаружения повреждений с помощью интерферометрии постоянного рассеивателя GB-SAR

В настоящее время существует два основных режима приложений мониторинга деформации GB-InSAR:

- 1) Непрерывный мониторинг деформации с помощью радарных датчиков с фиксированным рельсом.
- 2) Мониторинг прерывистой деформации с помощью радарных датчиков с нефиксированным рельсом.





Для быстрого расчета деформации в GB-SAR часто используются метод интерферометрического фазового интегрирования во временной области поверхности и метод интерферометрического фазового скользящего среднего. Кроме того, атмосферная коррекция также выполняется путем прямой коррекции интерферометрической фазы между точками мониторинга и реперными точками. Эти методы могут дать надежные результаты только при стабильных атмосферных условиях. Космический постоянный рассеиватель (PS) InSAR (PSInSAR) может преодолевать атмосферные возмущения в интерферометрической фазе.





Метод выполняет анализ временных рядов на основе серий поднабора высококачественных изображений и целевых точек PS.

Полиномиальная модель атмосферной коррекции, основанная на нескольких опорных точках, принята для коррекции основных атмосферных фазовых компонентов интерферограмм. Соответственно корректируется интерферометрическая фазовая модель анализа временных рядов.

Для обработки остаточной фазы модели и фазы шума применяется метод фильтрации, обычно используемый в анализе временных рядов космической системы PSInSAR. Результаты показали, что предложенный метод удовлетворительно учитывает смещение фазы деформации и атмосферной фазы во временной области и вычисляет линейные скорости деформации всего за несколько дней





## 2.2 Мониторинг плотине Гехейан. Описание системы мониторинга.

Данный вид мониторинга был применён на плотине Гехэян - первый крупномасштабный гидроэнергетический проект, разработанный на реке Цинцзян (главный приток реки Янцзы в Китае), и выполняет несколько функций, включая производство электроэнергии, борьбу с наводнениями.

Гехейская плотина представляет собой бетонную гравитационную арочную плотину высотой 151 м; его вершина находится на высоте 206 метров над уровнем моря.

Рис.6 Плотина Гехейан





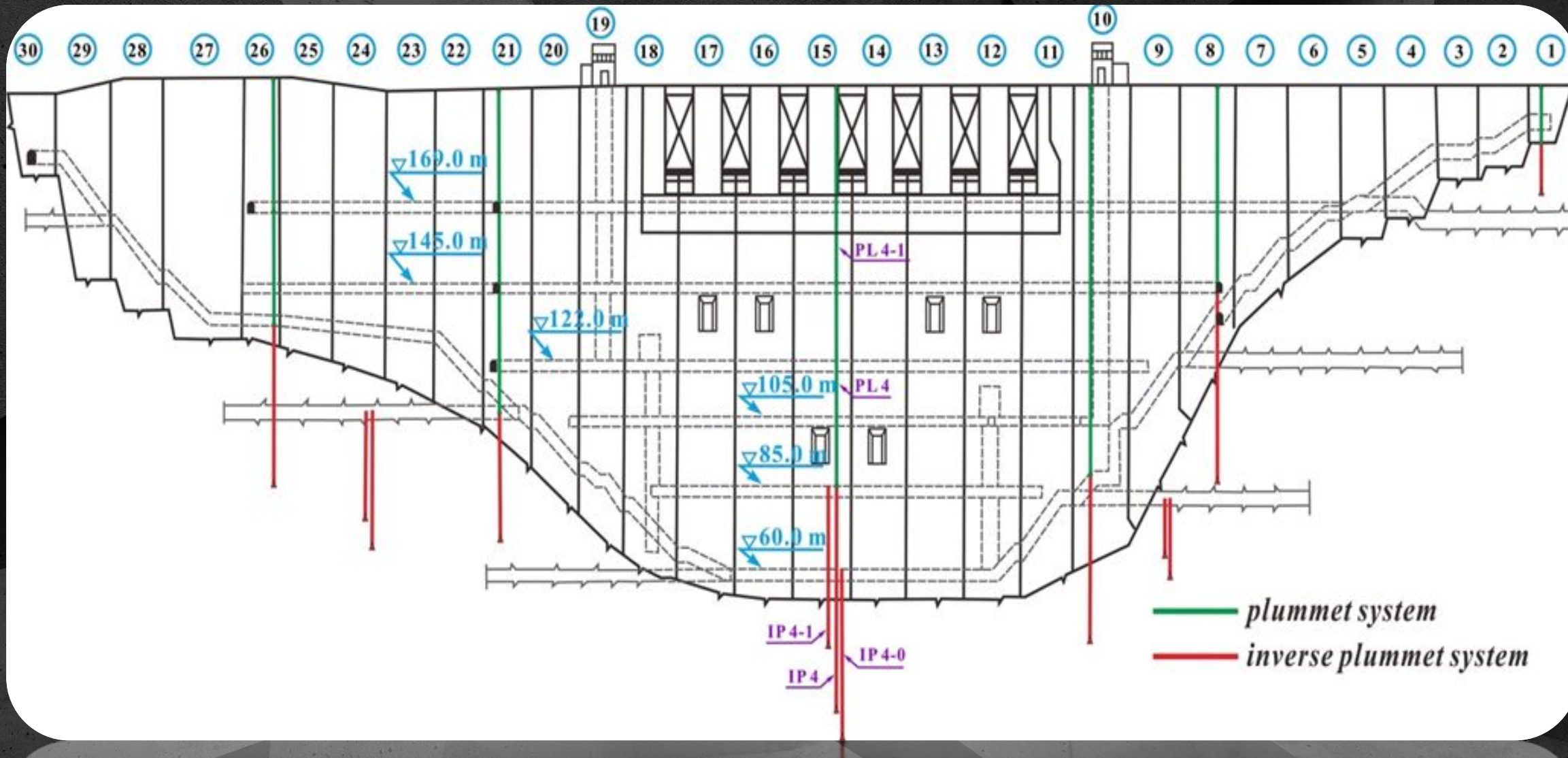


Рис.7 Основное строение поверхности Гехейанской плотины с распределением ее блочных секций и системами автоматического отвеса





Рис.8 . Место установки системы IBIS-L и оптимальный охват луча радара

В этом исследовании передовая система GB-SAR, IBIS-L, использовалась для мониторинга деформации тела плотины и прилегающих территорий. Радиолокационный датчик состоит из приемопередатчика непрерывного сигнала ступенчатой частоты (SFCW), работающего в Ku-диапазоне, и пары антенн (передающей и приемной). Система IBIS-L была установлена и закреплена на бетонном пирсе у дороги на левом берегу реки вниз по течению. Центральная линия от луча радара был ориентирован на правую сторону центральной оси плотины. Основные блоки плотины по обе стороны от ее центральной оси находились в пределах оптимального поля зрения радара.



