

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

Аль Фатин Хасан Джамил Ибрахим



ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ  
ПЛОТИН С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ВЛИЯНИЯ  
УРОВНЯ ВОДЫ ВОДОХРАНИЛИЩА

Специальность 25.00.32 – Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Мустафин М.Г.

Санкт-Петербург – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА О МОНИТОРИНГЕ ДЕФОРМАЦИЙ ВОДОПОДПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ</b> .....	<b>10</b>
1.1 Актуальность .....	11
1.2 Типы плотин .....	17
1.3 Нормативно-методические документы по мониторингу состояния плотин в Ираке и России .....	20
1.3.1 Нормативно-методические документы Ирака .....	20
1.3.2 Нормативно-методические документы России.....	23
1.4 Современные методы измерений при деформационном мониторинге .....	25
1.4.1 Технология НЛС.....	25
1.4.2 Глобальная навигационная спутниковая система .....	27
1.4.3 Тахеометрические измерения .....	28
1.4.4 Технология радиолокационной интерферометрии.....	30
1.4.5 Геометрическое и тригонометрическое нивелирование .....	33
1.5 Анализ литературных источников .....	34
1.6 Предпосылки совершенствования методики наблюдений за деформациями плотин .....	39
1.6.1 Фактические данные о деформировании плотин (на примере плотины «Дукан»).....	39
1.6.2 Программное обеспечение для построение цифровых 3D моделей водохранилища.....	43
1.6.3 Инженерные программные комплексы по оценке НДС различных объектов.....	44
1.6.4 Математическое обеспечение моделирования различных схем геодезических сетей и оценка точности ее пунктов.....	45
1.7 Выводы по первой главе.....	45
<b>ГЛАВА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА ПРОВЕДЕНИЯ И СХЕМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ</b>	

<b>УРОВНЕМ ВОДЫ ВОДОХРАНИЛИЩА И ВЕЛИЧИНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПЛОТИНЫ.....</b>	<b>47</b>
2.1 Анализ фактических данных о деформировании плотины «Дукан».....	47
2.2 Моделирование 3D модели водохранилища .....	54
2.2.1 Географическая информационная система .....	54
2.2.2 Шаги по созданию 3D цифровой модели с использованием ГИС технологии .....	54
2.3 Моделирование напряженно-деформированного состояния плотины .....	59
2.4 Совершенствование расположения деформационных марок .....	62
2.5 Выводы по второй главе.....	65
<b>ГЛАВА 3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПЛОТИН.....</b>	<b>67</b>
3.1 Описание основных пунктов традиционной методики с включением разработанных модулей.....	67
3.2 Выводы по третьей главе.....	76
<b>ГЛАВА 4 ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ПЛОТИНЕ «ДУКАН».....</b>	<b>77</b>
4.1 Принципы организации мониторинга плотины «Дукан» .....	77
4.2 Корректирование методики оценки смещений деформационных марок при геодезическом мониторинге плотины «Дукан».....	80
4.3 Выводы по четвертой главе.....	88
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>90</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>92</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>93</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Графики смещений деформационных марок 8 и 10.....</b>	<b>109</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты моделирования точности положения деформационных марок.....</b>	<b>111</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В соответствии с градостроительным кодексом Российской Федерации, большинство плотин представляют собой особо опасные и технически сложные объекты. Такое классифицирование вызвано тяжелейшими последствиями аварий, в особенности на водоподпорных гидротехнических сооружениях. Количество аварий, произошедших в мире, постоянно увеличивается. В этой связи, чрезвычайно актуальной является задача совершенствования методик оценки и прогноза деформаций плотин.

В нормативно-методических документах по мониторингу состояния плотин указывается необходимость таких измерений как давление на плотину и оценка деформаций плотины. Вместе с тем, регламента совместного учета этих факторов не приводится. При этом геодезические наблюдения не увязываются с уровнем воды водохранилища. В геодезических методиках наблюдений акцент делается на точности наблюдений, но не менее важен учет уровня воды водохранилища, который характеризует опасность возникновения критических деформаций и учет деформированного состояния плотины, распределение которого определяет расположение деформационных марок.

Таким образом, тема диссертации, направленная на решение задач об организации геодезических наблюдений за деформациями плотин с учетом уровня воды в водохранилище и прогнозной оценки деформированного состояния плотины является актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Предпосылками к выполнению диссертационных исследований послужили разработки целого ряда специалистов. Был накоплен большой практический опыт и подготовлена теоретическая база для определения деформации с использованием геодезических наблюдений и методов. Многочисленные исследования известных российских и зарубежных ученых, а также инженеров, посвящены разработке методов контроля и прогнозирования деформаций геодезическими способами. Следует отметить таких ученых, как Al-Ansari N., Adamo N., Sissakian V., Knutsson S., Laue J.,

Скрипников В.А., Бугакова Т.Ю., Басаргин А.А., Каленицкий А.И., Ваурак Т., Мустафин М.Г., Грищенко Е.Н., Юнес Ж.А., Хиллер Б., Ямбаев Х.К, Мазуров Б.Т., Erol S., Erol B., Ayan T.A, Ali A., Mohamed E.S., Belal A., Levin E., Salih S.A., Al-Tarif A.S.M., Soycan A., Soycan M., Кобелева Н.Н., Хорошилов В.С. В работах данных авторов отмечается важность расчета точности оценки деформации плотины, а также точности самих наблюдений. Однако, вопросы влияния уровня воды водохранилища на величину деформации плотины и оптимизация распределения деформационных марок (интервал), соразмерно распределению деформациям, а также модифицирования существующих способов оценки стабильности (устойчивости) исходных пунктов деформационной сети, изучены недостаточно. В связи с этим, диссертация, посвященная решению задач разработки и организации геодезического мониторинга гидротехнических водоподпорных сооружений (плотин), представляется актуальной. Настоящая работа приурочена к конкретному примеру – плотина «Дукан», расположенная в Ираке. Выводы и практические рекомендации будут полезны и для России.

**Цель исследований** – повышение точности оценки деформированного состояния плотин за счет разработки методики геодезических наблюдений, учитывающей уровень воды водохранилища и расчетное распределение деформаций в плотине.

**Идея работы** состоит в выявлении на основе анализа, фактических данных и расчетов деформирования плотины, а также численной зависимости между ними и уровнем воды водохранилища, по которой возможна разработка порядка геодезических наблюдений, а по результатам предварительного моделирования деформации плотины с применением метода конечных элементов, характера их распределения в плотине, для оптимального размещения деформационных марок.

**Задачи исследований:**

1. Провести анализ состояния изученности вопроса о геодезическом мониторинге состояния плотин для обоснования методики исследования.

2. Изучить влияние уровня воды водохранилища на деформацию плотины для определения лучшего порядка проведения геодезических наблюдений.

3. Выполнить моделирование деформированного состояния плотины и определить характер распределения деформаций для проектирования расположения деформационных марок.

4. Разработать методику геодезических наблюдений и конкретизировать ее для условий плотины «Дукан» в Ираке.

#### **Методология и методы исследования:**

- Анализ и обобщение результатов теоретических и практических исследований при обосновании актуальности темы работы и решаемых задач;
- Полевые исследования, включая экспериментальные геодезические измерения;
- Методы математической статистики и теории вероятностей, включая метод наименьших квадратов при обработке измеряемых необработанных данных;
- Математическое моделирование геодезических сетей мониторинга и напряженно-деформированного состояния плотин.

#### **Научная новизна исследований:**

1. Разработан алгоритм и численно установлена связь между уровнем воды водохранилища и величиной деформаций в плотине, позволившей уточнить порядок проведения геодезических наблюдений соразмерно основному фактору опасности.

2. Разработана конечная элементная модель плотины и по результатам моделирования получено распределение деформаций, что позволило уточнить расположение деформационных марок в соответствии с расчетными концентрациями смещений.

3. Разработана методика геодезических наблюдений, включающая способ оценки стабильности пространственного положения исходных пунктов, а также двухступенчатую схему определения координат деформационных марок,

размещенных с нерегулярным интервалом, для условий плотины «Дукан» в Ираке.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Периодичность геодезических наблюдений за деформациями плотины следует связывать с уровнем воды водохранилища, который характеризует степень опасности напряженного состояния и выделять при этом три режима наблюдений по уровням верхнего бьефа: опасный (выше среднего), предупредительный (интервал средних уровней) и неопасный (от нижней отметки интервала среднего уровня).

2. Деформационные марки на поверхности плотины необходимо располагать соответственно прогнозным концентрациям деформаций, которые определяются на основе предварительного расчета смещений по разработанной программе, использующей алгоритм метода конечных элементов.

3. Точность прогнозирования деформационного процесса плотин повышается при использовании разработанной методики проведения геодезических наблюдений за смещениями, включающей заложение деформационных марок в местах их априорных концентраций и периодичности замеров с частотой, соразмерной уровню воды в водохранилище, а также с применением модифицированного способа оценки стабильности исходных пунктов.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследований** состоит в разработанной методике геодезического мониторинга плотин, учитывающей уровень воды водохранилища и распределение деформаций в плотине. Практический интерес представляет алгоритм определения стабильности исходных пунктов. Разработанную методику целесообразно использовать в проектных организациях и предприятиях геодезического профиля в России и Ираке, а также учебном процессе при проведении лекционных и практических занятий.

**Степень достоверности результатов исследования** подтверждается использованием большого объема фактических измерений по разработанной

технологии наблюдений, обоснованностью теоретических расчетов, согласованностью результатов с альтернативными исследованиями, применением сертифицированного оборудования, приборов и программного обеспечения, а также контрольными замерами независимых экспертов.

**Личный вклад автора:**

1. Автор диссертации участвовал в постановке задач исследований, определил на основе изучения результатов геодезических наблюдений зависимость деформации плотины «Дукан» в Ираке от уровня воды водохранилища.

2. Провел проектирование деформационной сети, разработал компьютерную программу «Плотина» и выполнил моделирование деформированного состояния плотины.

3. Разработал схему размещения деформационных марок в зависимости от ожидаемых величин смещений, выполнил модификацию способа оценки стабильности исходных пунктов деформационной сети.

**Апробация диссертационной работы** проведена на следующих научно-практических мероприятиях:

1. Международная научно-техническая конференция «Geodetic deformation monitoring in the dam-reservoir system» (г. Кисловодск, 2019 г.).

2. Международный форум «Геострой-2020: Методика геодезического контроля водоподпорных плотин с учетом объема воды водохранилища» (г. Новосибирск, 2020 г.).

3. Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы инженерной геодезии» (г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2019 г.).

4. XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, Горный университет, 2021 г.).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 6 опубликованных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы



основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, включающего 145 наименований. Диссертация изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунков, 14 таблиц и 2 приложения.

**Благодарности.** Выражаю искреннюю благодарность моему научному руководителю – д.т.н. Мустафину М.Г. за ценные советы при работе над диссертацией. Кроме того, благодарю всех сотрудников кафедры инженерной геодезии Горного университета за должное внимание и содействие в подготовке диссертации.

Считаю своим долгом выразить благодарность моим родителям, жене, сыну и дочке за поддержку принятого мною решения поступить в аспирантуру и защитить кандидатскую диссертацию.

## **ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА О МОНИТОРИНГЕ ДЕФОРМАЦИЙ ВОДОПОДПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

Оценка технического состояния различных объектов всегда была одной из важнейших задач ученых и инженеров. И это понятно, ведь речь идет прежде всего о безопасности жизнедеятельности. Оценка состояния объектов и их проектирование выполнялись на основе предрасчетов. Конечно, понятие «предрасчет» весьма растяжимое, и оно претерпевало значительный эволюционный период. Параллельно исследователи находили возможности использовать аналоговое и физическое моделирование. Таких примеров немало. Например, физическое моделирование, включающее уменьшенные модели изучаемого объекта или эквивалентные материалы. Весьма много задач решено с применением аналогий. Можно вспомнить моделирование закономерностей Дарси путем применения электрических цепей. Далее, по мере развития математических программных алгоритмов и главное вычислительной, в последующем компьютерной технологии, стали использовать компьютерное моделирование. Безусловно, что с появлением компьютеров, произошла техническая революция. Выполнять оценку состояния, в том числе и деформационного, различных объектов стало возможным с помощью мониторинга. Как известно, мониторинг – это систематические наблюдения с целью оценки, контроля и прогноза состояния рассматриваемого объекта. Здесь надо упомянуть понятие «геодезический мониторинг». В соответствии с нормативными документами (ГОСТ Р 22.1.11-2002, ЕМ 111 0-2-1 009, 2002) [96,140] под геодезическим мониторингом понимается практически тот же мониторинг, только без контроля состояния. Скорее всего, это понятие временно, ведь геодезический мониторинг должен включать полное определение, полноценно используя всю мощь науки геодезии [1,110].

С учетом вышеизложенного, чрезвычайно важным вопросом является совершенствование мониторинга плотин, как особо опасных объектов, в

следствие нанесения огромного ущерба, возникающего в случае аварийной ситуации.

Надо отметить, что накоплен значительный объем исследований по наблюдениям, оценке и мониторингу плотин [55,47,92,113,114,117,126,126]. При этом были использованы различные методы, оборудование и приборы, включая методы дистанционного зондирования, фотограмметрию, технологии глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), тахеометрические измерения и другие.

В этой главе дано обоснование актуальности совершенствования методики оценки состояния и прогноза деформаций плотин. Представлен набор примеров, в которых плотины пострадали от большой деформации или вовсе разрушились, освещены причины перехода плотин в аварийное состояние. Также рассмотрены нормативно-методические документы по мониторингу состояния плотин, особенно которые напрямую относятся к задачам настоящего исследования. Описаны основные методики измерений деформаций и на этой основе сформулированы научные задачи, решение которых позволит усовершенствовать существующие составляющие геодезического мониторинга плотин.

## **1.1 Актуальность**

В соответствии с Градостроительным кодексом Российской Федерации большинство плотин представляют собой особо опасные и технически сложные объекты. Такое классифицирование вызвано тяжелейшими последствиями аварий в особенности на водоподпорных, гидротехнических сооружениях. Количество аварий, произошедших в мире, постоянно увеличивается. В этой связи, чрезвычайно актуальной является задача совершенствования методик оценки и прогноза деформаций плотин.

В нормативно-методических документах по мониторингу состояния плотин [21,22,140] указывается необходимость измерений таких параметров, как давлений на плотину и оценки деформации. Вместе с тем, регламента совместного учета этих факторов не приводится. Сформирован примерный порядок

наблюдений, не учитывающий уровень воды водохранилища. В геодезических методиках наблюдений акцент делается на способы наблюдений и их точность, но не учитываются факторы, которые влияют на уровень воды водохранилища и на величину деформации плотины, а также не выявляют зоны плотин, которые имеют наибольшие деформации. В связи с этим, наблюдения зачастую проводятся в так называемые периоды.

Некоторые аварии [112,138,139] происходят из-за факторов, проявляющихся в ошибках проектирования и отсутствия осуществления необходимых мер предосторожности, а также использования некачественного мониторинга деформированного состояния плотин.

Обрушение нескольких крупных плотин [112,122] (IVEX dam в США и плотин «Глено», «Моларе» и «Става» в Италии) привело к большим разрушениям и к человеческим жертвам. Систематический мониторинг крупных плотин и водохранилищ проводится с целью обеспечения их структурной целостности и предотвращения серьезных повреждений для безопасности населения. Сегодня цель геодезического анализа деформаций – это переход от чисто феноменологического описания деформации объекта к анализу процесса, вызвавшего деформацию.

Приведем примеры плотин, оказавшиеся в аварийном состоянии. На рисунке 1.1 показано разрушение плотины «Глено» в Италии. Во время строительных работ тип плотины принят как смешанная гравитационная и многоарочная система (рисунок 1.1 а). Об этом решении не уведомили Министерство общественных работ Италии. Этот выбор означал использование меньшего объема материала со значительной экономией денег. Там, где гравитационная плотина еще строилась, пилоны вбивались прямо в скалу, а остальная часть опиралась непосредственно на существующие строения. В последующие недели на дамбе было замечено несколько протечек воды, были приглашены инспекторы из Совета инженеров-строителей для обследования. Кроме того, осень 1923 года была особенно дождливой, на плювиометрическом посту в Вилминоре-ди-Скальве, недалеко от плотины, в сентябре выпало 232,0 мм

осадков, в октябре – 446,5 мм, в ноябре – 409,0 мм, а их значения с 26 по 30 ноября составило 297,5 мм [122].

1 декабря 1923 года в 6:30 во время плановой проверки смотритель плотины почувствовал первый толчок, а в 7:15 плотина внезапно обрушилась (рисунок 1.16).

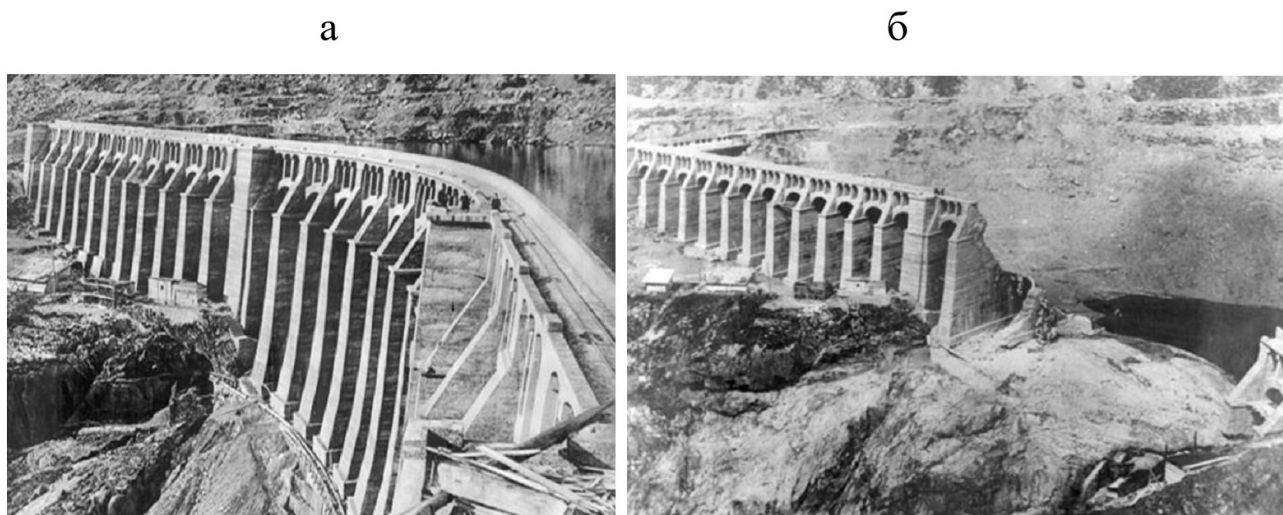


Рисунок 1.1 – Вид плотины «Глено» (слева до разрушения, справа после) [122]

Следующий пример – обрушение плотины Сэдл-Дамба в Лаосе в провинции Чампасак 23 июля 2018 года. Обрушение плотины привело к массовым разрушениям и появлению бездомных среди местного населения в соседней провинции Аттапеу. По состоянию на 25 сентября было подтверждено, что 40 человек погибли, по меньшей мере 98 пропали без вести, а еще 6600 человек покинули свои дома. Обрушение плотины произошло из-за высокого уровня воды в водохранилище. Управление плотины предупредило об этом, но предупреждение было запоздалым [61].

Одним из наиболее важных примеров является разрушение плотины в эмирате Фуджейра в декабре 1995 года, после проливных дождей и штормов, продолжавшихся три дня подряд. Это привело к повышению уровня воды в плотине, которая расположена в регионе, где отсутствуют самые важные процедуры обслуживания и безопасности. В результате произошло разрушение плотины. Вся деревня, которая расположена на побережье Индийского океана к северу от Фуджейры, недалеко от устья Вади-Цфата, с населением около 5000

человек и имеющая 400 построек на ее территории, была смыта водой [93].

В этой связке следует упомянуть о разрушении плотины на реке Сиба в Красноярском крае в 2019 году. В результате аварии погибли 15 человек и более 27 получили ранения. Причиной обрушения плотины являлась эрозия тела плотины и изменение ее формы, что указывало на то, что контроль над плотинной был осуществлен не должным образом [63].

Плотина Великого Эфиопского Возрождения является одним из примеров наличия значительной вертикальной и горизонтальной деформации. Плотина Великого Эфиопского Возрождения была построена на реке Нил, объем водохранилища составляет 70 км<sup>3</sup>. Из-за большого объема воды наблюдалась большая деформация плотины, а также деформация земной поверхности [102].

В таблице 1.1 приведены несколько зафиксированных фактов разрушений плотин [62,106].

Таблица 1.1 – Плотины и факторы разрушения [62,106]

Билбери водохранилище (Долина Холме, Великобритания)	разрушена из-за сильного дождя
Плотина озера Ирука (Япония)	разрушена из-за сильного дождя
Плотина реки Милл (USA)	разрушена, когда водохранилище плотины было полностью заполнено
Озеро Токсавэй Дам (Северная Каролина, USA)	разрушена из-за сильного дождя
Ксоригер плотина (Барселона, Испания)	разрушена из-за сильного дождя

Следует указать на многочисленные исследования [28,29,31,35,74,98,99,101], в которых дается в той или иной степени разработанности предложения по совершенствованию прогнозирования деформации плотины и изучению ее деформаций [86,87,108,131,102,141], в том числе вызванной уровнем воды водохранилища. В этих исследованиях указывается, что точность прогноза деформации связана с оценкой физического (механического) состояния плотины и возможностью ее повышения, учитывая состояние системы «плотина-водохранилище». При этом влияние давления воды

на величину смещений плотины рекомендуется учитывать с начала эксплуатации плотины [95,98]. Следует постоянно контролировать состояние плотины и уровень воды в водохранилище плотины во избежание риска ее обрушения.

При анализе также найдено много плотин с обнаруженными высокими значениями деформации [91,126,96,129,119]. Например, «Мосул», «Дербандихан», «Койна» в Ираке, которые необходимо постоянно наблюдать, чтобы избежать риска разрушения, как это произошло на других плотинах. Плотина «Мосул» в Ираке была значительно разрушена во время войны из-за отсутствия работ по техническому обслуживанию и мониторингу. Предполагаемый расчетный уровень воды в водохранилище 341 м, но для обеспечения устойчивости плотины и минимизации деформации был определен более низкий уровень воды соответствующий 319 м [34,96].

Другой пример – плотина «Дербандихан», которая расположена в северной части Ирака и также страдает от значительных деформаций. Вследствие воздействия землетрясений произошли горизонтальное смещение плотины (более 25 см) и вертикальная деформация (более 40 см) [109,129]. Поэтому, Главное Управление по плотинам в Ираке на время перестали эксплуатировать плотину, сделали сброс воды, а затем постепенно возобновили заполнение водохранилища этой плотины с последующим наблюдением деформации в связи с опасностью разрушения.

Плотина «Масджед-э-Солейман» является бетонной плотинной высотой 177 метров, расположенной на юго-западе Ирана на реке Карун. Ее водохранилище вмещает  $261000000 \text{ м}^3$  воды. Ширина и длина гребня этой плотины составляют 15 и 500 метров соответственно. Эта плотина была построена в узкой долине, шириной 18 метров у русла реки и со средним уклоном стены  $36^\circ$  к горизонту. Были проведены исследования, которые выявили заметные внутренние вертикальные и горизонтальные деформации в плотине [89]. Причина такой деформации – огромный объем воды водохранилища, который требует постоянного контроля уровня воды в плотине.

Плотина «Койна» представляет собой бетонное сооружение высотой 85

метров, водосборной площадью 892 км<sup>2</sup>, расположена в районе полуострова Индостан. Землетрясение в Койне в 1967 году с магнитудой 7,5 по шкале Рихтера стало неожиданностью для ученых. Вызванный интерес со стороны геологов, геодезистов, специалистов по плотинам и инженеров привел к различным исследованиям устойчивости структуры плотины и окружающей территории [119].

Надо отметить, что все представленные примеры больших деформаций или разрушения плотин, вызваны не столько отсутствием геодезического контроля за состоянием плотины, сколько отсутствием контроля уровня воды в водохранилище. И это понятно, так как есть вопрос в нестыковке геомеханических и геодезических исследований. Геодезисты акцентируют внимание на точности измерений, но зачастую не контролируют механическое состояние изучаемого объекта. В этой связи, безусловно, следует учитывать основной фактор воздействия на плотину – давление воды, которое зависит от уровня наполненности водохранилища. В тоже время перманентный мониторинг позволяет руководству плотины знать величину горизонтального и вертикального смещения, а также степень его серьезности и опасности. Вместе с тем следует контролировать уровень воды в водохранилище, горизонтальное и вертикальное смещение плотины, а также прогнозировать поступающие воды в водохранилище во время паводка, вследствие дождя, чтобы управлять геодезическим мониторингом.

Таким образом, вопрос о совершенствовании методики оценки и прогноза состояния плотин весьма актуален, о чем свидетельствует количество плотин, испытывающих критические деформации, а также нерешенность вопросов, связанных с уровнем воды в водохранилище, деформациями плотины и характером их распределения. Решение этих актуальных вопросов приведет к более качественному проектированию геодезической деформационной сети, а также определению порядка наблюдений за деформациями, отвечающими степени опасности состояния плотины.



## 1.2 Типы плотин

Плотины разделяются на четыре типа [23]:

### 1. Бетонные и железобетонные плотины на не скальных основаниях

В бетонных водосбросных и железобетонных плотинах на не скальных основаниях следует различать следующие основные элементы (рисунок 1.2) [23]:

1. Фундаментные плиты;
2. Водосливы и глубинные (донные) водосбросы;
3. Быки и устои;
4. Водобой, рисберма, переходное крепление;
5. Деформационные швы и их уплотнения;
6. Противофильтрационные устройства (понур, шпунты, буробетонные сваи и стенки, зубья, противофильтрационные завесы);
7. Дренажные устройства.

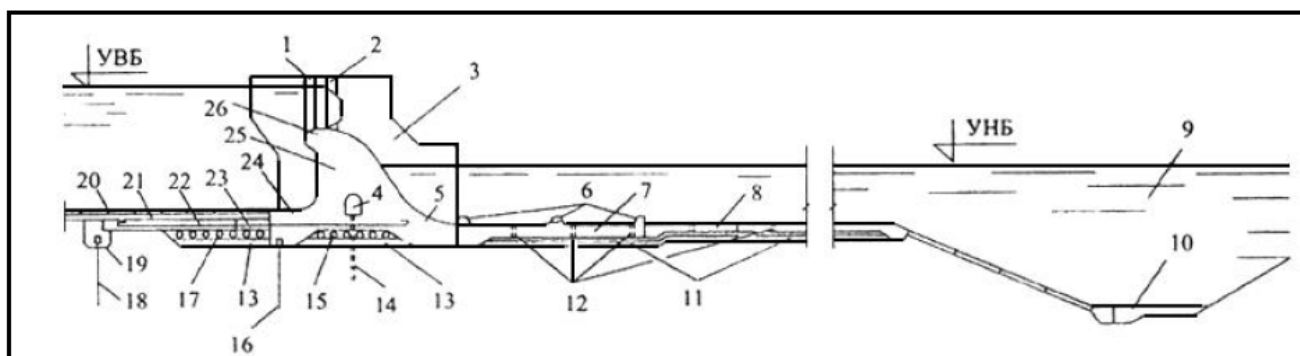


Рисунок 1.2 – Схема элементов водосливной плотины: 1 - паз ремонтного затвора; 2 - паз рабочего затвора; 3 - промежуточный бык; 4 - дренажная галерея; 5 - низовой участок фундаментной плиты; 6 - гасители энергии; 7- водобой; 8 - рисберма; 9 - ковш; 10 - переходное деформируемое крепление; 11 - горизонтальный дренаж водобоя и рисбермы; 12 - дренажные колодцы; 13 - обратный фильтр; 14 - вертикальный дренаж основания; 15 - горизонтальный дренаж фундаментной плиты; 16 - верховой подплотинный шпунт; 17 - горизонтальный дренаж понура; 18 - понурный шпунт; 19 - надшпунтовая балка; 20 - крепление пригрузки; 21 - пригрузка понура; 22 - анкерный понур; 23 - гибкий участок анкерного понура; 24 - верховой участок фундаментной плиты; 25 - водослив; 26 - гребень водослива [23]

## **2. Гравитационные плотины на скальных основаниях**

Конструирование гравитационных плотин и их элементов на скальных основаниях следует выполнять в соответствии с требованиями, которые соотносят с нагрузками, воздействиями и их сочетаниями.

Исходный поперечный профиль гравитационной плотины должен иметь форму треугольника с вершиной на отметке нормального подпорного уровня воды.

При проектировании гравитационных плотин на скальных основаниях следует рассматривать техническую возможность и экономическую целесообразность применения расширенных швов (рисунок 1.3б) с продольной полостью у основания.

## **3. Контрфорсные плотины на скальных основаниях**

Контрфорсные плотины, в отличие от гравитационных, представляют собой перекрытия, воспринимающие давление воды и опирающиеся на вертикальные стенки – контрфорсы, которые, в свою очередь, передают нагрузку от перекрытий основанию.

При выборе контрфорсной плотины предпочтение следует отдавать массивно-контрфорсным плотинам (рисунок 1.4) [23], особенно в районах с суровыми климатическими условиями.

## **4. Арочные и арочно-гравитационные плотины**

Гравитационно-арочная плотина – криволинейная в плане плотина из бетона или каменной кладки, устойчивость и прочность которой обеспечивается в основном действием собственного веса и частично работой плотины как свода с передачей нагрузки на скальные берега.

Расчет напряженно-деформированного состояния арочных и арочно-гравитационных плотин производится с учетом последовательности возведения плотины и наполнения водохранилища.

Расчеты плотин IV класса, а также предварительные расчеты плотин всех классов, допускается выполнять упрощенными методами.

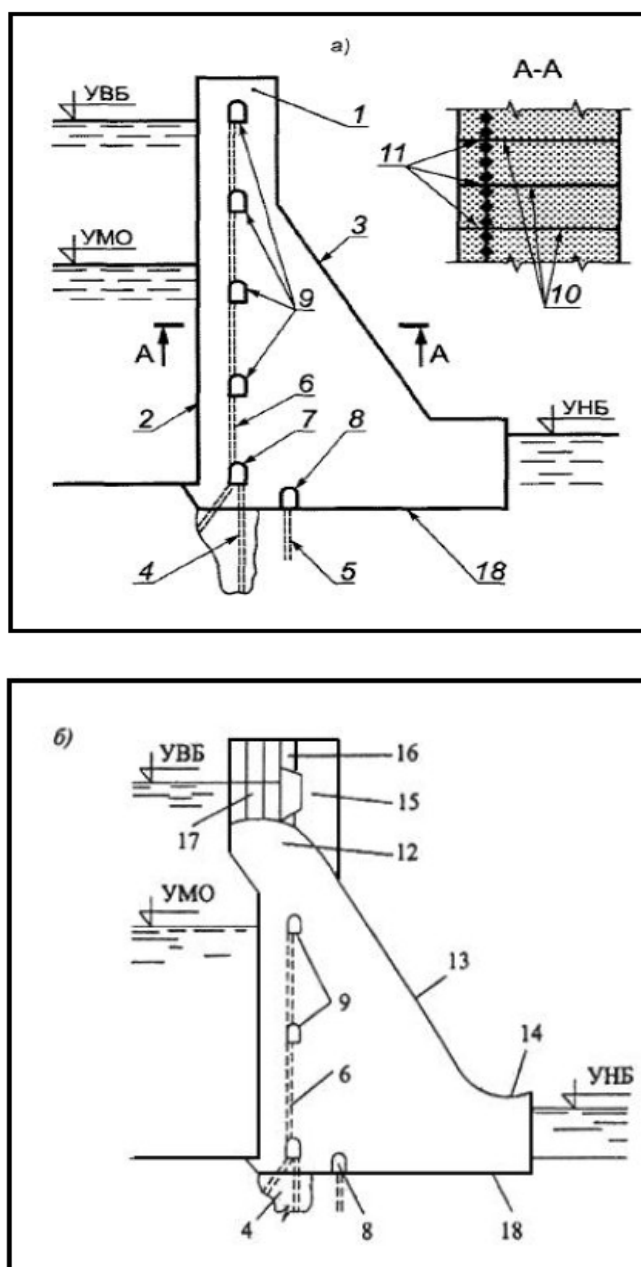


Рисунок 1.3 – Схема отдельных частей и элементов гравитационной плотины на скальном основании (а - глухая плотина, б - водосливная плотина, где 1 - гребень; 2 - напорная грань; 3 - низовая грань; 4 - противофильтрационная (обычно цементационная) завеса; 5 - дренаж скважины основания; 6 - дрены тела плотины; 7- цементационная галерея; 8 - дренажная галерея; 9 - смотровые галереи; 10 - межсекционные швы; 11 - противофильтрационные уплотнения; 12 - гребень водослива; 13 - водосливная грань; 14 - носок-трамплин; 15 - промежуточный бык водосливной плотины; 16 - паз основного затвора; 17 - паз ремонтного (аварийно-ремонтного) затвора; 18 - подошва) [23]

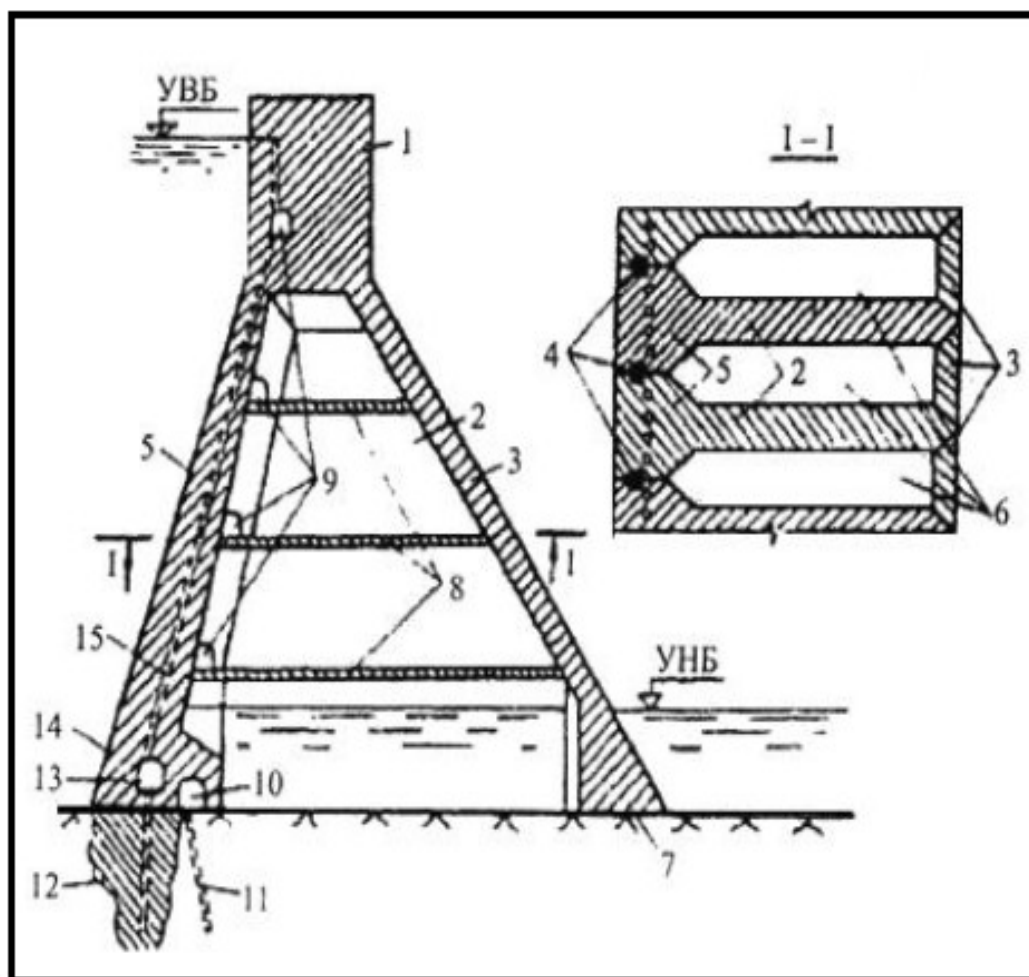


Рисунок 1.4 – Схема контрфорсной плотины:

1 - гребень; 2 - контрфорс; 3 - низовое перекрытие; 4 - противодиффузионные уплотнения; 5 - массивный оголовок; 6 - полости; 7 - низовой клин; 8 - перекрытия полостей; 9 - смотровые галереи; 10 - дренажная галерея; 11 - дренаж основания; 12- противодиффузионная (обычно цементационная) завеса; 13 - цементационная галерея; 14 - верховой клин; 15 - дренаж плотины) [23]

### 1.3 Нормативно-методические документы по мониторингу состояния плотин в Ираке и России

#### 1.3.1 Нормативно-методические документы Ирака

В руководстве (нормативно-методический документ по мониторингу плотин ЕМ 1110-2-1009: 1 июня 2002 г.) [140] представлены технические рекомендации по выполнению точных исследований структурных деформаций шлюзов, плотин и других гидроизоляционных или навигационных сооружений.

Для точности качества контроля смещений в гидротехнических сооружениях определены регламенты, которые утверждены в США и Ираке.

В нормативном документе [140] определены общие рекомендации по оценке деформаций и периодичности наблюдений, которые зависят от типа конструкции. Различия в строительных материалах напрямую связаны с тем, как будет деформироваться плотина. Например, бетонные плотины деформируются иначе, чем земляные или насыпные. Для бетонных плотин и других бетонных устройств для защиты от наводнений, деформация в основном упругая и сильно зависит от давления воды водохранилища и вариации температур [6].

В зависимости от типа и состояния конструкции система мониторинга предусматривает создание опорной сети, точки которой должны располагаться вдали от плотины в неподвижных местах. Так, в особенности для бетонных плотин, идеально размещать исходные точки в скальном основании на глубине, не подверженной воздействию водохранилища [140]. Мониторинг деформации плотины или фундамента должен производиться таким образом, чтобы смещение измерялось как по горизонтали, так и по вертикали.

В данном документе [140] представлены рекомендации по планированию и реализации структурных наблюдений деформаций на строительных объектах инженерного корпуса армии США. В нем обсуждаются критерии и цели, используемые для проектирования сетей геодезического мониторинга, а также для разработки надежных и экономичных схем измерений, основанных на точных инженерных геодезических методах.

Стандарты проведения приборных наблюдений и периодических проверок содержатся в следующих публикациях:

- ER 1110-2-100, периодическая проверка и постоянная оценка завершенных строительных конструкций;
- ER 1110-2-110, контрольно-измерительные приборы для безопасности – оценка проектов общестроительных работ;
- ER 1110-2-13, готовность к обеспечению безопасности плотины.

В таблице 1.2 приведены рекомендации по требованиям к точности для выполнения наблюдения деформации [140].

Таблица 1.2 – Требования к точности измерений целевых (деформационных) точек конструкции [140]

Бетонные конструкции плотины	
Долгосрочное движение	+ 5-10 мм
Вертикальная устойчивость/оседание	+ 2 мм
Сооружения насыпей, земляно-каменные дамбы	+ 20-30 мм

ЕМ 1110-2-4300 регламентирует горизонтальные перемещения.

Двумерные (2D) смещения измеряются в критическом направлении, перпендикулярно продольной оси плотины, на гребне. Измерения смещений выполняются относительно пары (створу) исходных точек, имеющих известные координаты.

В соответствии с приведенным документом заложены пункты геодезических наблюдений на плотине «Дукан», которая является главным объектом исследований настоящей работы [140] (рисунок 1.5а и 1.5б).

На рисунке 1.5б, показана схема сети геодезических наблюдений на плотине «Дукан». Геодезическая деформационная сеть представлена 8 исходными пунктами (А, В, LR1, L1, LR2, L2, LR3, L3), где А и В – тахеометрические станции наблюдений и цифры (1-12) – 12 деформационных марок, расположенных на верхней площадке плотины примерно на равных расстояниях (около 20 м) друг от друга.