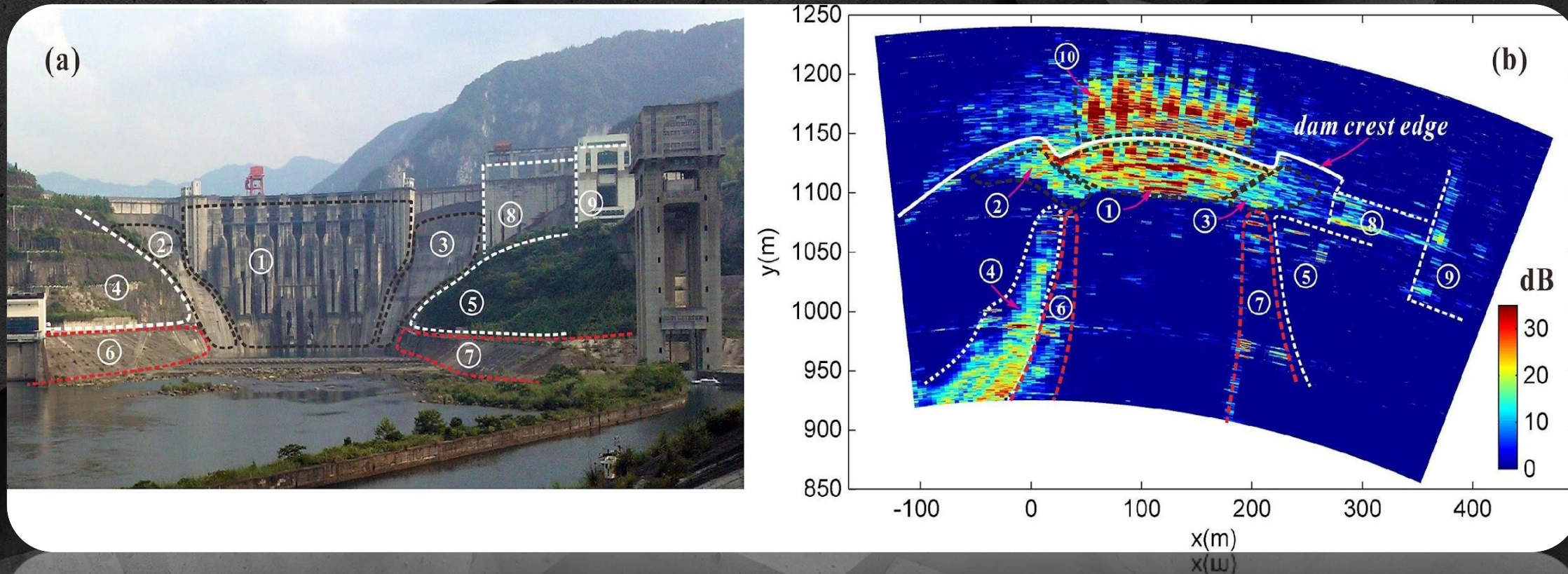


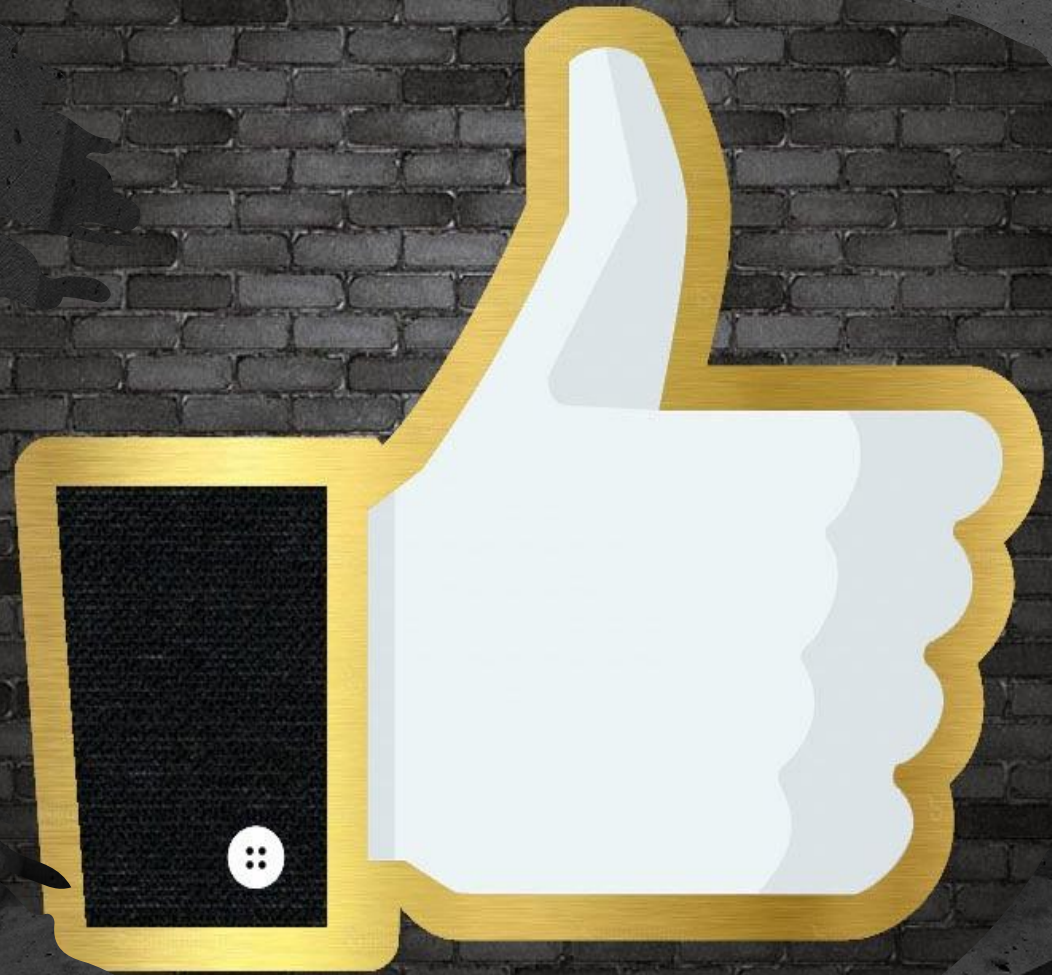
Рис.9 Изображение GB-SAR плотины Гехейан и прилегающих территорий.  
 (a) Распределение тела плотины и прилегающих к ней участков; (b) GB-SAR  
 изображение каждой конструкции

Изображения плотины были собраны в непрерывном режиме GB-SAR. Сбор изображения одной сцены занял около 5,4 мин. Эксперимент длился пять дней и 15 часов. Всего было собрано 1330 изображений GB-SAR.



## 2.3 Результаты

Результаты метода GB-SAR PSI были проанализированы с учетом двух аспектов: скорости деформации и последовательности деформации. Сравнение с существующими литературными результатами и данными отвеса доказало, что метод может надежно оценить скорость линейной деформации с использованием последовательности подмножеств изображений, сформированных небольшим количеством высококачественных изображений GB-SAR, и результаты были сопоставимы с полученными с использованием большого количества непрерывных изображений в предыдущем исследовании.






# Вывод

- Предлагаемый метод позволяет выбрать несколько подмножеств высококачественных изображений за один день для анализа временных рядов, устраняя помехи от изображений низкого качества, что позволяет осуществлять оценку скорости линейной деформации и серии. Скорость деформации имеет более высокую точность внутреннего совпадения.
- Атмосферная коррекция развернутых интерферограмм мало влияет на расчет начальных относительных скоростей линейной деформации и существенно влияет на оценку скорости деформации. Модель полиномиальной атмосферной коррекции может эффективно удалять временные и пространственные главные компоненты атмосферной фазы, что является важным шагом в подавлении суточной атмосферной фазы.





### 3. Структурный мониторинг состояния и обследование плотин на основе фотограмметрии БПЛА с 3D реконструкцией изображения

---

Благодаря недавним достижениям в использовании и доступности платформ беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и развитию простого в использовании программного обеспечения для обработки изображений, фотограмметрия на основе БПЛА все больше применяется для получения топографии с высоким разрешением для изучения процессов на поверхности. Оценка целостности инфраструктуры и обнаружение повреждений крупных сооружений часто выполняется с помощью БПЛА.



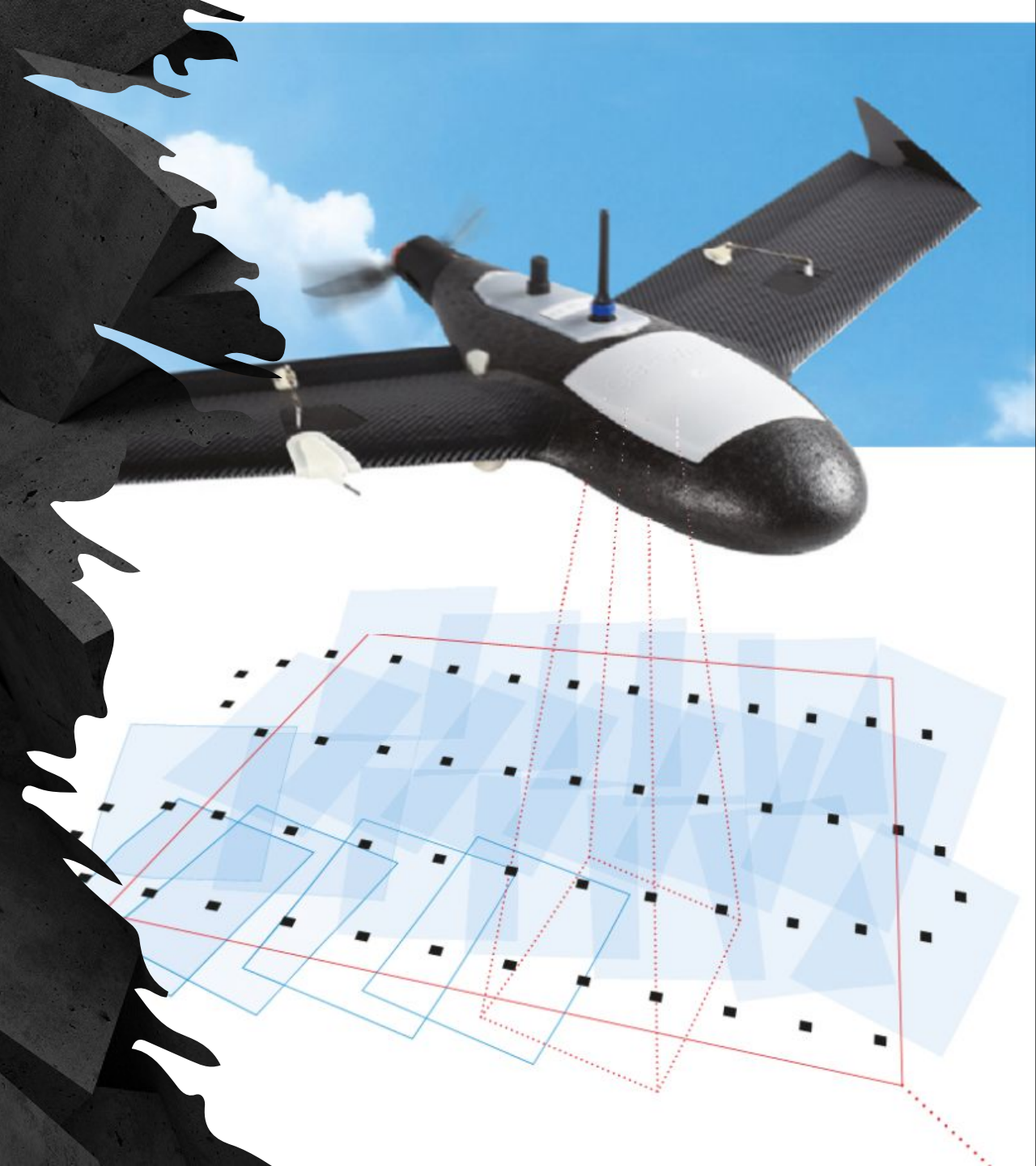
# 3.1 Беспилотные летательные аппараты (БПЛА)

Точность фотограмметрической съемки с использованием БПЛА зависит от множества переменных. Поскольку местоположение и положение БПЛА измеряются в реальном времени с помощью бортовой GNSS, система может генерировать данные о местности с точностью геолокации 30 см. Однако для большинства современных потребительских БПЛА трудно получить точную и прямую работу с географической привязкой из-за низкого качества, мультиметровой точности. Если высота полета является стабильным, данные с высокой точностью могут быть получены для даже самых равнинных участков.