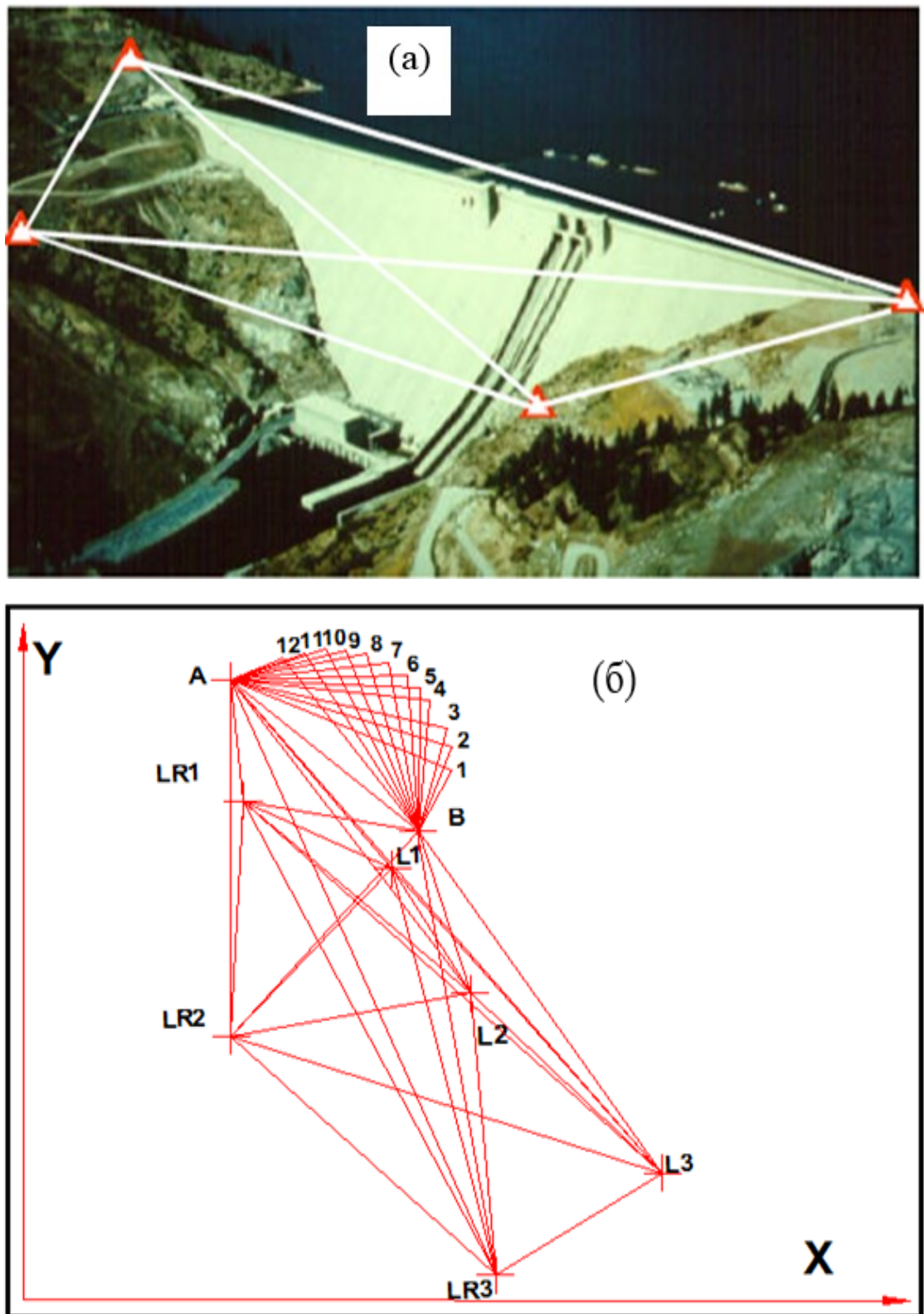


Рисунок 1.5 – Схемы геодезических сетей на плотине «Дукан» (а – разбивочная сеть; б – геодезическая деформационная сеть) [140]

### ***1.3.2 Нормативно-методические документы России***

Мониторинг состояния плотин осуществляется по нормативным

документам (ГОСТ Р 22.1.11-2002, Госстрой России. СП 11-104-97) [21,22]. Стандарт [21] устанавливает общие требования к составу и содержанию работ по мониторингу состояния водоподпорных гидротехнических сооружений (ГТС) (плотин) и их оснований, как потенциальных источников техногенной чрезвычайной ситуации, а также общие требования к прогнозированию возможных последствий чрезвычайных ситуаций, вызываемых гидродинамическими авариями на указанных сооружениях.

Мониторинг состояния водоподпорных ГТС сооружений (плотин) и прогнозирование чрезвычайных ситуаций, вызванных гидродинамическими авариями на ГТС, является составной частью системы государственного мониторинга и прогнозирования. (ГОСТ 22.1.01 и ГОСТ 22.1.02).

Мониторинг состояния водоподпорных ГТС осуществляют в целях обеспечения безопасной эксплуатации ГТС, безопасности населения и территорий, прилегающих к нижним и верхним бьефам плотин. Мониторинг состояния водоподпорных ГТС осуществляют постоянно, с установленной периодичностью по основным контролируемым показателям в соответствии с программой наблюдений [21].

Перечень основных показателей состояния водоподпорных гидротехнических сооружений и развития опасных процессов в грунтовых массивах, контролируемых в процессе мониторинга, включает в себя (СНиП 2.02.02, СНиП 2.06.01, СНиП 2.06.05, СНиП 2.06.06):

- вертикальные (осадки) и горизонтальные перемещения сооружений и их оснований;
- напряжения в сооружениях и в их основаниях (бетон, арматура, грунт и другие).

В настоящей работе нам пришлось определить характер распределения напряжений и деформаций в плотине, чтобы спроектировать расположение деформационных марок в теле плотины неравномерно, а с акцентом на возможные зоны разрушения и наибольшие деформации.

Интервал наблюдений бетонных ГТС (гравитационные, контрфорсные,



арочные плотины), согласно нормативному документу (ГОСТ Р 22.1.11-2002) – 2 раза в год, но это может привести к упущению начала негативного процесса деформирования.

В нормативных документах [21,22] акцентируется внимание на контроль уровня воды водохранилища, как важного фактора, определяющего давление на плотину. Вместе с тем, при организации геодезических наблюдений, последние не увязываются с уровнем воды.

Точность геодезических измерений на начальном этапе наблюдений за деформациями зданий и сооружений, в соответствии с [22], принимается соразмерно следующим средним квадратическим погрешностям измерений, относительно опорных геодезических пунктов: при определении вертикальных смещений на скальных грунтах 1-2 мм, на дисперсных грунтах – 2-3 мм, а горизонтальных смещений – 1-2 мм.

Поэтому в нашем случае с плотиной «Дукан», нам следует изучить взаимосвязь между уровнем воды в водохранилище и смещением плотины, чтобы установить порядок временных периодов наблюдения за деформацией плотины.

## **1.4 Современные методы измерений при деформационном мониторинге**

### ***1.4.1 Технология НЛС***

Наземное лазерное сканирование (НЛС) можно использовать как метод мониторинга перемещений больших конструкций, в частности больших плотин.

Лазерные сканеры приобрели очень огромное распространение, так как контроль может быть расширен на все элементы сканируемого объекта, вместо традиционных точечных измерений.

Сканеры дальнего действия, способны получать 3D-точки даже на расстоянии 400-500 м (большие расстояния не рассматриваются потому, что качество данных резко падает). В мониторинге бетонных плотин требуется точность в несколько мм, но, к сожалению, эти приборы не могут удовлетворить данные требования [107,133,137].

На рисунке 1.6 показано выполнение лазерной сканирующей съемки с

использованием двух сканеров на плотине у озера Канкано (Вальтеллина, Италия). Первый – сканер дальнего радиуса действия Riegl LMS-Z420i, второй – НЛС среднего радиуса действия Leica HDS 3000 [137].

Сканы, полученные с помощью Riegl LMS-Z420i, были сняты с 2-х точек, размещенных соответственно на среднем расстоянии около 200 м (станция 6000) и 300 м (станция 8000). Сканируемая область – центральная часть плотины, которая сосредотачивает в себе основные деформации. Сканы, сделанные с помощью Leica HDS 3000, были сняты с 5 точек, расположенных соответственно на расстоянии от 50 до 120 м от плотины. На карте (рисунок 1.6) станции обозначены метками 100, 200, 300, 400 и 500. Таким образом вся поверхность плотины была отсканирована [137] (рисунок 1.6).

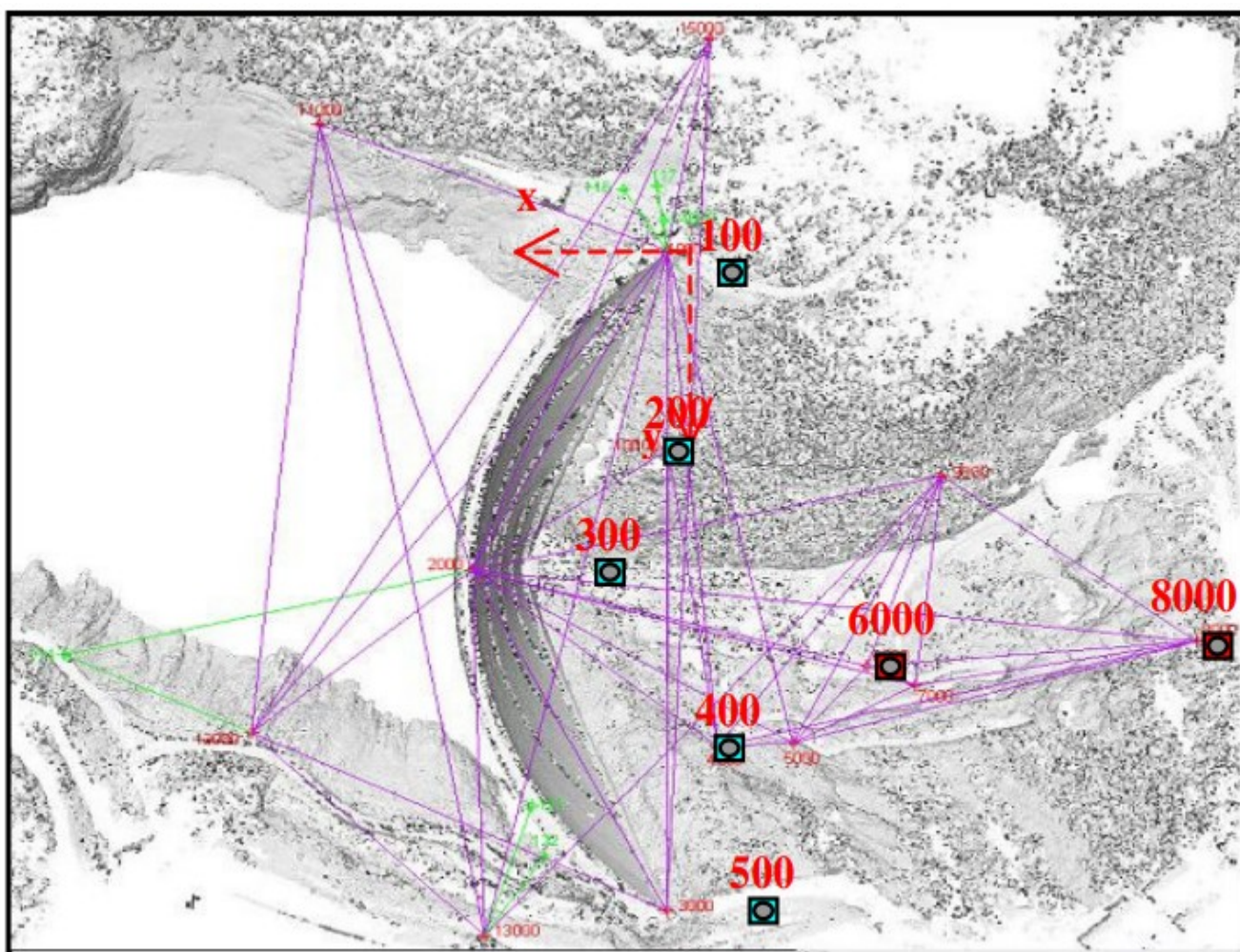


Рисунок 1.6 – Схема геодезической сети лазерного сканирования на плотине «Канкано» [137].

Несмотря на то, что разные сканы будут привязаны к единой системе

координат, деформационный анализ не может быть проведен путем непосредственного рассмотрения конкретных точек. Это связано с невозможностью сканирования одной и той же точки в разные сеансы измерения из-за принципа сканерных измерений (многоточечность) [137].

Использование технологии наземного лазерного сканирования (НЛС) может внести важный вклад в анализ деформации плотин в сочетании с другими технологиями измерений, например, тахеометрическими [121]. Благодаря многоточечности измерений по технологии НЛС объем данных получается большой, а точности недостаточно для определения деформации плотины, где точность требуется менее 1 мм. Вместе с тем, есть разработки по сравнению облаков точек разных сканов на основе построения TIN моделей [15]. Также при использовании лазерного сканера на точность контроля деформации влияют отражающие материалы [137].

#### ***1.4.2 Глобальная навигационная спутниковая система***

Приемники глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) в настоящее время обычно используются в приложениях для мониторинга, например, в оценке деформации земной коры и инфраструктуры. Использование ГНСС-технологии стало возможно в основном из-за недавних улучшений в инструментах и методологиях, которые позволяют получить высокое и точное позиционирование, круглосуточную доступность, полуавтоматическую обработку данных [10,82,99,114, 118].

Gökalp E. и Tasci L. [114] провели исследование, чтобы определить, могут ли измерения GPS соответствовать требованиям точности для измерений деформации плотины «Алтынкая». Плотина «Алтынкая» находится в 27 км к юго-западу от Бафры, Самсун и является второй по величине плотиной в Турции.

Согласно этому исследованию [114] деформационная сеть должна иметь не менее 6 исходных точек (1001-1006), в противном случае определение устойчивых точек может быть очень сложным, к тому же это не всегда возможно. Таким образом, 6 исходных точек были заложены на устойчивых участках. Чтобы

отслеживать и измерять возможные смещения, при строительстве плотины на ее поверхности установлено 10 деформационных марок (0003-00021). Затем в сеть деформаций была добавлена одна точка с номером 0023 (рисунок 1.7). В результате работы [114] было доказано, что система GPS (ГНСС) имеет возможность измерения базовой линии с точностью до  $3 \text{ мм} + (10^{-6} * S)$ . Здесь  $S$  – длина базовой линии в км.

В некоторых случаях этой точности недостаточно для мониторинга смещения плотин по сравнению с тахеометром точностью на пример  $1 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$  для измерения расстояний и 0,5 секунды для измерения углов.

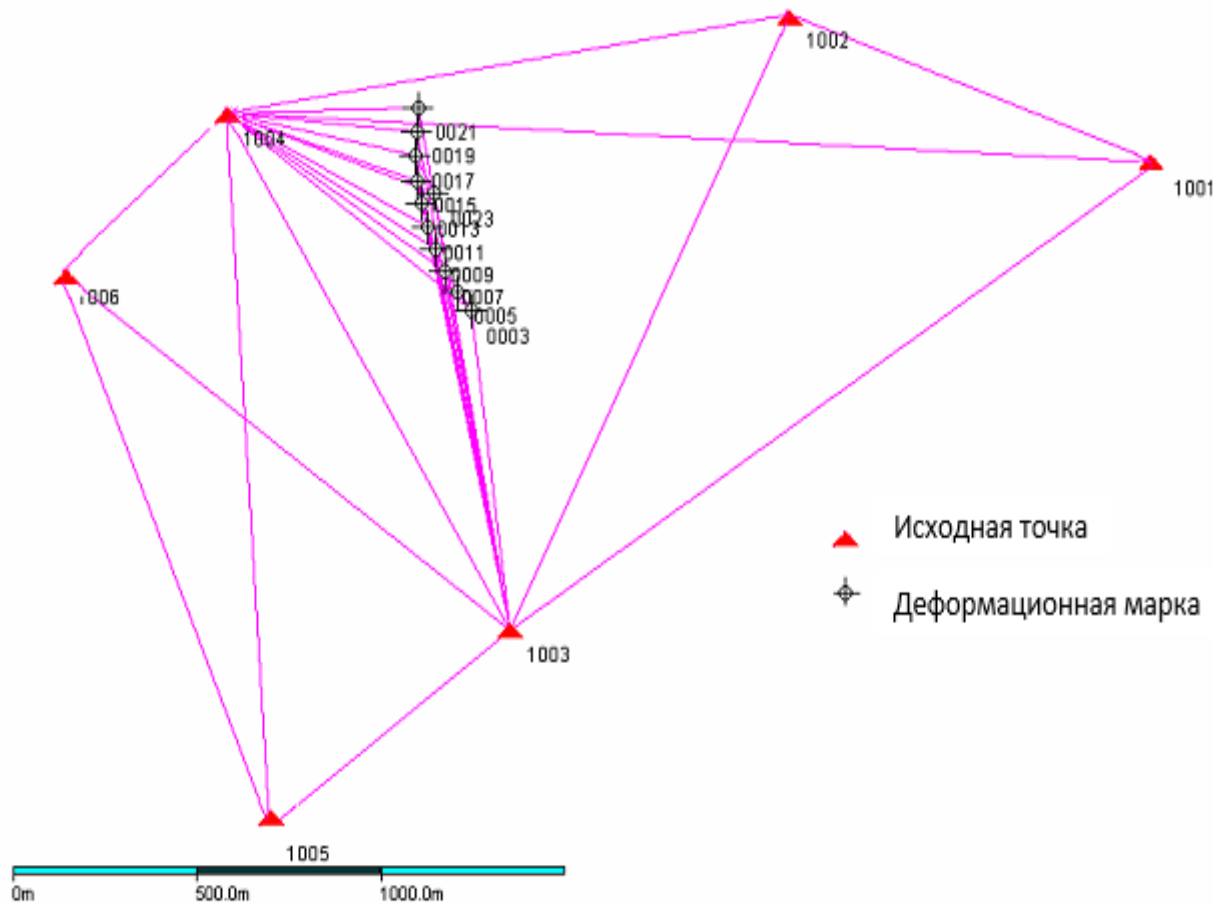


Рисунок 1.7 – Схема деформационной сети на плотине «Алтынкая» [114]

### 1.4.3 Тахеометрические измерения

Тахеометр является одним из наиболее распространенных геодезических приборов и на сегодня является основным в области мониторинга деформаций. Он широко используется для мониторинга деформаций зданий и сооружений, а

также мониторинга плотин. Он отличается высокой точностью и адаптивностью к автоматизации как измерений, так и обработки измеренной информации.

Точность определения горизонтальных и вертикальных смещений является ключом к успеху анализа деформационного процесса в целом.

Zhou J. [144] провел измерения с помощью роботизированного тахеометра и произвел анализ точности мониторинга деформации плотины ГЭС Жентуба I. Точность определений смещений плотины была проанализирована с помощью моделирования геодезической сети. Горизонтальные смещения определены с использованием методов полярных координат и прямой засечки. Затем была проанализирована точность вертикальных смещений по методике тригонометрического нивелирования. Точность измерений расстояний была определена как  $m_S = 0,6 \text{ мм} + 1.S.10^{-6}$ , а угловая точность измерений – как  $m_\beta = m_\gamma = 0,5''$ , что соответствовало широко используемому роботизированному тахеометру Leica Nova TM50.

Роботизированные тахеометры Leica Nova TM50 установлены на запроектированных станциях T1 на левом берегу и T2 на правом (рисунок 1.8). Контрольная точка R1, удаленная от зоны наблюдения на правом берегу, была выбрана в качестве ориентирной и исходной точки. Последовательно получены необработанные измерения расстояний и углов в направлении точек наблюдения M1 → M6 (деформационные марки). В результате проведен геодезический мониторинг деформации плотины, тем самым обеспечен контроль состояния плотины.

Данное исследование показано в качестве примера современного применения тахеометрических измерений.

Для нашего случая необходимо проведение подобных высокоточных наблюдений за деформациями, но с учетом влияния уровня воды в водохранилище плотины, для дальнейшей корректировки интервала времени за период наблюдения в течение года, а также изучения априорных горизонтальных смещений плотины для оптимизации положений деформационных марок.



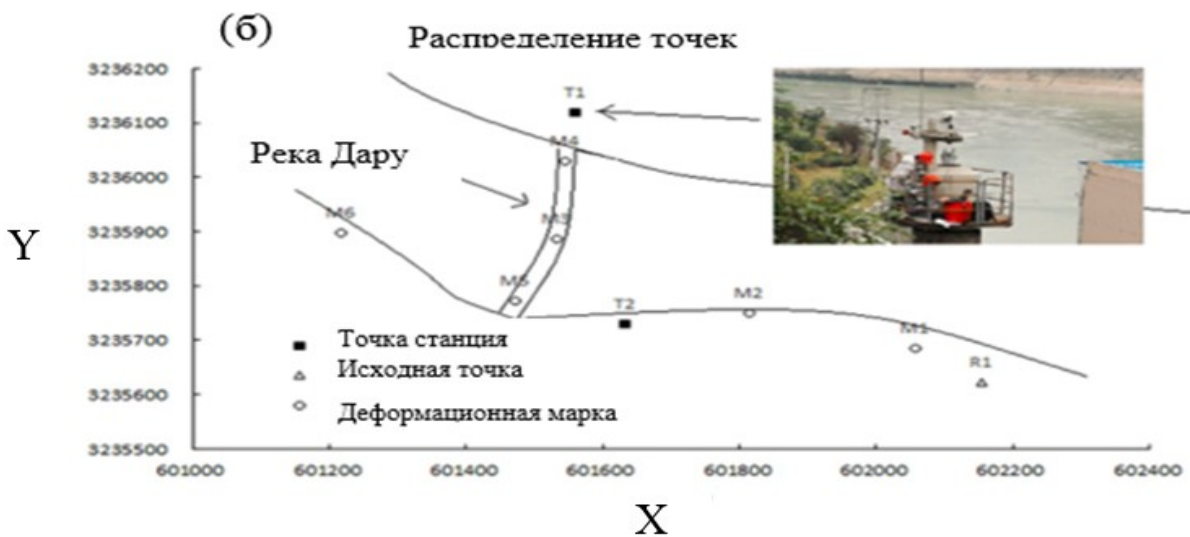


Рисунок 1.8 – Схема организации мониторинга на плотине Жентуба: а – вид плотины ГЭС Жентуба, б – схема деформационной сети) [144]

#### ***1.4.4 Технология радиолокационной интерферометрии***

Бурное развитие космической техники в последние двадцать лет позволило создать технологию дистанционного наблюдения, позволяющую определить малые смещения земной поверхности.