Одним из факторов, оказывающих наибольшее влияние на точность БПЛА, является количество и распределение наземных контрольных точек (GCP), которые также можно использовать для применения самокалибровки и генерации параметров камеры. Определенное количество опорных точек, которые обычно измеряются традиционными геодезическими инструментами, необходимо разместить на объекте для создания модели на основе БПЛА с геолокацией и масштабом. Из-за значительного влияния количества и распределения опорных точек были изучены различные комбинации для оптимизации точности фотограмметрии БПЛА. Однако покрыть всю поверхность больших плотин сложно из-за их особых обстоятельств и условий. Исследования моделей плотин на базе БПЛА в основном сосредоточены на точности различных распределений наименьшего количества опорных точек для аварийного мониторинга плотины.





## 3.2 Мониторинг и проверка безопасности плотин с использованием фотограмметрии БПЛА

Трехмерная модель конструкции плотины может быть построена путем сшивания изображений БПЛА, а интересующие области будут записаны и измерены. Предлагаемый подход для 3D-модели реконструкции плотины в основном использует алгоритм обработки изображений и включает в себя извлечение характеристик изображения, вычисление облака точек и другие алгоритмы. Анализ точности облака точек в основном выполняется путем сравнения облаков точек.





### 3.3 Избранные платформы БПЛА и оптические датчики



(a)

(a)



(b)

(b)

Рис.10 БПЛА :  
(а) БПЛА DJI M210; (б)  
БПЛА DJI PHANTOM 4  
PRO.

Для обследования и аварийного мониторинга трех плотин были выбраны две платформы БПЛА. Обе платформы БПЛА питались от литий-ионных аккумуляторов и управлялись по радио.



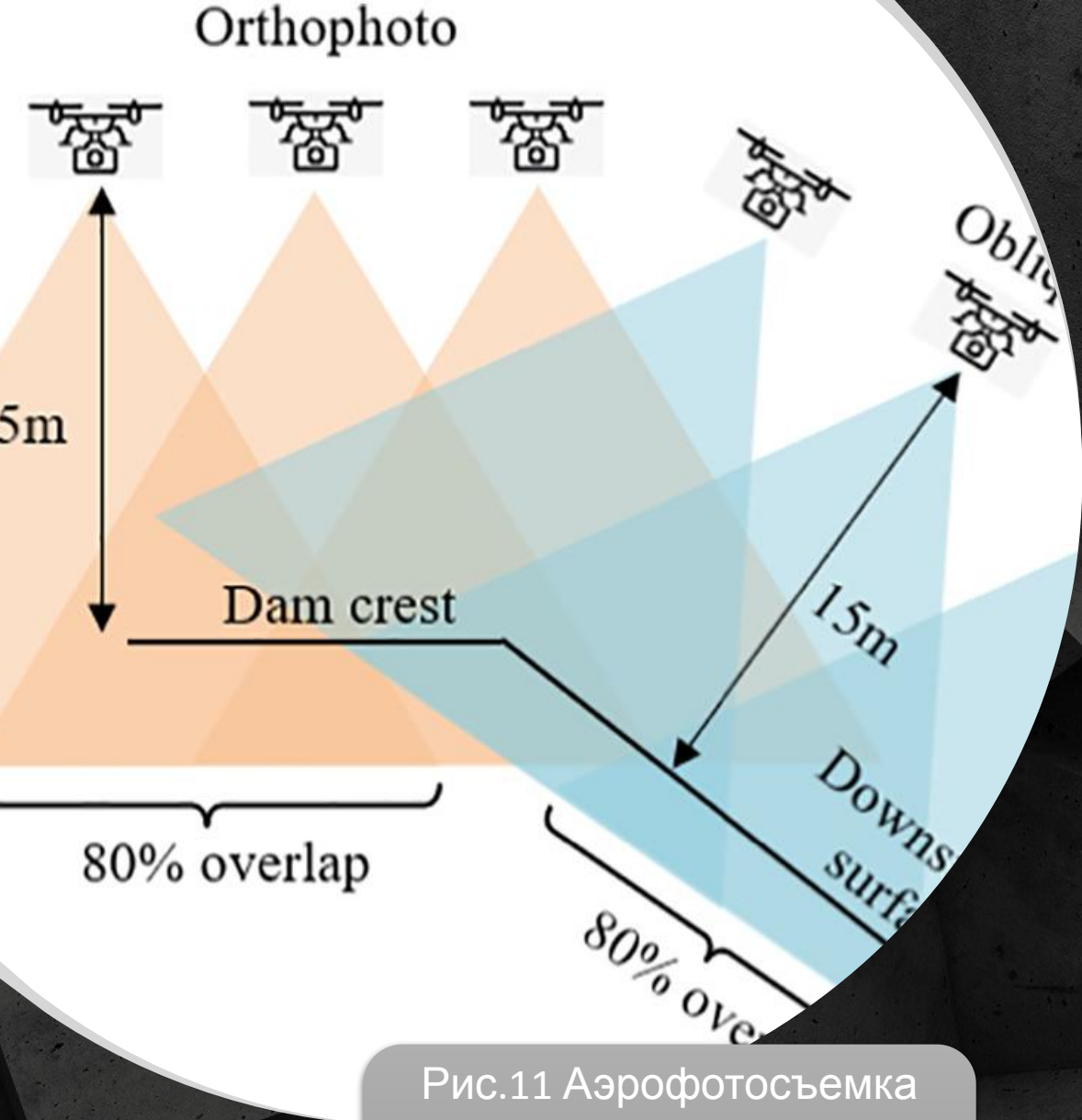


Рис.11 Аэрофотосъемка высоты и маршрута плотины с помощью БПЛА.

### 3.4 Фотограмметрическая обработка

Фотограмметрический процесс проводился с использованием пакета программ Agisoft PhotoScan Professional. Из-за разнообразия склонов каждой плотины вниз по течению, в этом исследовании была использована комбинация ортофотосъемки и косой фотографии, чтобы запечатлеть поверхность плотин. Полеты БПЛА выполнялись на высоте примерно 15 м перпендикулярно плотине. Чтобы доказать надежность инспекций плотин и проверить точность аварийного мониторинга плотин с помощью БПЛА, были рассмотрены различные распределения опорных точек, которые были размещены на реальных плотинах.



## 3.5 Распределение опорных точек для аварийного мониторинга

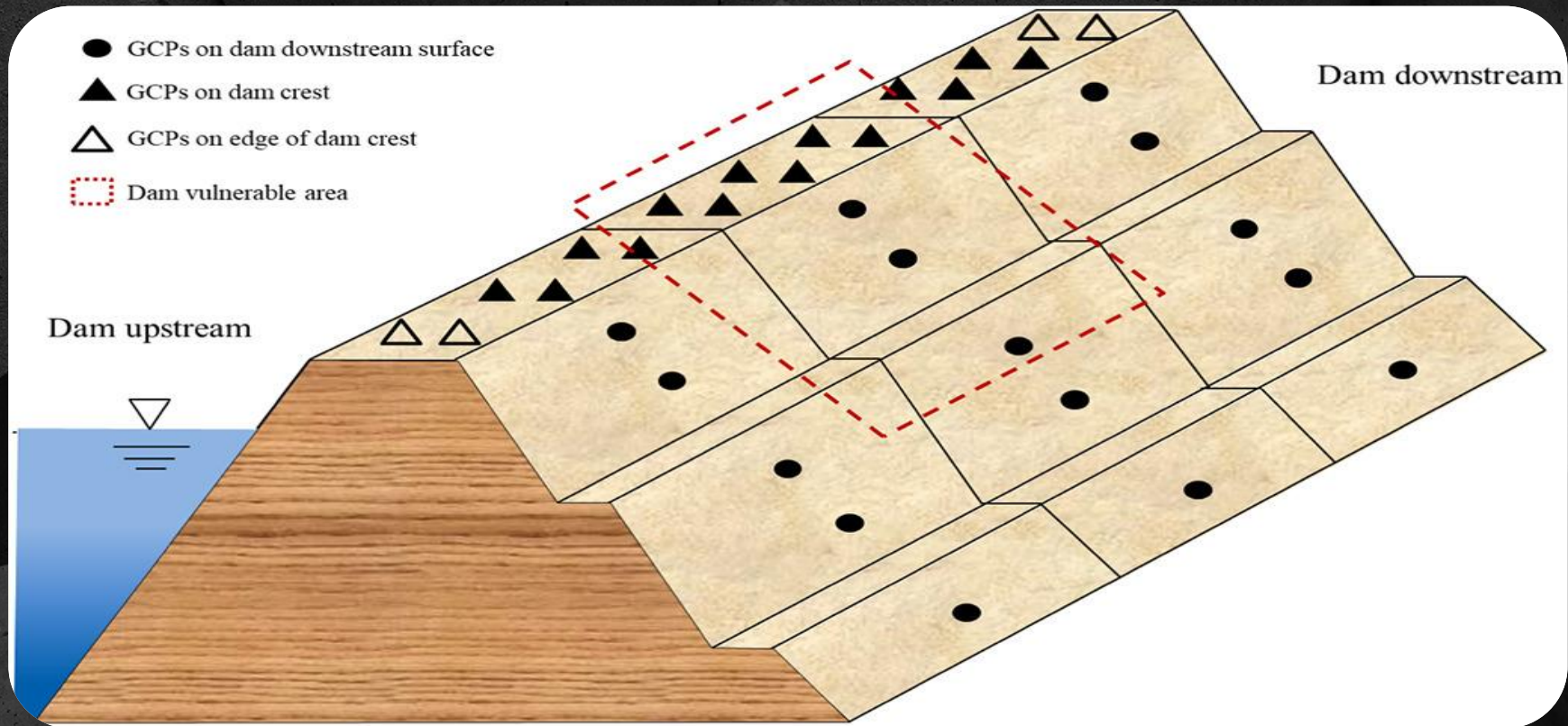


Рис.12 Распределение опорных точек на плотине и уязвимой зоне: ● точки, расположенные ниже по течению плотины; ▲ - точки, расположенные на гребне плотины; △ - точки, расположенные на краях гребня плотины

В классической фотограмметрии опорные точки должны быть широко распределены и покрывать всю территорию; однако в чрезвычайных ситуациях для людей опасно измерять или перемещать опорные точки на поверхности плотины. Следовательно, необходимо проверить точность модели плотины на базе БПЛА, когда принято несколько опорных точек. Построенную модель с минимальным количеством точек следует сравнивать с эталонной для проверки точности



Предлагаемая модель аварийного мониторинга плотины на базе БПЛА:

- **Шаг 1:** Полевые исследования. Опорные точки в районе исследования располагаются и измеряются, а также собираются аэрофотоснимки.
- **Шаг 2:** Анализ изображений. Объекты обнаруживаются, и создается трехмерная точка со всеми или частью опорных точек.
- **Шаг 3:** Постобработка. 3D-модель плотины создается с текстурами в реальном времени.
- **Шаг 4:** Сравнение облаков точек. Для проверки точности модели сравниваются три типа облаков точек плотины, и создается диаграмма облаков расстояний для оценки распределения ошибок.
- **Шаг 5:** Анализ точности CP. Координаты CP в модели сравниваются с реальными измеренными координатами, и результаты проверяются RMSE (среднеквадратичной ошибки).
- **Шаг 6:** Применение 3D-модели. 3D-модель с опорными точками разного количества используется для обследования плотины и аварийных измерений.