Этот прогресс стал возможным благодаря полученным микроволновым изображениями через радиолокаторы с синтезированной апертурой (SAR) на спутниках и развитию инструментов и способов для обработки интерферометрических картин. GB-SAR – это система мониторинга, состоящая в основном из следующих четырех отдельных модулей: 1) радарный датчик, способный передавать и принимать микроволновые сигналы; 2) механическая

сканирующая рейка длиной 2 м, в случае наличия, вдоль датчика перемещается для получения изображения синтетической апертуры; 3) портативный компьютер для сбора и обработки данных; 4) модуль питания, позволяющий проводить непрерывные измерения.

Этот метод был применен для наблюдения масштабных явлений таких как, неустойчивые склоны, одиночные ледники и другие [44,105].

Разработанная в конце 1990-х гг. разновидность метода дифференциальной интерферометрии ([http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/radiolocation/files/2razd/2.7.practice\\_interf.html](http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/radiolocation/files/2razd/2.7.practice_interf.html)), метод постоянных рассеивателей PSInSAR (permanent/persistent scatterer interferometry), позволяет достигать очень высокой (миллиметровой) точности измерения смещений. Этот метод использует в своей основе устройство, рассеивающее радиосигнал на участки местности – специально сооруженные уголкового отражатели или же подобные им объекты. Для обработки этим методом, требуются большие временные серии данных, полученных в интерферометрическом режиме съемки. Так разработчики программы SARscape рекомендуют использовать не менее 30 результатов таких съемок. Этот метод часто используется для оценки стабильности зданий, трубопроводов, выявления смещений поверхности в результате подземного строительства и т.д. Результаты обработки серий радиолокационных данных методом постоянных рассеивателей, как правило, представляют собой набор точек, для каждой из которых определены величины или скорости смещений за наблюдаемый период.

Huang Q. и др. [115] провели исследование об использовании наземного радара с синтезированной апертурой (GB-SAR) для дистанционного мониторинга плотины «Гехейан» в Китае. Для построения интерферограмм было использовано более 400 изображений. Результаты радиолокационного мониторинга сравнивались с данными, зафиксированными отвесами, установленными на плотине. Согласие между смещениями, полученными из интерферометрических данных, и отвесами демонстрирует возможность GB-SAR для мониторинга деформации с преимуществом покрытия большой площади.

На рисунке 1.9 показана система IBIS-L, которая была установлена на бетонной устойчивой платформе, на террасе левого берега, на расстоянии 1300 м [115].

Анализируя метод радарной интерферометрии, надо сказать, что он требует большого количества изображений для того, чтобы получить информацию о смещении плотин, а значит, нужен анализ огромного объема данных. Применительно к мониторингу плотин следует заметить, что с помощью SAR-интерферометрии обнаружены максимальные смещения плотин в ее центре. Метод достаточно дорогостоящий и требующий помимо глубоких специальных знаний, специального программного обеспечения и, как уже было сказано, большого количества снимков. Использование стандартного набора, предлагаемого компаниями, продвигающими продукт, позволяет получение сантиметровой точности, которая уступает результатам наблюдений за целями на плотине с использованием тахеометра.

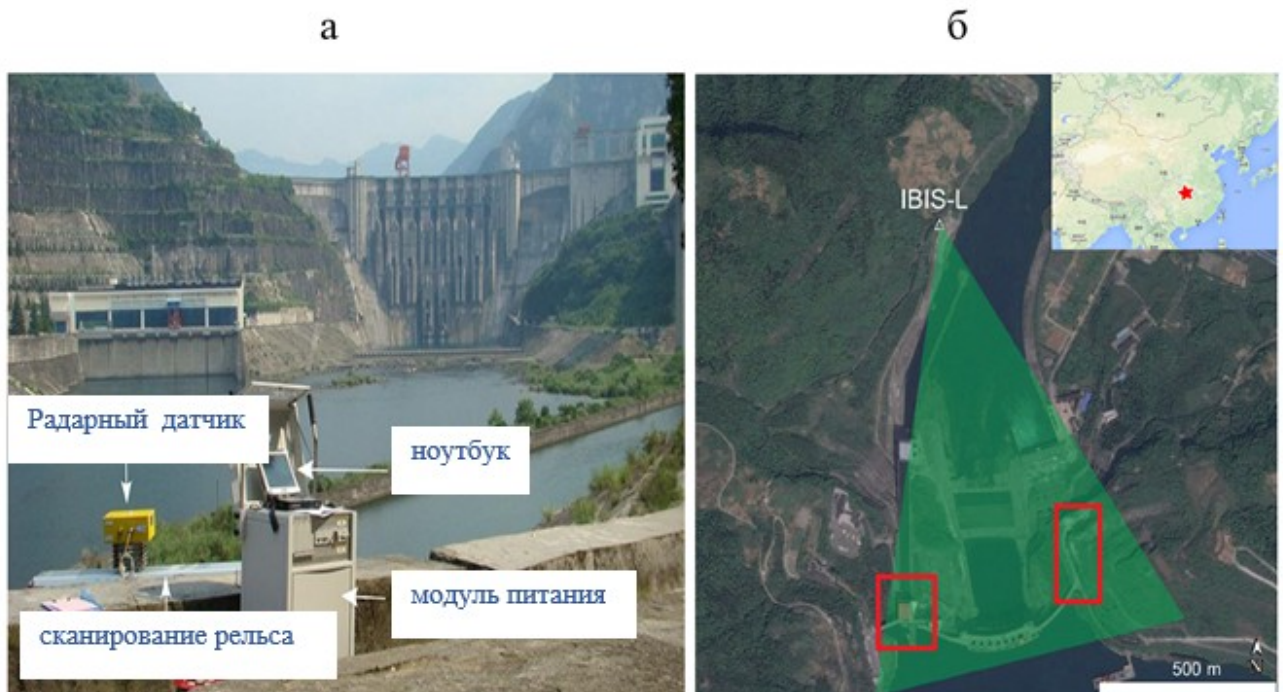


Рисунок 1.9 – Схема мониторинга с применением SAR-интерферометрии: а – система IBIS-L, установленная в районе плотины «Гехейан»; б – географическое положение плотины «Гехейан» и поле обзора GB-SAR) [115]



### **1.4.5 Геометрическое и тригонометрическое нивелирование**

В геодезии и в частности при инженерных изысканиях и строительстве требуется определение отметок различных конструкций, зданий и сооружений. Наиболее точно их определяют геодезическими методами: геометрическим и тригонометрическим нивелированием [130].

#### **Геометрическое нивелирование**

Последние достижения в области электроники позволяют геодезистам выполнять цифровое нивелирование с помощью электронных приборов. Цифровое измерение по рейке со штрих-кодом автоматически записывает данные для дальнейшей обработки на компьютере. Цифровые нивелиры – это современные многофункциональные геодезические приборы, совмещающие функции высокоточного оптического нивелира, электронного запоминающего устройства и встроенного программного обеспечения для обработки полученных измерений. Принцип работы с цифровым нивелиром отличается от работы с оптическими нивелирами лишь в том, что процесс снятия отсчета по рейке со штрих-кодом происходит автоматически.

#### **Тригонометрическое нивелирование**

Тригонометрическое нивелирование – это метод получения разницы высот с использованием измеренных наклонных расстояний и углов. Точность тригонометрического нивелирования в основном зависит от кривизны и рефракции Земли, которые напрямую влияют на линейно-угловые измерения.

На рисунке 1.10 показан принцип тригонометрического нивелирования, где  $\varphi$  – угол наклона,  $i$  – высота прибора,  $d'$  – наклонное расстояние,  $d_H$  – горизонтальное расстояние. Высоту точки измерения и превышение можно вычислить по формулам (1.1) и (1.2) [130]:

$$H_B = H_A + i + \Delta h - 1 \quad (1.1)$$

$$\Delta h = d' \cdot \cos \varphi \quad (1.2)$$

Применительно к разработке мониторинга плотин, геометрическое и тригонометрическое нивелирование, пожалуй, остается наиболее эффективным

методом для определения вертикальных перемещений. Вместе с тем, как показывает практика, особенно для бетонных плотин важно знание перемещений плотины в квазигоризонтальных направлениях.

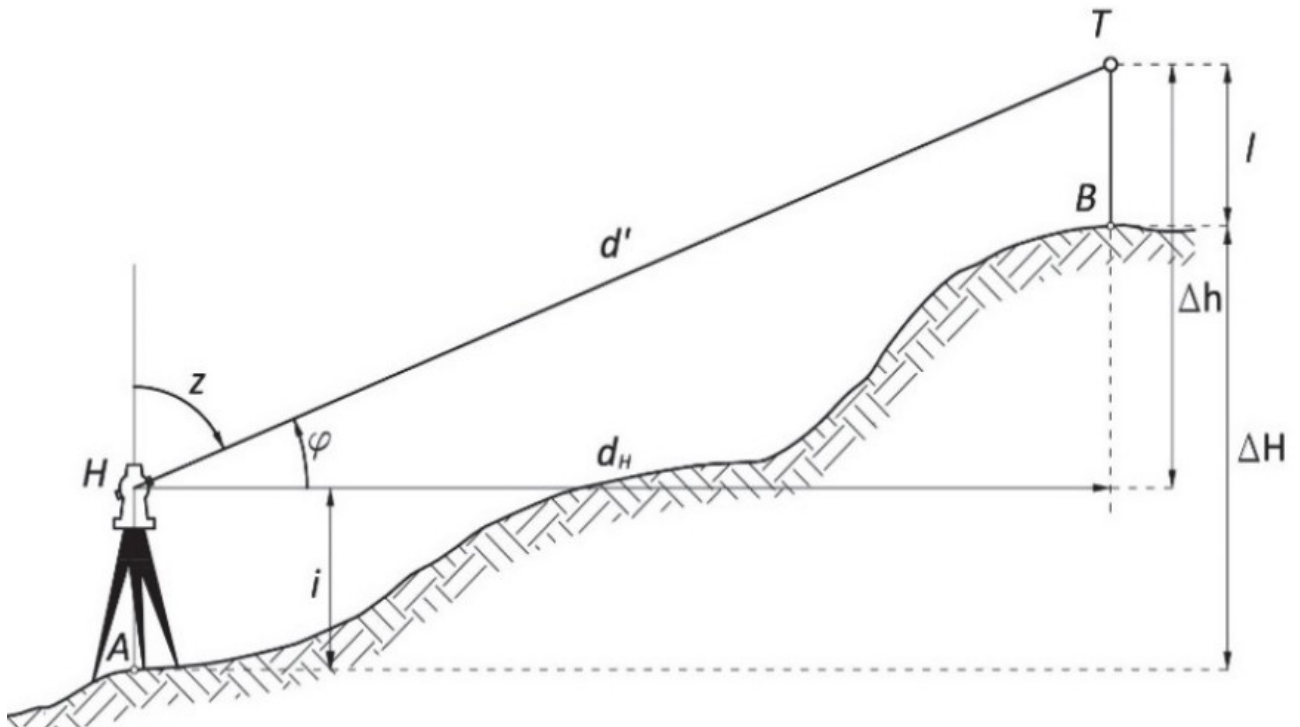


Рисунок 1.10 – Схема тригонометрического нивелирования [130].

### 1.5 Анализ литературных источников

Основная цель работы Bayraka T. [97,98] состояла в том, чтобы выяснить, насколько повышение уровня водохранилища влияет на деформации плотины. Исследования проведены на плотине «Ямула» на реке Кызылырмак. Она представляет собой большую земляную плотину, 120 м высотой и протяжением 510 м. Эта плотина расположена в 2 км от города Ямула и в 40 км от провинции Кайсери в центральной Турции.

Анализ изменений уровня воды в водохранилище с помощью моделирования показал, что изменения уровня воды в водохранилище являются важным пусковым фактором для деформаций плотины «Ямула». Разработанный метод теоретического анализа позволяет определить взаимосвязь между деформацией плотины и изменением уровня воды водохранилища.

Однако, автор не рассматривал порядок интервалов наблюдения плотины в

зависимости от степени опасности уровня воды водохранилища.

Alba M. и другие исследователи в работе [137] представили первые результаты проекта, направленного на изучение деформаций больших бетонных плотин технологией НЛС. Для этого, на плотине озера Канкано (Вальтеллина, Италия) был организован мониторинг. Плотина озера Канкано (около 1900 м над уровнем моря) была построена в 1950 году на реке Адда, создав бассейн объемом около 124 миллионов м<sup>3</sup> воды.

Авторы показали, что использование технологии НЛС может внести важный вклад в анализ деформации больших плотин. В результате были получены картины деформаций нижнего бьефа плотины. На них можно увидеть некоторые деформации, полученные в результате сравнения двух облаков точек, сканированных лазером, снятых в разное время. Если наземные сканеры позволят получить более точное измерение деформаций (точность менее  $\pm 1$  мм на дальности в несколько сотен метров), их можно будет использовать при перманентных измерениях.

Вместе с тем, в данной работе авторы не рассматривали распределение деформаций по плотине из-за неравномерности. Кроме того, не изучали влияние уровня воды на величину смещения плотины.

Berberan в своей работе [100] показал, что технология НЛС может существенно улучшить визуальные осмотры земляной плотины Larão dam. Плотина Larão (Marcelino, 2004), которая представляет собой сооружение высотой 39,5 м с длиной гребня 96 м, находится в центре Португалии рядом с городком под названием Мортагуа. Автор достиг точности съемки до сантиметра. С развитием лазерных технологий эта точность будет повышаться.

Усовершенствование сканеров и разработка калибровочных моделей уменьшат инструментальные ошибки. Ожидается, что этот подход позволит в ближайшем будущем обеспечить точность позиционирования до геодезического метода (соразмерно тахеометрам). Достаточна ли фактическая точность лазерного сканера для анализа поведения плотины – задача для инженера-исследователя.

В данной работе автор не рассматривал факторы, влияющие на деформации

плотины, такие как объем воды водохранилища и давление, а также распределение деформаций на плотине.

Luzi G. и другие авторы в работе [120] описали два новых метода дистанционного зондирования на основе технологии радарной интерферометрии, которые могут быть использованы для мониторинга плотин. Первый метод использует данные, полученные радаром с синтезированной апертурой (SAR) для получения 2D-изображений. Эта система измерений может обеспечить оценку смещения точки на земном объекте с субмиллиметровой точностью. Вторая технология использует радары с реальной апертурой (RAR) и может использоваться для измерения объектов (смещений) в определенном направлении. В частности, кратко сообщается о двухдневном мониторинге плотины и обнаружение ветровых колебаний башни и здания в течение нескольких минут.

В работе An Archgravity [120] плотина «Канкано» (Альта Вальтеллина, Италия) была исследована командой Миланского политехнического университета по этой методике. Два радиолокационных метода RAR и SAR протестированы для мониторинга плотины и других деформаций искусственных объектов инфраструктуры и оказались очень многообещающими.

В данной работе не рассматривалась связь деформации плотины от уровня воды в водохранилище.

Zhou J. [144] описал систему автоматического мониторинга деформации двух плотин гидроэлектростанций Жентуба I и Даганшань в бассейне реки Даду в провинции Сычуань (Китай) с использованием роботизированных тахеометров. В исследовании представлены математические модели для получения горизонтальных и вертикальных перемещений и соответствующие формулы оценки на основе МНК.

В этом исследовании учитывалось влияние атмосферной рефракции на точность мониторинга деформации плотины, но факторы, влияющие на поведение деформации плотины (например, уровень воды), не рассматривались.

Gkalp E. в своей работе [114] основной целью поставил изучение деформации на плотины «Алтынкая», которая находится в 27 км к юго-западу от

Бафры и является второй по величине насыпной плотиной в Турции. Автор рассмотрел взаимосвязь водной нагрузки на разных уровнях водохранилища на деформации плотины. Кроме того, было проведено исследование, чтобы определить, могут ли измерения GPS/ГНСС соответствовать требованиям точности измерений деформаций плотин. Для контроля и изучения деформации была создана геодезическая сеть, состоящая из 6 исходных пунктов и 11 деформационных марок. Измерения проводились четыре раза на протяжении 2-х лет с использованием двухчастотных ГНСС-приемников статическими методами. На каждом цикле измерений после обработки измерений определялись координаты деформационных марок. Затем были рассчитаны различия между координатами в циклах.

В этой работе автор не рассматривал вопрос развития деформационной сети в соответствии с картиной априорных (расчетных) деформаций.

Альсадик Б. и Аль-Канани Ю. в своей работе [94] сосредоточились на оценке смещения плотины «Мосул» на севере Ирака относительно координат точек свободной геодезической сети, т.е. не используя исходные точки. На каждом цикле измерений ( $> 1$ ) выполняли корректировку сети по методу наименьших квадратов и обратных расчетов. На основе статистического анализа расчетных смещений плотины было установлено, что в течение длительного периода времени, составившего 16 лет (1989-2005 гг.), фактическая деформация происходила в середине плотины.

Результаты этой работы весьма интересны как с точки зрения организации самих наблюдений (использовалась свободная сеть), так и установленного по фактическим данным вывода о приуроченности смещений к центру плотины. В то же время в этой работе авторы не рассматривали вопросы точности деформационной сети, а также влияния уровня воды водохранилища Мосул на величину деформации.

Piripon S. и другие авторы [131]. применили дистанционное зондирование для мониторинга уровня воды в водохранилище плотины «Кастелло» на водохранилище Магаццоло, которая находится примерно в 30 км от Агридженто

на юге Италии). Поверхность плотины оценивалась с использованием как оптических камер (изображения Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM + SLC-Off, Landsat 8 OLI-TIRS и ASTER), так и данных радаров с синтезированной апертурой (SAR) (Cosmo SkyMed и TerraSAR-X). Изображения характеризовались различными режимами с геометрическим и спектральным разрешением, что позволяло оценить альтернативные и дополнительные методы.

В данной работе авторы не рассматривали влияние уровня воды на деформации плотины.

Использование дистанционного зондирования для определения уровней воды весьма перспективно, но конечно есть вопрос о точности таких определений. Объем водохранилища – важная составляющая исследований, его можно рассчитать с использованием топографической карты.

Lia W. и другие авторы [123] описали мониторинг деформаций хвостохранилища (хвостовая дамба концентратора – земляная плотина, построенная в 1985 году). В его основе измерения по технологии GPS позиционирования.

В данной работе авторы оценивали только точность измерений, но не учитывали факторы, влияющие на точность оценки деформационного процесса, т.е. влияние уровня воды на смещение плотины, определяющего порядок наблюдений.

Профессор Kulkarni M. N. [119] представил результаты исследований по оценке деформаций плотины «Койна» (Западная Махараштра, Индия). Использовались GPS-определения точек деформационной сети.

В итоге рекомендуется проводить циклы наблюдений не реже двух раз в год в течение 4-5 лет. Комплексный анализ этих результатов с результатами, полученными с помощью контрольно-измерительной аппаратуры плотины, поможет понять поведение конструкции плотины и ее окружения при различных условиях нагрузки и сейсмической активности.

В этой работе не рассматривали распределение деформации на плотины и оценку устойчивости исходных точек.

В ряде работ решены важные задачи, связанные с мониторингом плотин [50,70,75,83, 113,107]. Однако взаимосвязь между уровнем воды водохранилища и величиной деформации плотины для определения порядка проведения геодезических наблюдений, моделирование деформированного состояния плотины для определения характера распределения деформаций и проектирования расположения деформационных марок детально не рассматриваются.