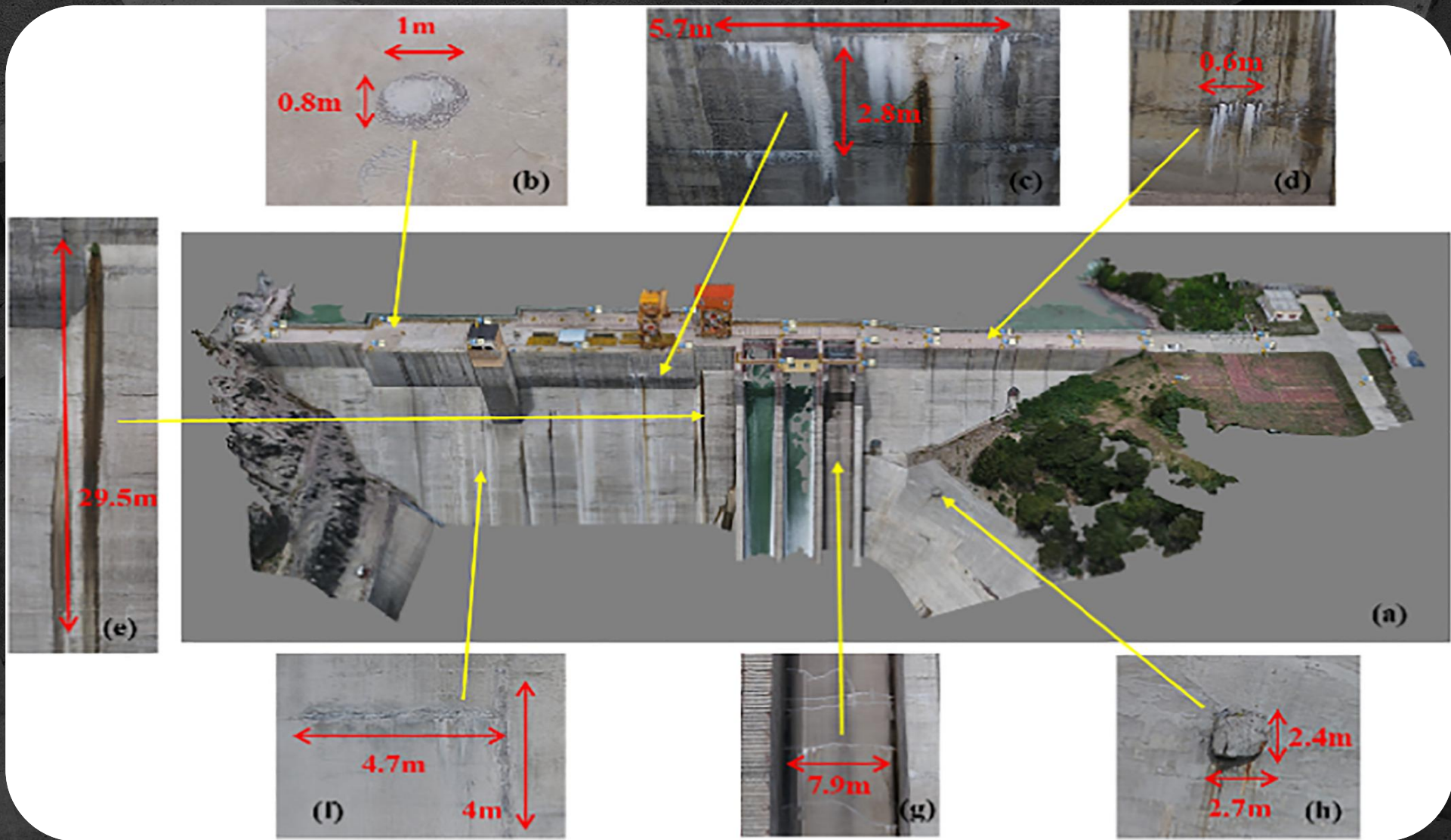



Рис.13 Модель плотины и несколько различных измеренных повреждений: (а) 3D модель плотины с опорными точками; (б) обрушение гребня плотины; (с) кальцинированный осадок на поверхности ниже по потоку; (d) кальцинированный осадок на поверхности выше по потоку; (e) просачивание и водяные пятна на поверхности ниже по течению; (e) трещина на поверхности ниже по потоку; (g) трещина на поверхности водосброса ; (h) бетонный блок на защите откоса.



# Вывод

- Опорные точки должны распределяться по поверхности плотины, гребня плотины и краю гребня плотины ниже по течению для оценки точности модели.
- Метод, предложенный в этом исследовании, является эффективным и экономичным, а результаты доказывают, что базовые и недорогие БПЛА могут создавать модели, подходящие для мониторинга состояния плотины.





## 4. Мониторинг локальных деформаций и уровня воды в водохранилище для плотины гравитационного типа на основе GPS-наблюдений

---

Чтобы найти возможную связь между уровнем водохранилища и деформацией плотины Саналона, были рассчитаны горизонтальные и вертикальные смещения за период 3,5 года с использованием GPS-наблюдений.



# 4.1 Особенности

- Наблюдать за структурой плотины можно с помощью дистанционного зондирования из космоса .
- Данные GPS можно использовать для расчета смещения и уровня воды в водохранилище.
- Определение перемещений с помощью GAMIT / GLOBK для компонентов N, E и U (топоцентрических координат).
- Расчет суточных измерений уровня водохранилища на основе рефлектometрии GNSS .
- Деформация плотины в северной составляющей связана с уровнем водохранилища.





## 4.2 Мониторинг смещений на плотине Саналона с помощью GPS измерений

Научное программное обеспечение GAMIT / GLOBK использовалось для относительной обработки данных GPS-наблюдений, и годовые скорости над плотиной  $-6,77$  мм / год,  $-9,95$  мм / год и  $-1,62$  мм / год были рассчитаны для компонентов N, E и U, соответственно. Кроме того, была применена методика инверсии рефлектметрии GNSS для определения суточного уровня водохранилища плотины, полученные значения сравнивались с реальными контрольными значениями градуированных линеек на месте.





## 4.3 Мониторинг плотины Саналона

Плотина Саналона расположена в русле реки Тамазула в муниципалитете Кулиакан на северо-западе Мексики, и ее географические координаты составляют около  $24^{\circ} 48' 51''$  северной широты,  $107^{\circ} 09' 05''$  западной долготы. Плотина простирается на площади 5420 га и имеет емкость водохранилища около 673 миллионов кубических метров воды. Плотина Саналона представляет собой плотину гравитационного типа с каменным наброском, построенную в основном из буксируемых материалов и железобетона. Плотина имеет высоту 81 м, длину гребня и ширину 415 и 10 м соответственно.