## **1.6 Предпосылки совершенствования методики наблюдений за деформациями плотин**

### **1.6.1 Фактические данные о деформировании плотин (на примере плотины «Дукан»)**

Как было показано при анализе состояния вопроса о наблюдениях за плотинами, важными аспектами являются: определение порядка наблюдений и предварительная оценка распределения деформаций в плотине. Первый, связан с выявлением зависимости уровня воды в водохранилище с ее деформациями. Чтобы изучить эту взаимосвязь, нужны фактические данные наблюдений за деформацией плотины.

Для нашего исследования (система «водохранилище-плотина» Дукан) имеются данные о наблюдениях (временной период 2005-2018 гг.). Эти данные необходимы для изучения характера деформации плотины при изменении уровня воды в водохранилище [31,41,49].

Мониторинг (геодезические наблюдения), проводимый в настоящее время Министерством водных ресурсов Ирака, выполняются для плотины «Дукан» в два этапа. Деформационная сеть представлена на рисунке 1.5:

1. Сначала измеряются тахеометрическим способом исходные пункты сети (А-L3). При этом линия L3-LR3 используется в качестве базовой линии. Выполняются линейно-угловые измерения со всех точек сети. Затем, выполняется уравнивание измерений по МНК [128] с помощью программы «Adjustment» [111] (рисунок 1.11).

В результате определяются координаты тахеометрических станций А и В.

2. С тахеометрических станций А и В проводятся наблюдения за деформационными марками. При этом выполняются измерения по способу «полярной засечки». Использовался тахеометр TOPCON 7501 с угловой точностью 0,5” с и линейной точностью 1 мм + 1 ppm.

Ниже приведена таблица 1.3, в которой представлены в качестве примера результаты уравненных координат деформационной сети и деформационных марок (1-12).

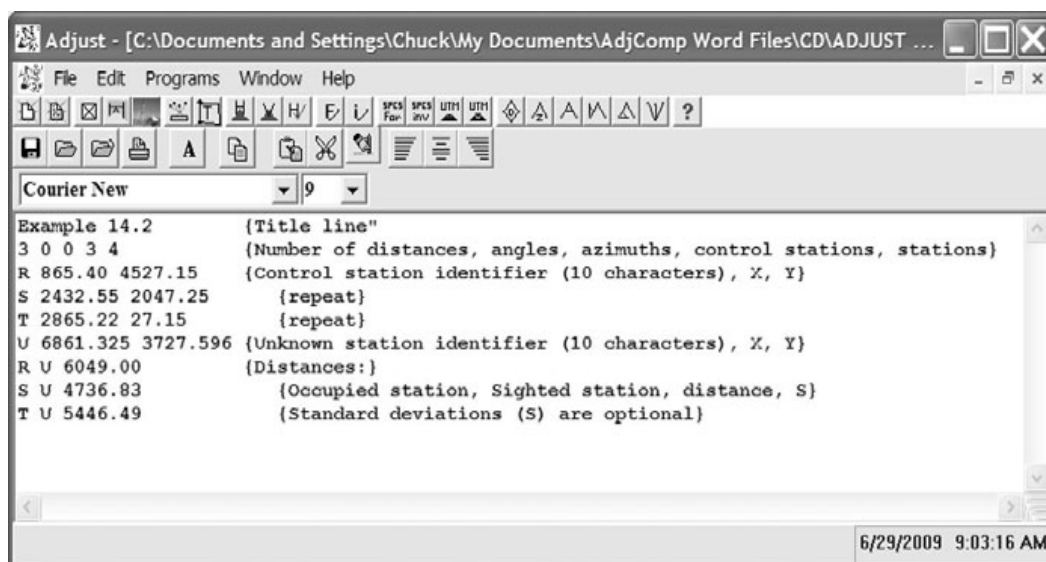


Рисунок 1.11 – Интерфейс программы «Adjustment»

Таблица 1.3 – Результаты наблюдений за деформациями по одному циклу (Программа «Adjustment»)

-----				
DUKAN DAM PROJECT (TARGETS)/2010				
Adjusted stations				
*****				
Station	X	Y	Sx	Sy
-----				
A	660,229.2093	768,732.9705	0.00000	0.00000
B	660,401.4047	768,587.0730	0.00000	0.00000
L1	660,377.7431	768,552.0118	0.00000	0.00000
LR1	660,239.1393	768,619.3727	0.00000	0.00000
1	660,435.7832	768,644.5916	0.00362	0.00468
2	660,434.0702	768,666.3338	0.00352	0.00486
3	660,429.4830	768,683.9963	0.00363	0.00490
4	660,415.4161	768,711.4927	0.00333	0.00477
5	660,406.4066	768,722.8635	0.00344	0.00465
6	660,393.7122	768,734.8811	0.00358	0.00446
7	660,376.4519	768,746.3980	0.00373	0.00418



## Продолжение таблицы 1.3

8	660,356.3971	768,754.9411	0.00382	0.00383
9	660,337.8587	768,759.1507	0.00385	0.00348
10	660,317.5965	768,760.1726	0.00380	0.00309
11	660,297.6783	768,757.2549	0.00367	0.00264
12	660,277.5447	768,753.3845	0.00349	0.00224

\*\*\*\*\*

## Adjusted Angle Observations

\*\*\*\*\*

Station	Station	Station		Angle	V	S
Backsighted	Occupied	Foresighted				
B	A	1	342°53'20"	-3.0"	5.0	
B	A	2	337°44'41"	-6.3"	5.1	
B	A	3	333°28'02"	-3.6"	5.2	
B	A	4	326°18'21"	-4.3"	5.4	
B	A	5	322°59'26"	-1.8"	5.5	
B	A	6	319°03'38"	-2.5"	5.6	
B	A	7	314°30'56"	-2.1"	5.7	
B	A	8	309°55'32"	0.7"	5.9	
B	A	9	306°10'42"	-2.0"	6.1	
B	A	10	302°37'11"	-0.8"	6.2	
B	A	11	300°11'51"	0.4"	6.4	
B	A	12	296°49'47"	0.2"	6.5	
A	B	1	80°35'33"	-0.6"	6.6	
A	B	2	72°07'26"	-1.6"	6.6	
A	B	3	65°52'56"	-1.1"	6.5	
A	B	4	56°09'05"	-8.2"	5.2	
A	B	5	51°50'08"	-6.6"	5.2	
A	B	6	46°44'49"	-3.1"	5.1	
A	B	7	40°49'30"	-8.0"	4.9	
A	B	8	34°43'03"	-2.5"	4.8	
A	B	9	29°27'27"	-7.7"	4.6	
A	B	10	23°53'30"	-5.2"	4.4	
A	B	11	18°21'49"	-3.8"	4.1	
A	B	12	13°02'58"	-4.4"	3.7	
L1	LR1	1	326°46'20"	3.4"	4.5	
L1	LR1	2	320°32'07"	7.2"	4.5	
L1	LR1	3	315°19'39"	4.2"	4.4	
L1	LR1	4	306°29'22"	4.0"	4.2	
L1	LR1	5	302°20'05"	1.0"	4.1	
L1	LR1	6	297°18'38"	3.2"	4.0	
L1	LR1	7	291°18'33"	1.8"	4.0	
L1	LR1	8	284°56'17"	-1.8"	3.9	
L1	LR1	9	279°18'45"	2.6"	4.0	
L1	LR1	10	273°12'29"	1.0"	4.0	
L1	LR1	11	267°05'04"	-2.0"	4.2	
L1	LR1	12	260°04'18"	-1.5"	4.5	
LR1	L1	4	77°22'17"	8.9"	3.9	
LR1	L1	5	73°36'15"	8.0"	3.9	
LR1	L1	6	69°04'16"	2.1"	3.9	
LR1	L1	7	63°42'00"	8.5"	4.0	

## Продолжение таблицы 1.3

LR1	L1	8	58°04'32"	4.2"	3.9
LR1	L1	9	53°10'54"	6.6"	3.9
LR1	L1	10	47°57'51"	4.9"	3.8
LR1	L1	11	42°46'11"	6.3"	3.7
LR1	L1	12	37°37'36"	6.6"	3.5
*****					
Adjustment Statistics					
***** Iterations = 2				Redundancies = 21	
Reference So = ±0.0000					
Convergence!		Reference Variance = 0.00000000			

После завершения процесса определения координат деформационных марок, они сравниваются с координатами нулевого цикла мониторинга, и их разница показывает горизонтальные смещения. Смещения деформационных марок показаны в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Величины смещений деформационных марок в 2010 году

№	наблюдение - 0		наблюдение - 4		смещение		общее смещение(м)
	X(м)	Y(м)	X(м)	Y(м)	ΔX(м)	ΔY(м)	
L3	660624.6060	768260.1500	660624.6060	768260.1500	0.0000	0.0000	0.0000
LR3	660468.4365	768167.3620	660468.4365	768167.3620	0.0000	0.0000	0.0000
L2	660448.6209	768433.4254	660448.6265	768433.4287	0.0056	0.0033	0.0065
LR2	660225.2637	768396.4785	660225.2686	768396.4838	0.0049	0.0053	0.0072
L1	660377.7387	768552.0069	660377.7431	768552.0118	0.0044	0.0049	0.0066
LR1	660239.1390	768619.3664	660239.1393	768619.3727	0.0003	0.0063	0.0063
A	660229.2058	768732.9620	660229.2093	768732.9705	0.0035	0.0085	0.0092
B	660401.3978	768587.0657	660401.4047	768587.0730	0.0069	0.0073	0.0100
1	660435.7774	768644.5942	660435.7832	768644.5916	0.0058	-0.0026	0.0064
2	660434.0613	768666.3335	660434.0702	768666.3338	0.0089	0.0003	0.0089
3	660429.4723	768683.9958	660429.4830	768683.9963	0.0107	0.0005	0.0107
4	660415.4103	768711.4902	660415.4161	768711.4927	0.0058	0.0025	0.0063
5	660406.4024	768722.8631	660406.4066	768722.8635	0.0042	0.0004	0.0042
6	660393.7042	768734.8760	660393.7122	768734.8811	0.0080	0.0051	0.0095
7	660376.4478	768746.3929	660376.4519	768746.3980	0.0041	0.0051	0.0065
8	660356.3915	768754.9412	660356.3971	768754.9411	0.0056	-0.0001	0.0056
9	660337.8520	768759.1487	660337.8587	768759.1507	0.0067	0.0020	0.0070
10	660317.5950	768760.1735	660317.5965	768760.1726	0.0015	-0.0009	0.0017
11	660297.6784	768757.2562	660297.6783	768757.2549	-0.0001	-0.0013	0.0013
12	660277.5414	768753.3819	660277.5447	768753.3845	0.0033	0.0026	0.0042

Эти фактические данные о деформации плотины обеспечивают проведение исследований на предмет качества выполнения уже проведенных работ, и как эти измерения увязываются с уровнем воды в озере Дукан, а также справедливо ли

равномерное распределение деформационных марок и другие вопросы, решение которых послужит совершенствованию методики мониторинга плотин.

Для такого совершенствования необходимы также модели водохранилища, картографические материалы его дна. Одним из наиболее традиционных способов создания трехмерной цифровой модели местности являются ГИС-технологии.

### ***1.6.2 Программное обеспечение для построения цифровых 3D моделей водохранилища***

Географическая информационная система (ГИС) – это возможность нового взгляда на окружающий нас мир. ГИС – это современная компьютерная технология для отображения и анализа объектов реального мира, также событий, происходящих на нашей планете. Эта технология объединяет традиционные операции работы с базами данных, такими как запрос и статистический анализ, с преимуществами полноценной визуализации и географического (пространственного) анализа, которые предоставляет карта. Эти возможности отличают ГИС от других информационных систем и обеспечивают уникальные возможности для ее применения в широком спектре задач, связанных с анализом и прогнозом явлений и событий окружающего мира, с осмыслением и выделением главных факторов и причин, а также их возможных последствий. Создание карт и географического анализа не является чем-то новым. Однако технология ГИС предоставляет новый [71], более современный, более эффективный, удобный и быстрый подход к анализу проблем и решению задач, стоящих перед человечеством в целом и конкретной организацией или группой людей, в частности. Она автоматизирует процедуру анализа и прогноза. До начала применения ГИС лишь немногие обладали искусством обобщения и полноценного анализа географической информации с целью обоснованного принятия оптимальных решений, основанных на современных подходах и средствах.

В настоящее время ГИС – это многомиллионная индустрия, в которую вовлечены сотни тысяч людей во всем мире. Эту технологию применяют

практически во всех сферах человеческой деятельности – будь то анализ таких глобальных проблем как перенаселение, загрязнение территории, сокращение лесных угодий, природные катастрофы, так и решение частных задач, таких как поиск наилучшего маршрута между пунктами, подбор оптимального расположения нового офиса, поиск дома по адресу, прокладка трубопровода на местности, различные муниципальные задачи [71].

Трехмерная карта представляет земную поверхность и дает лучшее представление по сравнению с двухмерной картой [134,142]. Цифровая модель рельефа (DEM) является одной из наиболее важных пространственных наборов данных во многих географических информационных системах (ГИС). Это определяется как упорядоченный или неупорядоченный цифровой набор высоты земли (пятно высот) для представления местности. В исследованиях есть три обычно используемых термина, а именно, цифровая модель рельефа (ЦМР), цифровая модель местности (ЦММ) и цифровая модель поверхности (ЦМП) [143].

В диссертационной работе использовали ГИС-технологии (GIS10.4/ArcMap/3D Analyst tool) и карты в масштабе 1:20000, высотой сечения рельефа 5 м для построения трехмерной цифровой модели и определения объема водной массы для дальнейшего выявления расчетным путем распределения деформаций в плотине.

### ***1.6.3 Инженерные программные комплексы по оценке НДС различных объектов***

Использование цифровой модели позволяет с одной стороны оперативно определять объемы воды по текущему уровню водохранилища и с другой, использовать модель для расчета ее деформированного состояния.

Моделирование деформированного состояния плотины позволяет численно, для общего случая, подтвердить связь уровня воды в водохранилище со смещениями плотины. Помимо этого, моделирование решает еще одну важную задачу: определение характера распределения напряжений и деформаций в

плотине, который позволит эффективно проектировать деформационные марки в теле плотины.

Для этих целей может быть использован известный ПК «НЕДРА» для трехмерного моделирования [54], однако гораздо эффективнее разработать специальную программу для расчета деформированного состояния плотины.

#### ***1.6.4 Математическое обеспечение моделирования различных схем геодезических сетей и оценка точности ее пунктов***

Точность оценки деформационного процесса плотины зависит от многих параметров: инструментальная точность, используемых приборов измерений, количество исходных (съёмочных) точек, из которых наблюдаются деформационные марки на плотине, расстояния между исходными точками и деформационными марками, угол между линией наблюдения и линией деформационных марок. Эти параметры и их соотношение необходимо исследовать для совершенствования мониторинга плотины «Дукан». Возможность проведения таких исследований обеспечивается использованием мощных средств автоматизированного проектирования, таких как AutoCAD, в которой можно построить схему деформационной сети с исходными пунктами (тахеометрические станции, с которых определяются расстояния до деформационных марок), а все вычисления с применением МНК выполнять в популярном продукте MathCad.

Кроме того, предпосылками к совершенствованию наблюдений по схеме исходные пункты – деформационные марки является возможность модификации способа проверки оценки стабильности исходных пунктов (способ Костехеля), заключающаяся в адаптации его к горизонтальным смещениям.

### **1.7 Выводы по первой главе**

Министерство водных ресурсов Ирака поставило задачу проведения мониторинга состояния крупных плотин для обеспечения водой населения и в связи с острой ее нехваткой.

На основе анализа предыдущих исследований, связанных с мониторингом

деформации плотин, современных методов мониторинга и нормативно-методических документов по мониторингу состояния плотин и приведенных предпосылок к совершенствованию методики наблюдений за деформациями плотин тема диссертации и ее цель представляются весьма актуальной задачей.

Из анализа состояния изученности вопроса вытекает необходимость учитывать влияние уровня воды в водохранилище плотины при организации порядка геодезических наблюдений. Кроме того, было показано, что обычно используется равномерное размещение деформационных марок. В то же время вполне естественно предположить, что деформированное состояние плотины не равномерно и весьма эффективным было бы изучение деформированного состояния для более репрезентативного размещения деформационных марок.

Проведенный обзор методов измерений позволяет заключить, что наиболее подходящим способом проведения процесса мониторинга с обеспечением нормативной точности (до миллиметра) является тахеометрические измерения. Вместе с тем в перспективе возможно комбинирование разных методов измерений, что составляет другие направления исследований.

На основе приведенных выводов сформулированы актуальные задачи исследований, решение которых позволит совершенствование геодезического мониторинга плотин:

- Изучение взаимосвязи между уровнем воды и величиной деформации плотины для определения порядка проведения геодезических наблюдений;
- Выполнение моделирования деформированного состояния плотины и определение характера распределения деформаций для проектирования расположения деформационных марок;
- Разработка методики геодезических наблюдений и выполнение ее адаптации для плотины «Дукан» в Ираке.

## **ГЛАВА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА ПРОВЕДЕНИЯ И СХЕМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С УЧЕТОМ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ УРОВНЕМ ВОДЫ ВОДОХРАНИЛИЩА И ВЕЛИЧИНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПЛОТИНЫ**

В первой главе представлена группа факторов, влияющих на поведение деформации плотин. Одним из наиболее важных факторов, влияющих на состояние плотин, является уровень воды в водохранилище плотины. Влияние повышения или понижения уровня воды на состояние плотины можно узнать по анализу фактических данных многолетних наблюдений. В этой главе проводится анализ взаимосвязи между уровнем воды водохранилища и деформациями плотины «Дукан» (Ирак). Это анализ позволит разработать порядок наблюдений за деформациями плотины в зависимости от уровня воды водохранилища. Будет также рассмотрено напряженно-деформированное состояние плотины, по которому можно определить характер распределения деформации в плотине. Эти данные позволяют проектировать деформационные марки на плотине соответственно с картиной распределения деформаций.

### **2.1 Анализ фактических данных о деформировании плотины «Дукан»**

Главное управление геодезии в Ираке проводит наблюдения за деформациями крупных плотин, таких как плотины «Дукан», «Мосул» и «Дарбандихан» [126,96]. При этом один, два раза в год измеряют уровень воды [131].

Плотина «Дукан» одна из самых важных и старейших в Ираке, расположена на севере Ирака. Площадь водосбора составляет 11,690 км<sup>2</sup> [121]. Была построена в 1959 году на реке Малый Заб. Назначение плотины – орошение ближайших территорий и выработка электроэнергии гидроэлектростанцией. Площадь поверхности водохранилища составляет 270 квадратных километров на уровне нормальной эксплуатации 511 м над уровнем моря. Минимальный уровень имеет отметку 469 м [103,126].

Задача исследования деформационного состояния плотины «Дукан» включает, как уже было отмечено, определение влияния уровня воды на нее [98]. В этой связи следует провести анализ фактических данных о деформировании плотины, предоставленных Министерством водных ресурсов Ирака, которые включают:

1. данные мониторинга горизонтальной деформации (смещения) за 2005-2017 гг. (таблица 2.2), которые получены с помощью тахеометрических измерений (деформационная сеть (представлена в первой главе и ниже), использовался тахеометр Topcon 7501, паспортная точность измерения расстояния  $2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm}$ , углов  $0,5 \text{ сек}$ ) и уравнены с помощью программы Adjustment (в 2018 году для мониторинга процесса строительства плотины использовалась система ГНСС);

2. ежегодные уровни воды в водохранилище плотины за тот же период (2005-2018 гг.) (таблица 2.3), для сравнения смещений, чтобы узнать влияние повышения и понижения уровня воды в водохранилище на поведение смещений;

3. топографические карты дна водохранилища плотины для последующего создания трехмерной модели с использованием системы ГИС, которая будет использоваться в процессе расчета объема воды водохранилища.

Для наблюдения за деформациями арочной плотины «Дукан» была создана деформационная сеть, расположенной на нижнем бьефе и состоящей из исходных пунктов, и деформационных марок, установленных на плотине (рисунок 2.1).

A, B, LR1, L1, LR2, L2, LR3, L3 исходные пункты. С пунктов A, B непосредственно проводились наблюдения за деформационными марками (1-12). В таблице 2.1 представлены координаты всех исходных пунктов и деформационных марок (нулевой цикл наблюдений).

Значения координат и смещений каждой деформационной марки определяются от нулевого наблюдения (пример год 2005 представлен в таблице 2.2, где представлены деформации по осям X и Y, DX и DY соответственно).





Рисунок 2.1– Общий вид плотины «Дукан».

Таблица 2.1 – Координаты пунктов деформационной сети

координаты нулевого наблюдения		
NR.	X(м)	Y(м)
L3	660624.6060	768260.1500
LR3	660468.4365	768167.3620
L2	660448.6181	768433.4242
LR2	660225.2639	768396.4778
L1	660377.7344	768552.0048
LR1	660239.1348	768619.3631
R1	660124.6110	768786.9292
A	660229.2005	768732.9625
B	660401.3950	768587.0651
1	660435.7749	768644.5923
2	660434.0580	768666.3294
3	660429.4687	768683.9927
4	660415.4056	768711.4851
5	660406.3978	768722.8604
6	660393.6984	768734.8770
7	660376.4406	768746.3930
8	660356.3863	768754.9342
9	660337.8464	768759.1450
10	660317.5876	768760.1687
11	660297.6690	768757.2505
12	660277.5341	768753.3760

Таблица 2.2 – Фактические данные о наблюдениях

DOKAN DAM PROJECT JULY-2005							
координаты нулевого наблюдения			координаты наблюдения		разница		смещение
№	X(м)	Y(м)	X(м)	Y(м)	DX(м)	DY(м)	DIS(м)
L3	660624.6060	768260.1500	660624.6060	768260.1500	0.0000	0.0000	0.0000
LR3	660468.4365	768167.3620	660468.4365	768167.3620	0.0000	0.0000	0.0000
L2	660448.6181	768433.4242	660448.6193	768433.4264	-0.0012	-0.0022	0.0025
LR2	660225.2639	768396.4778	660225.2622	768396.4776	0.0017	0.0002	0.0017
L1	660377.7344	768552.0048	660377.7364	768552.0069	-0.0020	-0.0021	0.0029
LR1	660239.1348	768619.3631	660239.1348	768619.3677	0.0000	-0.0046	0.0046
A	660229.2005	768732.9625	660229.2024	768732.9670	-0.0019	-0.0045	0.0049
B	660401.3950	768587.0651	660401.3970	768587.0681	-0.0020	-0.0030	0.0036
1	660435.7749	768644.5923	660435.7774	768644.5942	-0.0025	-0.0019	0.0031
2	660434.0580	768666.3294	660434.0613	768666.3357	-0.0033	-0.0063	0.0071
3	660429.4687	768683.9927	660429.4716	768683.9970	-0.0029	-0.0043	0.0052
4	660415.4056	768711.4851	660415.4074	768711.4914	-0.0018	-0.0063	0.0066
5	660406.3978	768722.8604	660406.4005	768722.8658	-0.0027	-0.0054	0.0060
6	660393.6984	768734.8770	660393.6997	768734.8799	-0.0013	-0.0029	0.0032
7	660376.4406	768746.3930	660376.4453	768746.3985	-0.0047	-0.0055	0.0072
8	660356.3863	768754.9342	660356.3887	768754.9419	-0.0024	-0.0077	0.0081
9	660337.8464	768759.1450	660337.8494	768759.1531	-0.0030	-0.0081	0.0086
10	660317.5876	768760.1687	660317.5916	768760.1762	-0.0040	-0.0075	0.0085
11	660297.6690	768757.2505	660297.6743	768757.2555	-0.0053	-0.0050	0.0073
12	660277.5341	768753.3760	660277.5391	768753.3818	-0.0050	-0.0058	0.0077

Таким образом, мониторинговые наблюдения на плотине Дукан выполнялись в два этапа:

1. наблюдения всех исходных пунктов, начиная с L3 и LR3 до точек А и В;
2. из точек А и В осуществляются наблюдения деформационных марок 1-12.

В таблице 2.3 показаны уровни воды в водохранилище «Дукан» за период 2005-2018 гг.

Таблица 2.3 – Зафиксированные уровни воды в водохранилище «Дукан»

год	максимальный уровень воды, м	минимальный уровень воды, м	средний уровень воды, м
2005	500.63	480.1	490.0533333
2009	488.32	478.26	482.96625
2010	496.29	479.72	488.0691667
2014	494.16	484.42	489.03
2017	503.36	497.03	499.8291667
2018	502.6	493.27	498.3845833

Для изучения взаимосвязи между уровнем воды в водохранилище плотины и смещением тела плотины по фактическим данным выбраны точки 6, 8 и 10. Точка 6 расположена в центре тела плотины, точка 10 – примерно в конце плотины, а точка 8 примерно находится между ними.

По результатам многолетних наблюдений построены графики смещений деформационных марок (рисунок 2.2). На графиках показаны уровни воды водохранилища по годам и значения деформаций на плотине (смещения при точках 6, 8 и 10). На рисунке 2.2 представлены три графика взаимосвязи между уровнем воды в водохранилище плотины (максимальный уровень воды, минимальный уровень воды и средний уровень воды) и смещением тела плотины при точке 6.

На рисунке 2.2а показаны фактические данные смещения точки 6. На рисунке 2.2б показаны скорректированные смещения точки 6. При этом выполнен учет смещений точки А. На рисунке 2.2в показаны фактические данные смещений точки 6 (без учета смещений точки В).

По графикам рисунка 2.2 видно, что деформации плотины согласуются с уровнем воды в водохранилище: чем выше уровень, тем больше деформация. Это количественно показывает, что при наблюдениях следует учитывать уровень воды. На графиках приведены смещения по осям. Видно (рисунок 2.2а), что по

оси X смещения наиболее соответствуют связи с уровнем воды. Надо сказать, что оси направлены равно от направления, нормального к плотине. В этих условиях по обеим осям полученных результатов должны были быть примерно одинаковые результаты. Автором выполнены проверочные сопоставления результатов выполненных измерений, которые заключались в оценке смещений деформационных марок без учета данных съемочных точек. Резонно предположить, что точки А и В могли тоже сместиться. Данные представленные на рисунках 2.2б и 2.2в, где приведены смещения без учета данных координат точек А и В подтвердили опасения на счет возможных смещений точек А и В.

Таким образом по фактическим данным неявно, но обнаружена связь деформаций плотины с уровнем воды в водохранилище. В то же время эту связь необходимо подтвердить теоретически, на основе модельных расчетов.

Кроме того, очевидно, что методику наблюдений следует скорректировать, так как принятая для плотины Дукан методика измерений не предусматривает ни проверки устойчивости съемочных пунктов, ни определения наиболее стабильного пункта, что в соответствии с нормами обязательно [25,27,58,140].

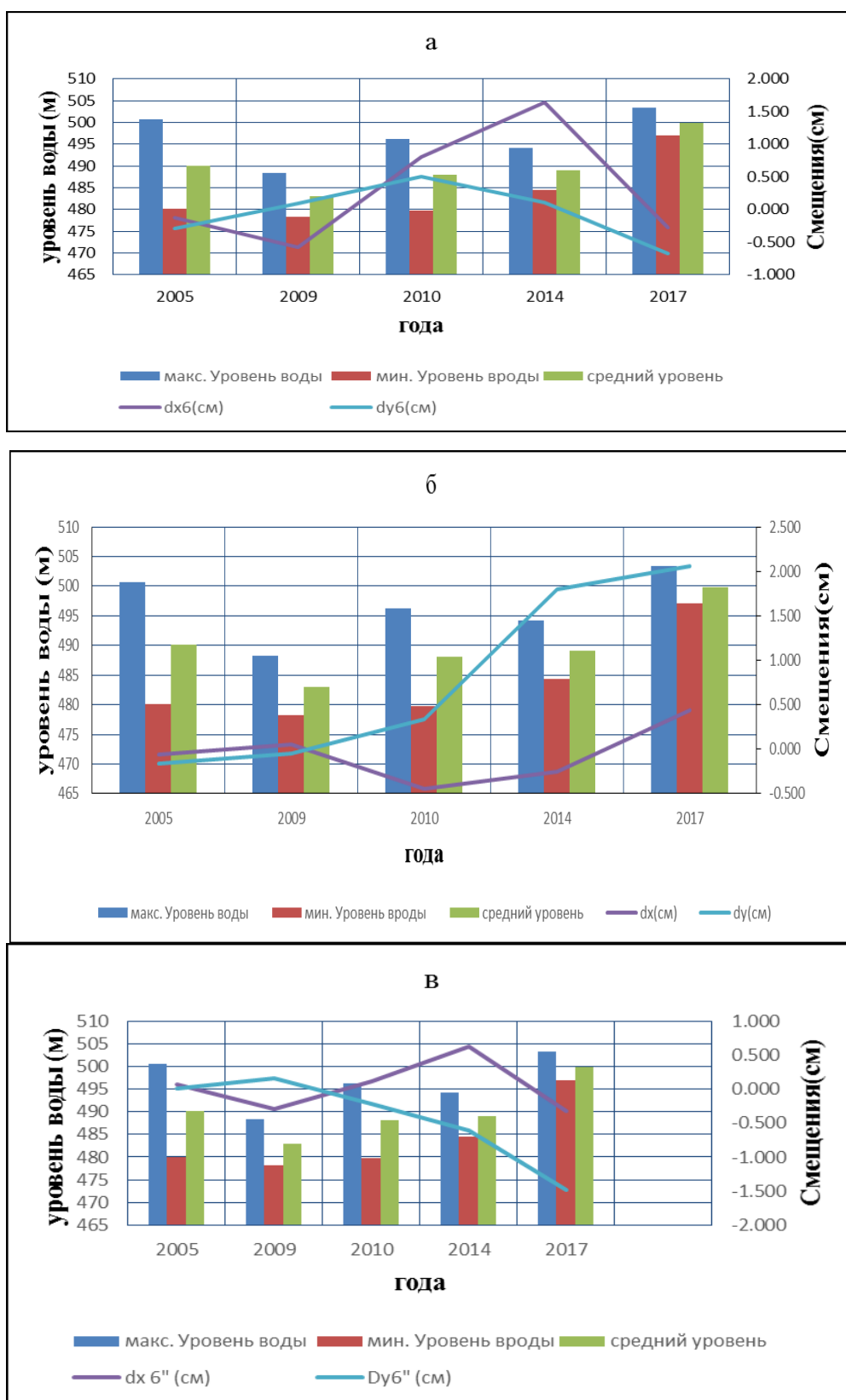


Рисунок 2.2 – Графики смещений по осям X и Y и уровни воды в водохранилище:

а – по деформационной марке б; б – смещения без учета данных точки А;  
в – смещения без учета данных точки В

## **2.2 Моделирование 3D модели водохранилища**

Для подтверждения связи уровня воды с величиной деформаций плотины или получения информации об этом необходимо выполнить моделирование деформированного состояния плотины. При этом необходимо рассмотреть систему «плотина-водохранилище». Соответственно надо построить модель и плотины и водохранилища. Для этого использована ГИС-технология. Построенная модель ляжет в основу построения геомеханической модели для оценки деформированного состояния плотины.

### ***2.2.1 Географическая информационная система***

Для создания трехмерной модели водохранилища плотины использована ГИС - технология [4, 5, 11, 90, 104, 113]. При этом требуются трехмерные топографические данные (X, Y, Z) [7,40,125], которые получают различными способами. Например, для картирования дна водоемов используют эхолоты или заранее подготовленные топографические карты в определенном масштабе [29]. В случае плотины «Дукан» использована карта масштаба 1:20000 с высотой сечения рельефа 5м. Обоснование использования указанного масштаба выполнено путем моделирования объемов водохранилища по виртуальным, смоделированным картам масштабов 1: 1000 – 100000 [116,102,132], как показано ниже. Высота сечения рельефа на топографических планах установлена в соответствии с масштабом [26].

### ***2.2.2 Шаги по созданию 3D цифровой модели с использованием ГИС технологии***

Шейп-файл точек высот является основой для создания растрового файла IDW (рисунок 2.3) с помощью ГИС.

Известно, что графическая точность карты отвечает 0,1 мм в рассматриваемом масштабе. Таким образом в масштабе 1:1000 графическая точность будет равна 10 см, а 1:100000 – 10 м. Соответственно каждому масштабу присуща точность по высоте, как правило равная 1/3 высоты сечения рельефа. Смоделировав рельеф местности (дна водохранилища) и приняв его за результат

съемки в масштабе 1:1000, оперируя вышеизложенными отношениями возможно построение виртуальных карт более мелкого масштаба.

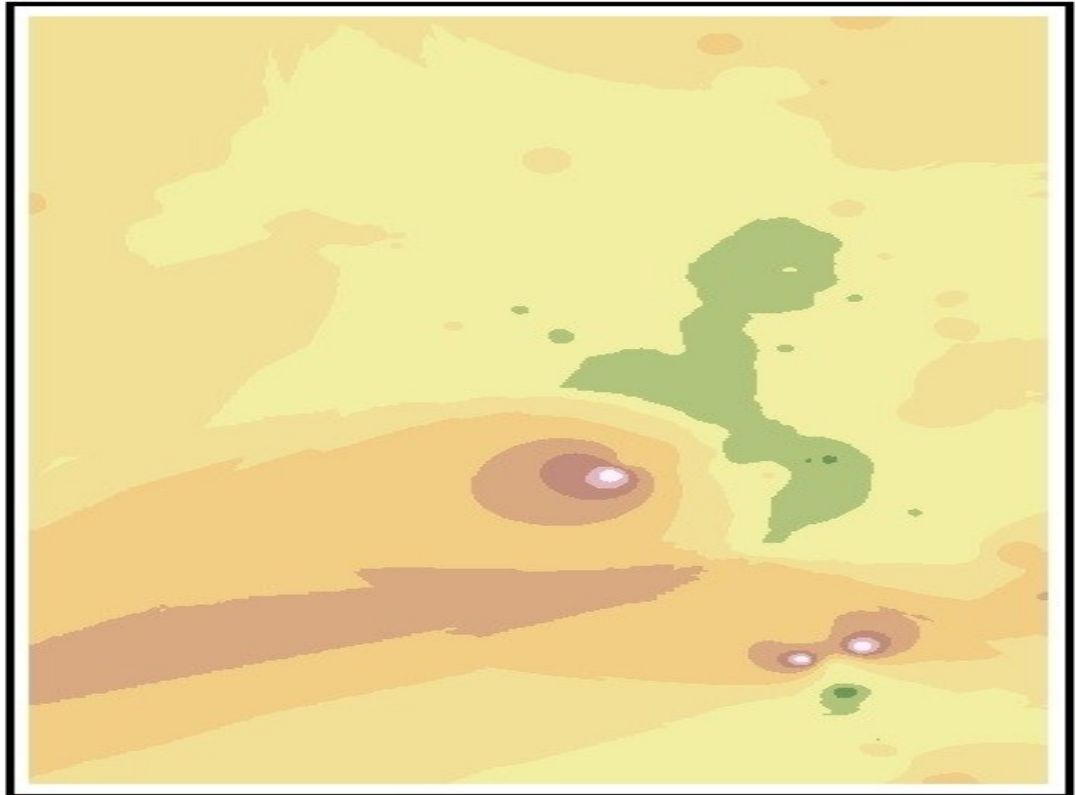


Рисунок 2.3 – Картина территории водохранилища Дукан  
(растровый файл IDW)

Созданы (смоделированы) топографические карты водохранилища «Дукан» в масштабе 1: 1000-1:100000 (рисунок 2.4) с целью обоснования использования масштаба 1: 20 000 с высотой сечения рельефа 5 м.

На основе топографической карты (векторный файл) с помощью ГИС могут быть созданы треугольные нерегулярные сети (TIN модели), по которым строится цифровая карта (рисунок 2.5) и ЦМР (рисунок 2.6б).

На основе цифровой модели, рассчитан объем водохранилища с использованием ГИС (для водохранилища «Дукан» составил 4,24 млрд. м<sup>3</sup>).

Шаги построения трехмерной модели и вычисление объема водохранилища можно кратко описать общей схемой (рисунок 2.7).



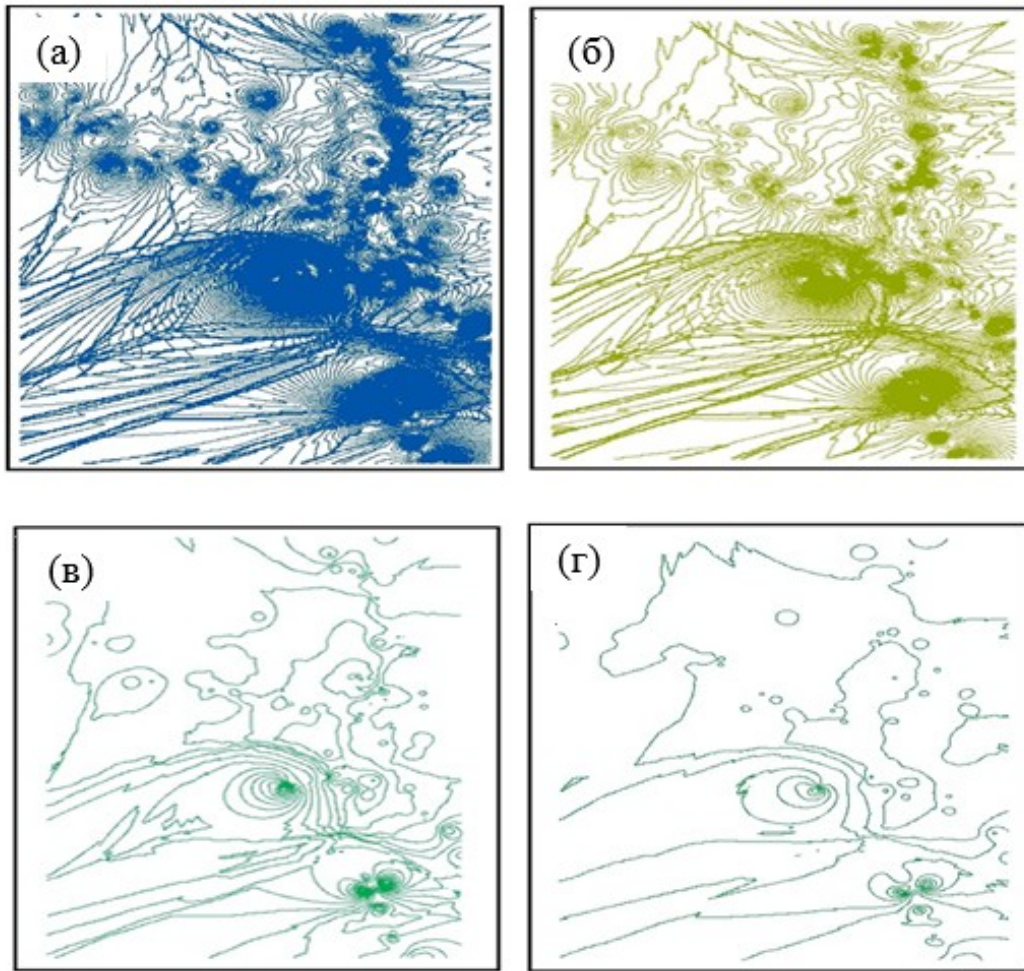


Рисунок 2.4 – Результаты моделирования карт разных масштабов: а - масштаб 1:1000; б – 1:2000; в – 1:10000; г – масштаб 1:20000.