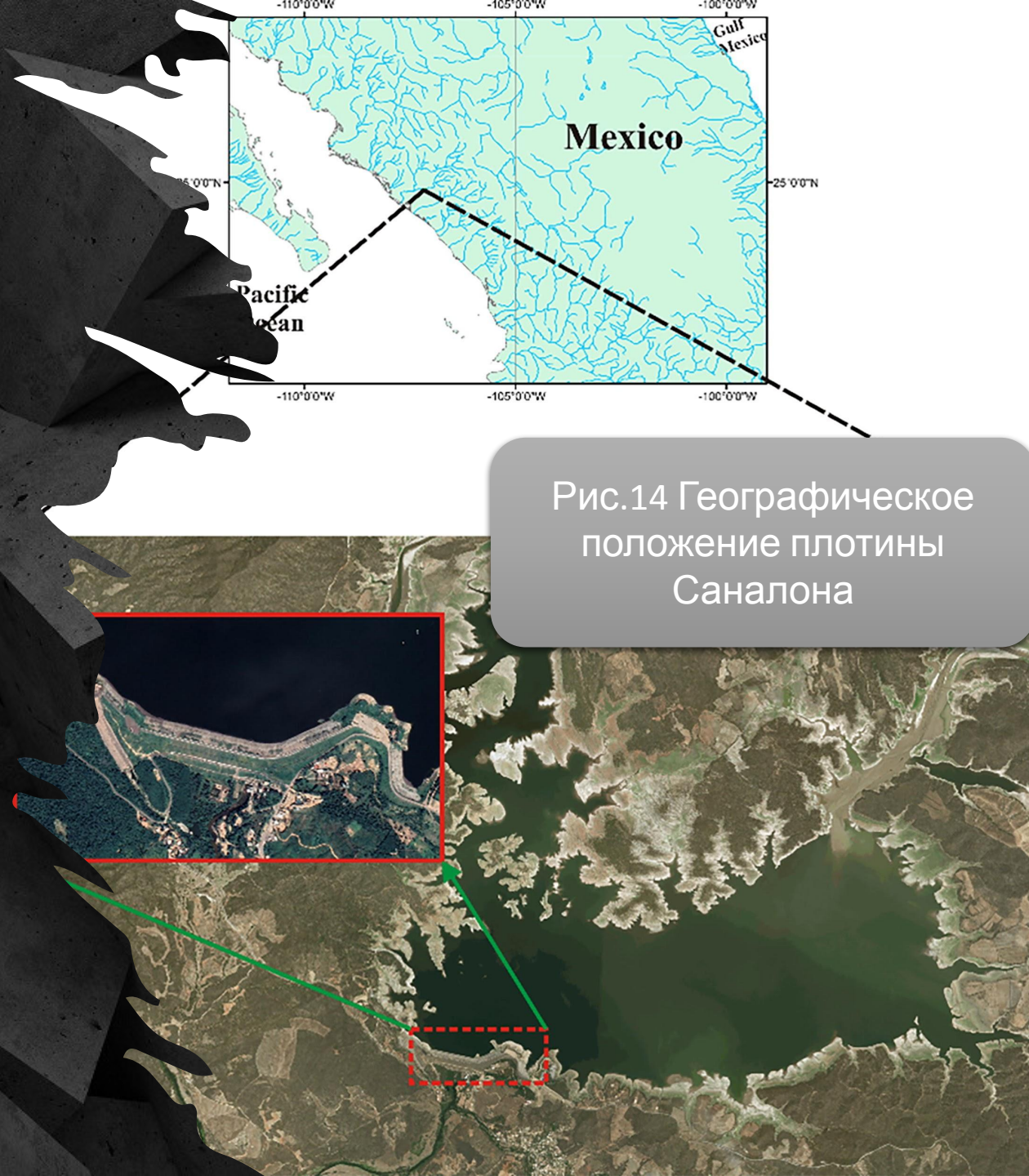


Рис.14 Географическое  
положение плотины  
Саналона



Рис.15 . (а) местоположение антенны GPS и (б) топография, определяющая плотину.



Установили непрерывный мониторинг GPS станции на плотине Sanalona для сейсмичности исследований, названных SSIG. Эта станция GPS состоит из приемника TRIMBLE NETRS и антенны TRM57971.00. Антенна GPS расположена на крыше бетонной конструкции, защищающей сейсмические инструменты, и расположена на гребне плотины.



## 4.4 Обработка данных GPS

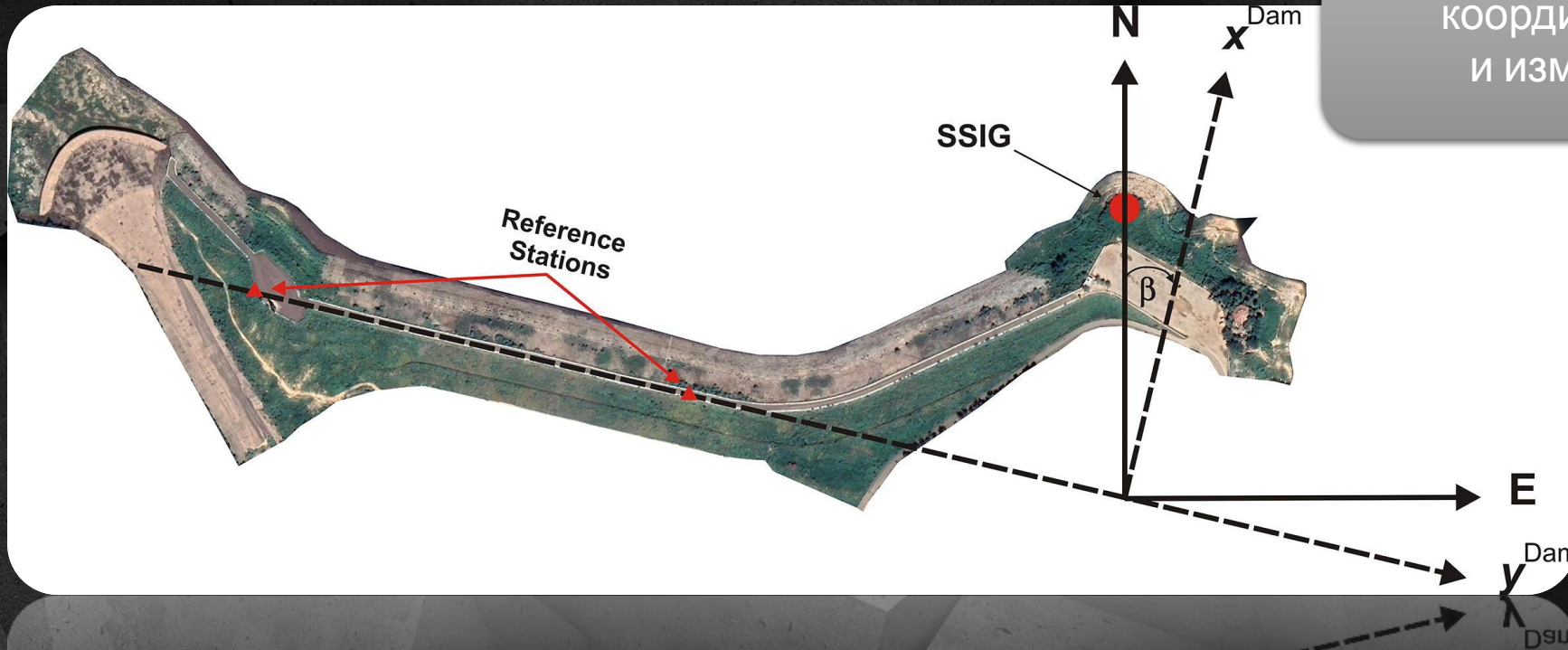


Рис.16 . Ориентация осей координат плотины и измерения GPS

Данные GPS были проанализированы с использованием научного программного обеспечения GAMIT / GLOBK, и для создания системы координат использовались 12 станций GNSS для непрерывного мониторинга.