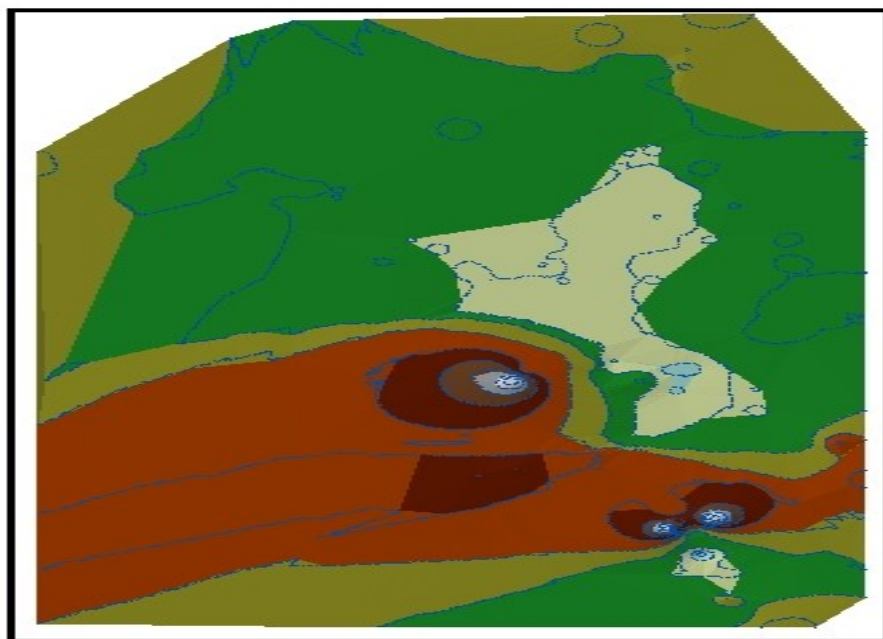


Рисунок 2.5 – Цифровая карта масштаба 1:20000



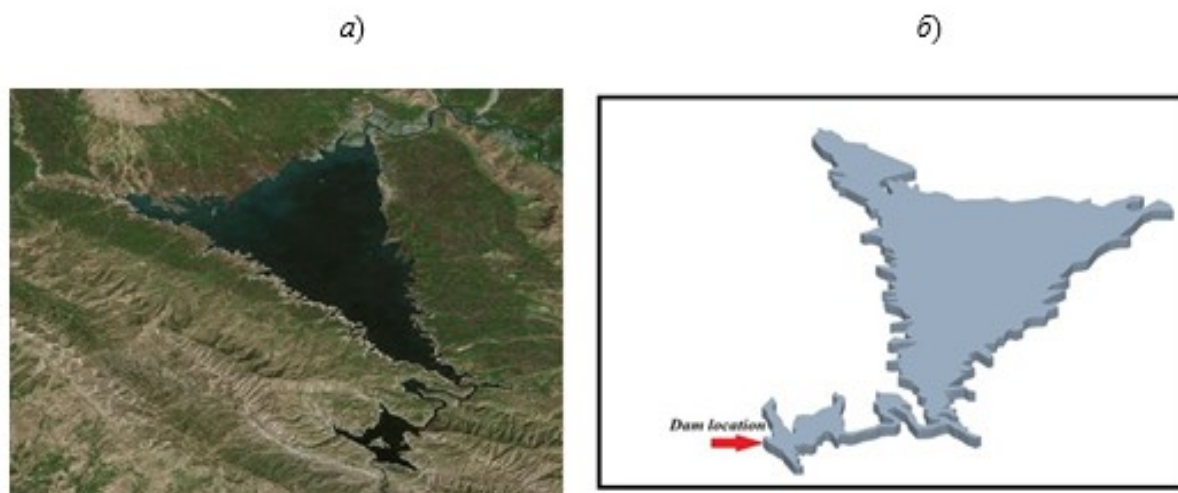


Рисунок 2.6 – Вид водохранилища Дуқан: а – космоснимок; б – 3D модель в масштабе 1:20000

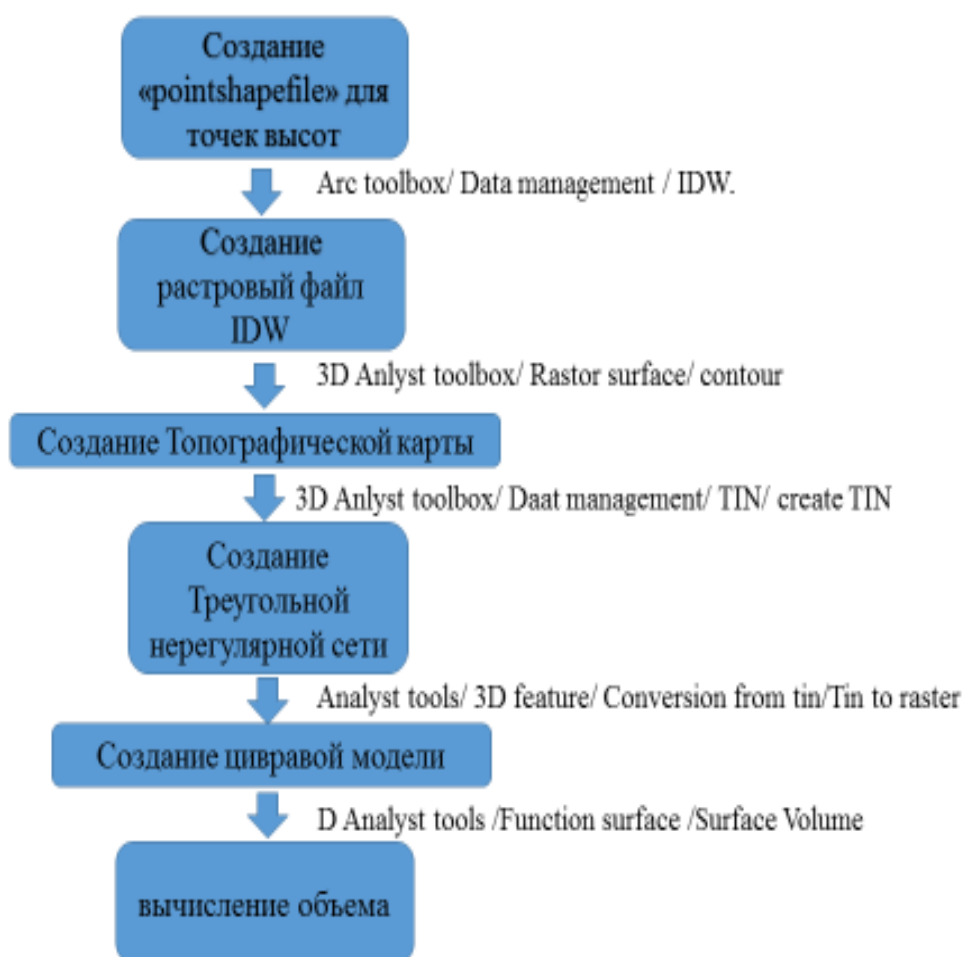


Рисунок 2.7 – Блок-схема построения трехмерной модели

С использованием ГИС (GIS10.4/ArcMap/3D Analyst tool) по каждой модели масштабов 1:1000 – 1:100000 почитали объем (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Объемы водохранилища для масштабов 1:1000–1:100000

Масштаб	Объем, м <sup>3</sup>
1000	4958045641
2000	4927030798
5000	4805672943
10000	4647490845
20000	4240526116
50000	2792446806
100000	1931058361

Графически соотношение объемов воды и разных масштабов отображает рисунок 2.8.

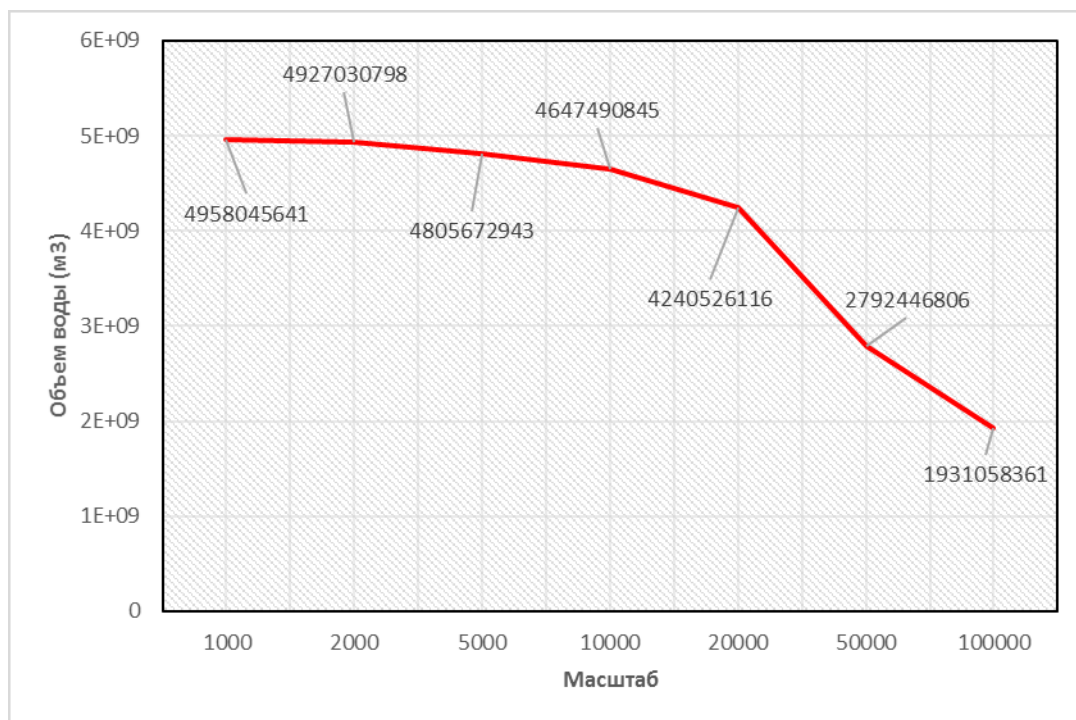


Рисунок 2.8 – График изменения объемов воды от масштаба карты

Известно, что давление воды в водоемах любой формы, распределяется равномерно во всех направлениях (гидростатический эффект). При этом давление определяется весом столба, равным глубине водоема. Относительно плотины «Дукан» при расчетном объеме в 4,96 млрд. м<sup>3</sup> и снижения точности измерений получен объем на 14 % меньше, который равен 4,24 млрд. м<sup>3</sup>. При площади зеркала воды в 192 км<sup>2</sup>, принятой с запасом, получаем, что и дно водоема имеет такую же площадь, тогда глубина водохранилища будет от 22 до 25 м. Если взять

давление на среднюю часть плотины, то разница в глубине составит около 1,5 м. С другой стороны, видно, что принятие для измерения объема масштаба мельче 1:20000 дает существенное уменьшение объема (рисунок 2.9). Таким образом, моделирование при использовании карт масштаба 1:20000, приемлемо для моделирования напряженно-деформированного состояния плотины.

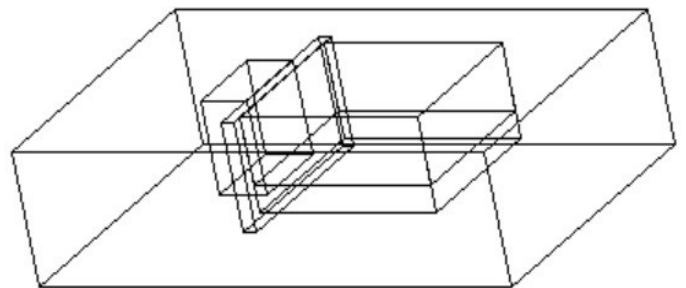
### 2.3 Моделирование напряженно-деформированного состояния плотины

Как было сказано выше цель моделирования определить влияние уровня воды в водохранилище на горизонтальные смещения тела плотины в численном виде.

Автором разработан программный комплекс «ПЛОТИНА» [78,80] (рисунок 2.9) (получено авторское свидетельство), реализующий метод конечных элементов (МКЭ) для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) плотины [9,51,57,121].



Санкт-Петербургский горный университет  
Кафедра инженерной геодезии



Программный комплекс "ПЛОТИНА" по расчету деформаций плотины

Мустафин М.Г., Аль Фатин Х. Д. 2020 г.

Рисунок 2.9 – Титульный лист ПК «Плотина»

Программа может быть использована в области геодезии при разработке геодезического мониторинга водоподпорных гидротехнических сооружений. В учебном процессе программа будет использована при ведении дисциплины «Прикладная геодезия» по специальности 21.05.01 «Прикладная геодезия».

Для подготовки данных по реализации ПК «ПЛОТИНА» использованы результаты моделирования в ГИС системы «водохранилище-плотина» в

трехмерном виде. На основе 3D модели плотины построена упрощенная ее модель в ПК «ПЛОТИНА» (рисунок 2.10).

Приняты следующие данные плотины и массива горных пород: модуль упругости плотины  $E_{пл} = 40$  ГПа, массива горных пород  $E_m = 10$  ГПа, объемный вес  $2,5 \text{ т/м}^3$ . Угол внутреннего трения принят для всех элементов равным  $0,3$ . Пространство за плотинной моделировалось как пустота (элементы были удалены). Размеры модели 800, 480, 200 м (длина, ширина, высота). На границах модели, кроме верхней, где допущены свободные перемещения, приняты условия их неподвижности. Конечно-элементная модель состояла из 400 тыс. тетраэдров. Моделировался разный уровень воды: 80, 90 и 100 м (отметка 490, 500 и 510 м).

В результате многовариантного моделирования получено распределение горизонтальных смещений (в направлении лево-право) в плотине (рисунок 2.10, б – случай отметки 500 м). Видно, что смещения увеличиваются от заделки плотины в массив к центру арки. Максимальные смещения составили  $0,87$  мм. При моделировании отметок 490 и 510 м смещения составили  $0,79$  и  $0,95$  мм соответственно. Эти результаты подтверждают зависимость смещений от уровня воды в водохранилище: чем больше уровень воды, тем выше смещения. Следует сказать, что качественно это связь не вызывает вопросов. В данном исследовании это показано численно, что дает право принимать практические решения.

Таким образом, на основе моделирования деформирования состояния плотины и фактических данных об уровне воды в водохранилище, возможно сделать уточнение порядка геодезических наблюдений за деформациями плотины с учетом уровня воды водохранилища.

Фактические данные об уровне воды в водохранилище (рисунок 2.2) позволяют выделить среднюю отметку ( $492,3$  м) над уровнем Персидского залива.

Порядок наблюдений в зависимости от опасности уровня воды [43] можно определить соразмерно среднеквадратическим отклонениям ( $\sigma$ ) [88] уровней воды.

Среднеквадратическое (стандартное) отклонение вычисляется по формуле (2.1):

$$\sigma = S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2.1)$$

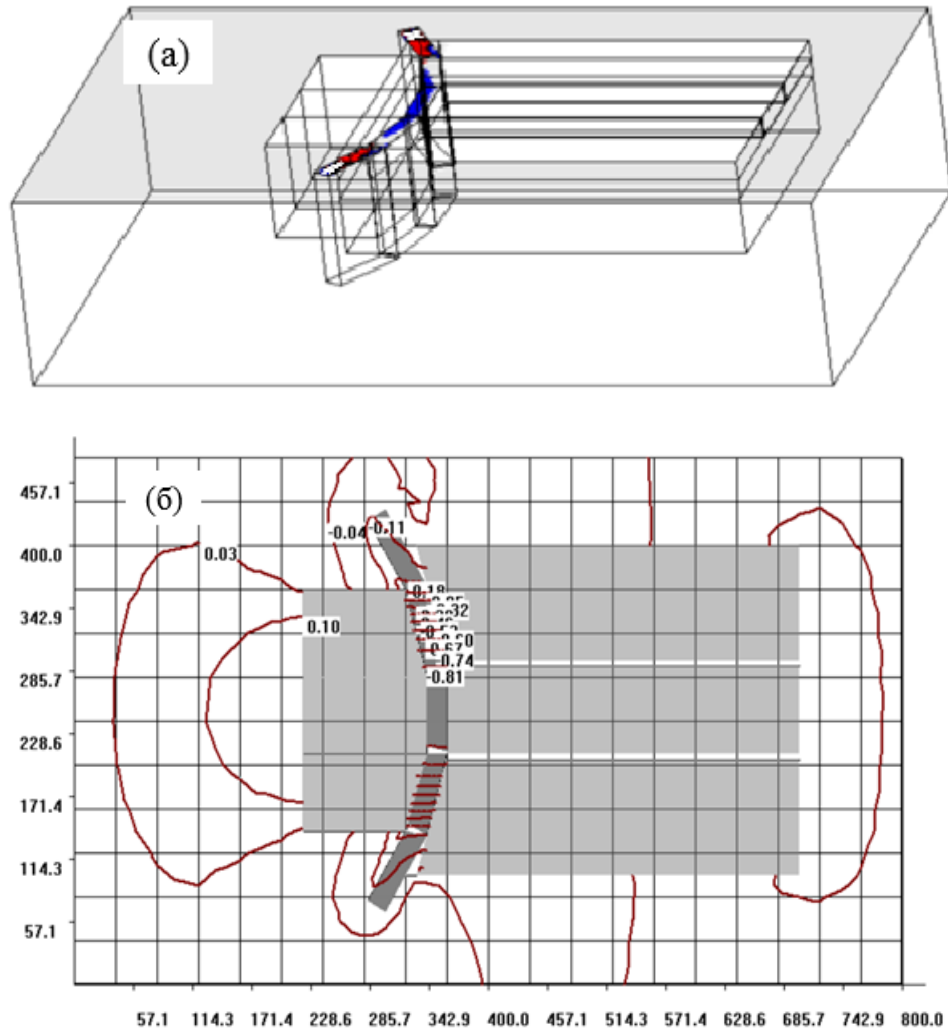


Рисунок 2.10 – Фрагменты ПК «ПЛОТИНА»: а – модель с визуализацией потенциальных зон разрушений (синий цвет – зона разрушений от растягивающих напряжений, красный от сжимающих; б – распределение горизонтальных смещений в направлении слева направо [78])

Ранжирование уровней опасности проводилось по фактическим данным мониторинга плотины «Дукан». Стандартное отклонение от среднего уровня (492,3 м) составило 8,5 м, что с коэффициентом надежности 2 определяло интервал среднего (предупредительный) уровня (484 - 500) м. Если уровень воды выше среднего, считается опасным, а если ниже - неопасным.

Для предупредительного интервала частота наблюдений должна соответствовать нормативным рекомендациям 2 раза в год, а при опасном

периоде необходимо проводить наблюдения с интервалом не менее 1 раза в квартал и порядок должен уточняться в зависимости от деформирования плотины и принимаемых мер защиты. Когда уровень воды в водохранилище ниже среднего следует выполнять так называемые профилактические наблюдения. Их важность состоит в определении деформаций, обусловленных изменением механических характеристик материала плотины (качество, человеческий фактор, усталость, длительная прочность и т.д.). В таблице 2.5 показан порядок интервалов проведения мониторинга по степени серьезности уровня воды в водохранилище плотины.

Таблица 2.5 – Порядок выполнения мониторинговых наблюдений

уровень воды	степень опасности уровня воды	частота наблюдений
>500 м	опасный	В зависимости от деформаций, не менее 1 раза в квартал
(484 -500) м	предупредительный	2 раза в год (нормативный)
<484 м	неопасный	1 раз в год

Моделирование НДС плотины способствовало решению задачи об установлении порядка геодезических наблюдений. Следует заметить, что этот вопрос применительно к мониторингу плотин, несмотря на его очевидную важность, в геодезической практике не учитывался. Здесь же укажем, что при строительстве зданий и сооружений порядок наблюдений учитывает стадии строительства, что говорит о правильности развития этого положения на эксплуатируемые объекты. Моделирование НДС плотины в настоящей работе используется и для решения другой важной задачи: определение характера распределения деформаций [5,12,54,57], который позволит эффективно проектировать деформационные марки в теле плотины.

#### 2.4 Совершенствование расположения деформационных марок

Как уже было указано геодезическая деформационная сеть плотины «Дукан» представлена 8 исходными пунктами (А, В, LR1, L1, LR2, L2, LR3, L3) и 12 деформационными марками, расположенными на верхней площадке плотины и распределенными на равных расстояниях (около 20 м).

Обычно в геодезической практике деформационные марки размещают

равномерно. Это не всегда целесообразно. Как было показано выше на картине возможных неупругих деформаций плотины – эти зоны концентрируются в средней части плотины. Не учет зон концентрации деформаций может свети на нет весьма точные измерения по маркам, расположенным не в зоне концентрации деформаций. В этой связи необходимо решение задачи об оптимизации расположения деформационных марок.

В дополнении равномерное распределение деформационных марок не всегда позволяет зафиксировать начало процесса деформирования. В ряде случаев это может оказаться критичным и привести к необратимым деформациям.

На основе представленной выше конечно-элементной модели в ПК «ПЛОТИНА» помимо моделирования уровней воды, было определено распределение деформаций в плотине. Схематично обозначены смещения, вызванные нормально действующими на плотину силами (распределение этих смещений показано на рисунке 2.11). Наименьшие значения наблюдаются у заделки (прибрежные зоны), а максимальные в средней части плотины.

Кроме того, смоделированы варианты модели с разной прочностью материала плотины. Это сделано для подтверждения и визуализации зон, где концентрируются деформации и возможны разрушения. Подбиралась прочность материала плотины, при которой от возникающих напряжений материал не выдерживает этих усилий и разрушается. На рисунке 2.10а красным цветом обозначены зоны разрушений от сжимающих усилий, они приурочены к заделке, синим цветом обозначены зоны возможных разрушений от растяжения материала. Эти исследования показали, что максимальные деформации в плотине концентрируются в срединных ее областях.

Результаты моделирования распределения смещения плотины сопоставлены с фактическими данными о деформациях. На рисунке 2.11б представлен график смещения по всем маркам за период с 2005 по 2010 гг. на графике можно увидеть, что в средней части плотины наблюдается максимум смещений.