Координаты ECEF ( $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ) были преобразованы в топоцентрическую систему координат NEU (Север, Восток, Вверх). Горизонтальные топоцентрические координаты ( $N$  и  $E$ ) были преобразованы в локальные координаты плотины ( $x_{Dam}$  и  $y_{Dam}$ ).



## 4.5 Результаты

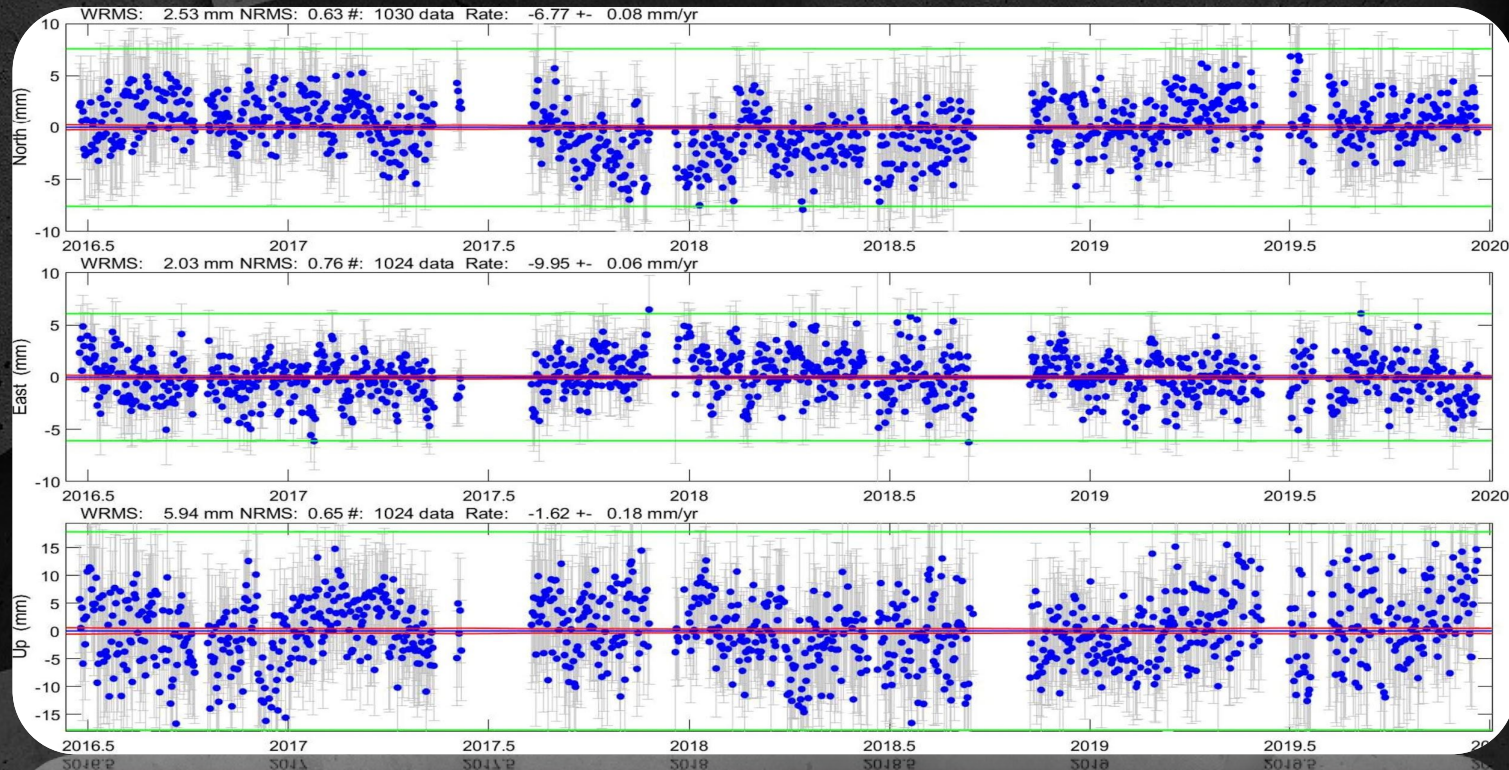


Рис.17 . Временной ряд станции SSIG для трех компонент (N, E, U). Синие точки: дневные позиции . Красные линии: реалистичные неопределенности . Зеленые линии: средневзвешенная квадратичная ошибка каждого компонента.

Результаты, полученные после обработки, показали скорости в трех компонентах (север, восток, верх) станции SSIG.

Скорости, представленные в плотине Саналона, составили  $-6,77 \pm 0,08$  мм / год,  $-9,95 \pm 0,06$  мм / год и  $-1,62 \pm 0,18$  мм / год по компонентам N, E и U соответственно. На рис. 17 показаны временные ряды, сгенерированные GAMIT / GLOBK и отредактированные, для периода измерения, соответствующего 3,519 года.



- Компоненты "Север" и "Восток" показали меньшую дисперсию по сравнению с компонентом "Вверх". Северная составляющая показала смещения порядка  $\pm 8$  мм, а восточная составляющая  $\pm 6$  мм.
- Для случая компонента "Вверх" было выявлено, что, когда уровень воды резервуара увеличивается структура плотины нисходит и когда уровень водохранилища снизился до максимума структура плотины возвращается к своему вертикальному положению, где максимальное смещение составляло 1 см. Вариация вертикального поведения плотины может быть вызвана двумя факторами: во-первых, решениями с низкой точностью в обработке GAMIT / GLOBK, а во-вторых, эффектами статического давления воды, которая взаимодействует с поверхностью плотины.





# Вывод

Трехмерные смещения плотины Саналона, соответствующие периоду оценки (3,519 года), составили примерно  $\pm 5$  мм,  $\pm 4-5$  мм и  $\pm 10$  мм для компонентов "Север", "Восток" и "Вверх" соответственно. Компонент «Вверх» представлял наибольшее смещение из-за возможного местного оседания плотины, вызванного вертикальной осевой силой или статическим давлением воды. В остальных компонентах наибольшие горизонтальные смещения на гребне плотины, где уровень водохранилища плотины вызвал эти смещения. Для компонента "Восток" плотина, он показал незначительные смещения на завесе плотины, в основном потому, что горизонтальная осевая сила не оказывала на него сильного воздействия. Уровень водохранилища вызвал упругие смещения на гребне плотины, когда каждый компонент конструкции перемещался над исходной точкой. Эти смещения вряд ли можно считать опасными для правильной работы плотины.



Спасибо за  
внимание!