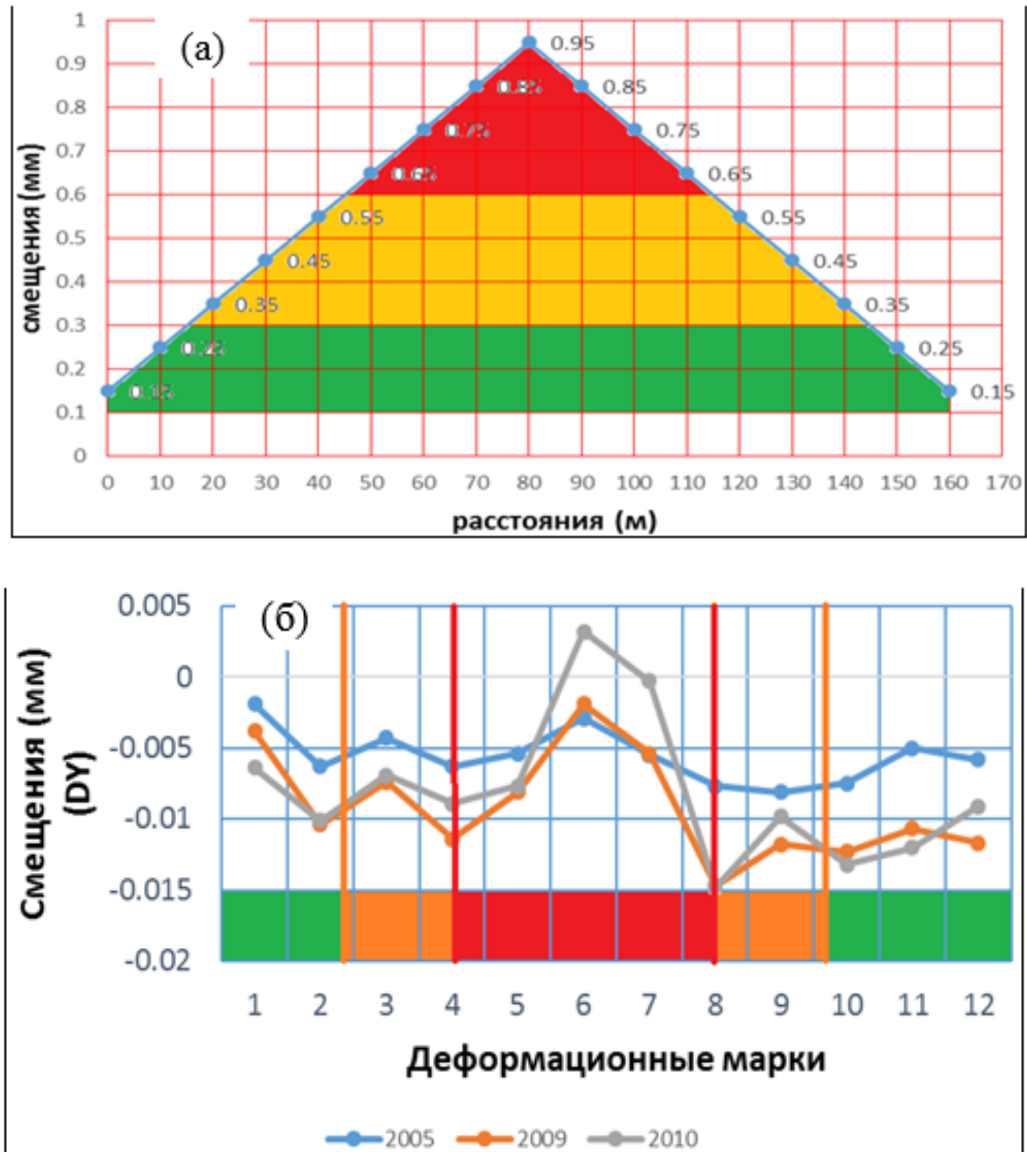


Рисунок 2.11 – Графики смещений

а – схема распределения смещения в плотине, б – фактические данные геодезических наблюдений по годам

Таким образом, модельные выкладки и фактические наблюдения позволяют проектировать деформационные марки в зависимости от ожидаемых величин смещений. На рисунке 2.12 выделены зоны с разными интервалами между деформационными марками. Так, в красной зоне следует принять интервал, меньший, чем в оранжевой, и тем более в зеленой зоне. При организации наблюдений за смещениями обычно принимают интервал, равный 20 м (как на плотине «Дукан», рисунок 2.1).

В красной зоне рекомендуется принять интервал равным 15 м, а у заделки



плотины (зеленая зона) 25 м. В оранжевой зоне интервал традиционный, равный 20 м.

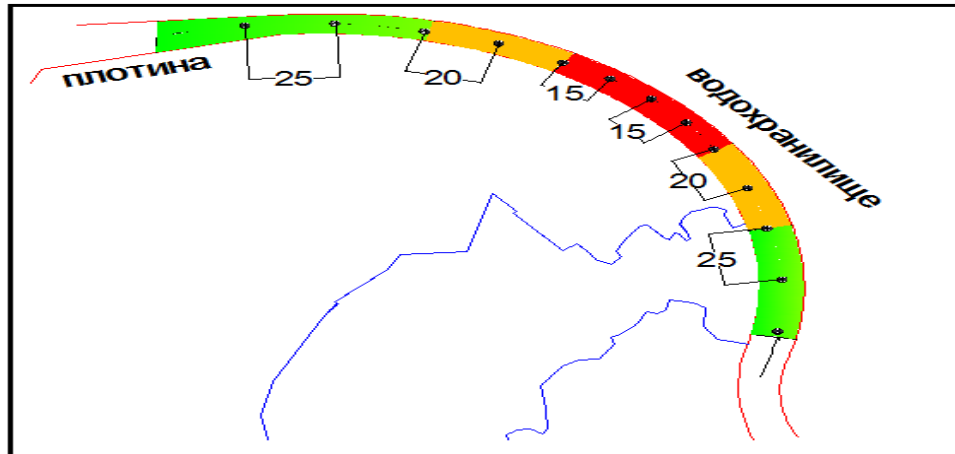


Рисунок 2.12 – Схема размещения деформационных марок на плотине с учетом расчета ее деформированного состояния (неравномерное распределение)

## 2.5 Выводы по второй главе

На основе исследований определена связь между уровнем воды в водохранилище и деформациями плотины, а также неравномерность распределения деформаций на теле плотины, что позволило более репрезентативно спроектировать деформационные марки. Основные выводы следующие:

1. Путем анализа фактических данных по мониторингу деформации плотины «Дукан», включавшего сравнение смещений деформационных марок с уровнями воды водохранилища за период с 2005-2017 гг. и моделирования процесса деформирования плотины, разработан порядок геодезических наблюдений с учетом уровня воды водохранилища. При этом выделены 3 уровня: опасный, предупредительный (средний) и неопасный. Средний интервал, при котором выполняется нормативный порядок измерений (один раз в полгода). Уровни воды выше среднего следует считать опасными, геодезический мониторинг проводится не менее одного раз в квартал, в зависимости от деформирования плотины. Если уровень воды ниже среднего интервала ситуация может считаться неопасной и геодезические наблюдения проводятся один раз в год.

2. С использованием ГИС-технологии построена модель системы «водохранилище-плотина» в трехмерном виде, произведен расчет объема воды, на основе которой выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния.

3. Разработана программа «ПЛОТИНА» (реализация метода конечных элементов) и проведено моделирование напряженно-деформированного состояния плотины. По результатам моделирования НДС выделяются зоны, где концентрируется смещение: наименьшие значения наблюдаются у заделки (прибрежных зонах), а максимальные в средней части плотины.

4. Моделирование НДС позволило проектировать сеть деформационных марок в теле плотины. В зоне наибольших смещений (красная зона) интервал между деформационными марками учащается, в оранжевой зоне (средней) интервал традиционный и в зеленой зоне, где степень смещения меньше – интервал больше среднего. Приняты следующие интервалы между деформационными марками: 15, 20 и 25 м.

5. По результатам настоящих исследований сформулированы два научных положения. Периодичность геодезических наблюдений за деформациями плотины следует связывать с уровнем воды водохранилища, который характеризует степень опасности напряженного состояния и выделять при этом три режима наблюдений по уровням верхнего бьефа: опасный (выше среднего), предупредительный (интервал средних уровней) и неопасный (от нижней отметки интервала среднего уровня); деформационные марки на поверхности плотины необходимо располагать соответственно прогнозным концентрациям деформаций, которые определяются на основе предварительного расчета смещений по разработанной программе, использующей алгоритм метода конечных элементов.

## **ГЛАВА 3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПЛОТИН**

Результаты исследований, представленных в предыдущей главе, позволяют схематизировать более совершенную методику геодезических наблюдений за деформациями плотин. Вместе с тем главным вопросом в геодезическом мониторинге являются собственно геодезические наблюдения.

В этой главе рассматривается вопрос оптимизации деформационной сети на основе моделирования различных ее конфигураций и оценки при этом точности координат пунктов [68,69].

Согласно стандартам [140], должна быть оценена устойчивость исходных пунктов. В этой связи в работе рассматривается модификации известного способа Костехеля применительно к горизонтальным деформациям.

### **3.1 Описание основных пунктов традиционной методики с включением разработанных модулей**

На основе проведенных исследований схема геодезического мониторинга плотин выглядит следующим образом (рисунок 3.1).

На рисунке 3.1 показаны:

- Построение деформационной сети, связанное с проектированием и предрасчетом точности положения пунктов. Эта процедура закреплена в нормативных документах [21,140].
- Оптимизация порядка геодезических наблюдений и заложения деформационных марок на основе моделирования деформированного состояния плотины.
- Чрезвычайно важным вопросом является анализ устойчивости (стабильности) исходных пунктов. Не соблюдение условия отсчитывания смещений от наиболее стабильного исходного пункта, приводит к неправильной интерпретации результатов измерений и в целом к упущению момента опасности.



Рисунок 3.1 – Блок-схема геодзического мониторинга плотин (зеленым цветом выделены блоки, в которых присутствует новизна исследований, синим – традиционный порядок наблюдений)

Основные пункты традиционной методики изложены в ряде работ [46,64,65,81,140].

Точность наблюдения за деформацией плотины зависит от многих параметров: приборной точности (СКП), количества исходных точек, расстояний между исходными точками и деформационными марками, угла между линией наблюдения и линией деформационных марок [5,48,57,72,73,76-79].

В нашем случае, выполнено моделирование по методу МНК [3,8,17,18,30,52,53,76,85,136] для сопоставления существующей сети и разных схем для возможности выбора наиболее оптимальной по точности и ландшафтным условиям.

Детальный алгоритм уравнивания измерений и оценки точности описан в ряде источников [19, 57]. Отличительной особенностью настоящих исследований является применение конфигурационной матрицы - это модифицированная матрица коэффициентов параметрических уравнений  $A$  [24,42, 57,84]. Для случая уравнивания измерений в обобщенном виде (когда требуется только оценка

погрешностей измерений): ячейки, отвечающие направлениям измерений, принимают значения 1 или -1 (-1, когда рассматривается обратное направление, методика подобна оценке точности высотных сетей).

Выполнено моделирование точности определения координат деформационных марок по линейным измерениям с одной до четырех станций измерений на 5 целей (деформационных марок). При оценке точности виртуальных измерений использовалось фундаментальное соотношение между координатами точек (пунктов сети) и длинами линий.

Схема деформационной сети была построена в AutoCAD (рисунок 3.2). Вектор измеренных расстояний моделировался с использованием паспортной точности тахеометра (СКП) для измерения расстояний. Точки А-Л (рисунок 3.2) при моделировании располагались на разных расстояниях от деформационных марок (100, 300 и 500 м) и ориентировались под углами 90°, 45°, и 0° градусов относительно средней линии расположения деформационных марок (1-5) (рисунок 3.2). Понятно, что когда измерения выполнены с одного пункта, то они будут соответствовать паспортной точности измерений. С увеличением избыточных равноточных измерений [132], когда они выполнены с двух и более пунктов, при их уравнивании по МНК, точность определения координат точек повышается [2,20,32,33,38,39,45,66]. Моделирование точности определения координат деформационных марок по рассмотренным схемам выполнялось с учетом разных СКП приборов. Использовались тахеометры с точностью измерения расстояний от 1мм + 1 ppm до 5мм + 3 ppm.

Ниже приведен пример решения по МНК, когда количество исходных точек равно 3, а расстояние наблюдения до целей (марок) составляет 100 м, как показано на рисунке 3.2 (в). При этом СКП (приборная точность) измерений принята равной 1mm+ 1+ppm.

Координаты исходных (съёмочных) точек:

$$\begin{array}{ll} X_A = 659946.9822 & Y_A = 768710.2544 \\ X_B = 660010.6826 & Y_B = 768674.9026 \\ X_C = 660060.4835 & Y_C = 768647.344 \end{array}$$

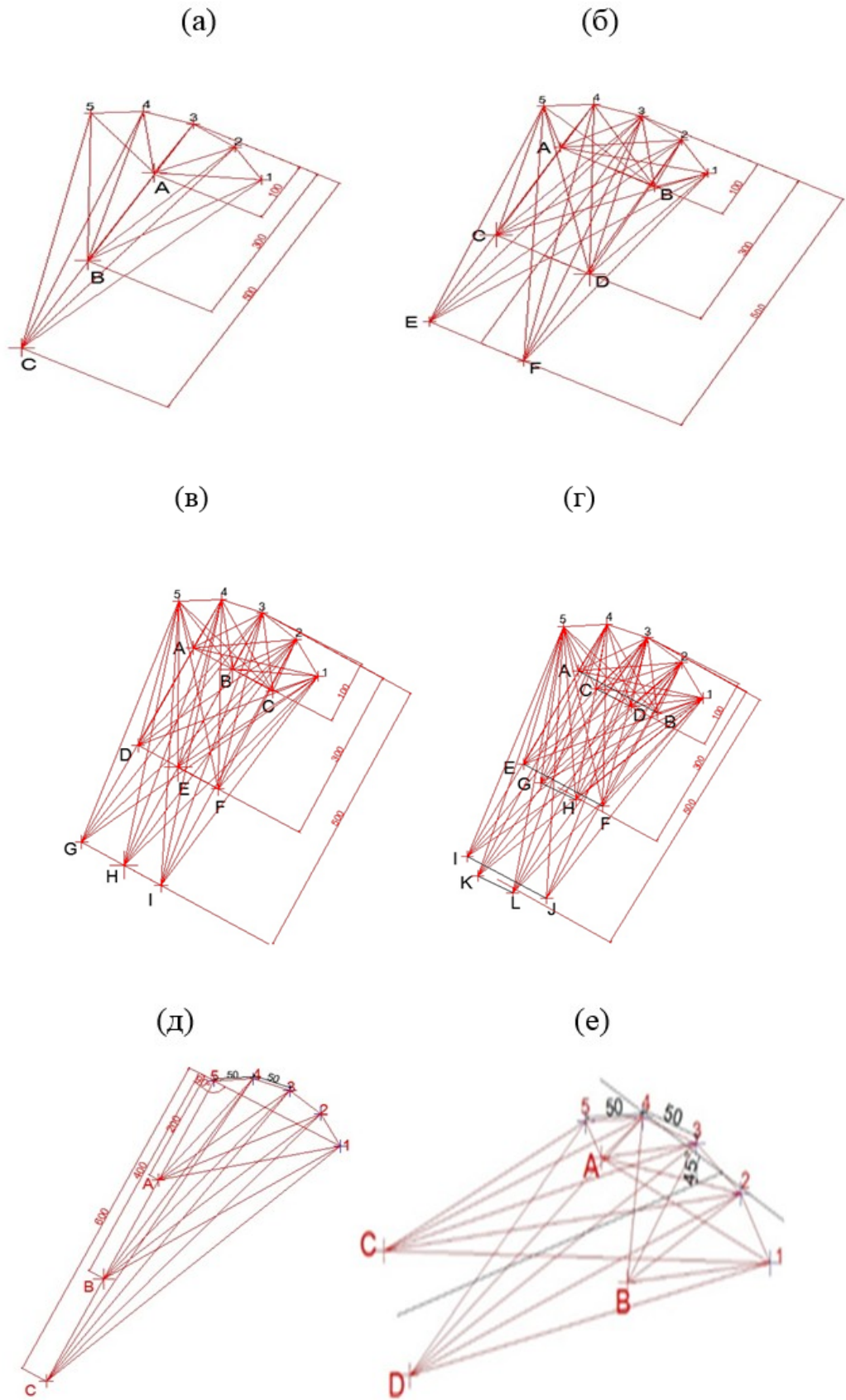


Рисунок 3.2 – Схемы тестовых конфигураций геодезических сетей: а, б, в, г – вариации расстояний до деформационных марок и количества съёмочных точек, д,е – вариации углов измерений

$$S_{name} = \begin{pmatrix} A-1 \\ A-2 \\ A-3 \\ A-4 \\ A-5 \\ B-1 \\ B-2 \\ B-3 \\ B-4 \\ B-5 \\ C-1 \\ C-2 \\ C-3 \\ C-4 \\ C-5 \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 172.0182 \\ 147.9076 \\ 120.4928 \\ 93.2905 \\ 70.6022 \\ 108.9832 \\ 102.2502 \\ 101.44 \\ 107.8531 \\ 118.7875 \\ 73.59 \\ 94.3663 \\ 119.8276 \\ 145.9254 \\ 169.1665 \end{pmatrix},$$

где  $S$  – матрица расстояний, которые виртуально измерялись со съемочных точек А, В, С и сформированы по условию (3.1) с учетом СКП тахеометра в Автокаде.

$$M_{nac} = 1 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot S^T \cdot 10^3 \quad (3.1)$$

$$M_{nac} = (1.172 \ 1.148 \ 1.12 \ 1.093 \ 1.071 \ 1.109 \ 1.102 \ 1.101 \ 1.108 \ 1.119 \ 1.074 \ 1.094 \ 1.12 \ 1.146 \ 1.169)$$

Строим конфигурационную матрицу  $A2$  - матрица параметрических коэффициентов. Коэффициенты имеют значения 0, 1 или -1 в зависимости от направлений измеряемых векторов.

$$A2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$m_{изм} = m_{нас}$$

Вычисляем паспортную точность измерения векторов (расстояний). У каждого будут свои значения в зависимости от используемого прибора.

Ошибка единицы веса принята  $\mu_0 = m_{изм}$  на 1 км. Точность измерений (СКП)  $d=1$  mm (по условию 3.2).

$$M_{1нас} = 1 + 1.d \quad (3.2)$$

Тогда матрицу весовых коэффициентов  $P$  находим из выражения (3.3):

$$P_{i,j} = \frac{\mu^2_0}{M_{изм}^2} \quad (3.3)$$

$$P = \begin{pmatrix} 2,912 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,036 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,046 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,926 \end{pmatrix}$$

Матрица обратных весовых коэффициентов  $Q$  (3.4):

$$Q = (A2^T . P . A2)^{-1} \quad (3.4)$$

$$Q = \begin{pmatrix} 0,104 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,103 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,103 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,104 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,104 \end{pmatrix}$$

Точность положения каждой деформационной марки СКПпункеры (3.5) (таблица 3.1):

$$СКПпункеры = \mu_0 2.(Q_{i,j}) / 2 \quad (3.5)$$

Таблица 3.1 – СКП положения точек

Точка	Точность
1	0.644
2	0.643
3	0.643
4	0.644
5	0.645



На рисунке 3.3 показаны результаты моделирования по схемам, приведенным на рисунке 3.2. Все выкладки представлены в приложении Б. На оси ординат приведены СКП определения координат деформационных марок. На рисунке 3.3а на оси абсцисс размещены расстояния от тахеометрических станций (А, В, С – рисунок 3.2) до фронта деформационных марок (100 м, 300 м и 500 м). Представленные зависимости позволяют ориентироваться в вопросе выбора средств измерений и расположения съемочных станций для обеспечения точности определения координат деформационных марок и в конечном счете деформаций плотины. В следующей главе применительно к плотине Дукан будет рассмотрена адаптация настоящих исследований.

В ходе анализа фактических данных (таблица 2.2) мониторинга деформации плотины «Дукан» было показано (подробнее 2 глава), что есть смещение в исходных точках (LR3 – В) по осям X и Y. Безусловно, это влияет на точность результатов мониторинга деформации плотины «Дукан».

В этой связи необходимо оценивать устойчивость исходных пунктов и выбрать наиболее стабильные для выбора в качестве опорных [15].

В работе выполнена модификация известного способа Костехеля [25,58], заключающаяся в его обобщении на горизонтальные смещения и вовлечении в расчетную схему исходных пунктов.

Использовали схему сети исходных точек (рисунок 3.4), которая предоставлена точками (LR3-L2). Предлагается выполнять линейно-угловые измерения с каждого из пунктов (LR3, L3, LR2, L2) с наведением на все соседние указанные пункты. Координаты всех точек сети известны по результатам наблюдений нулевого цикла. При повторных измерениях расстояние каждого звена между двумя точками имеют значения (D) и второй раз на основе повторных измерений (D').

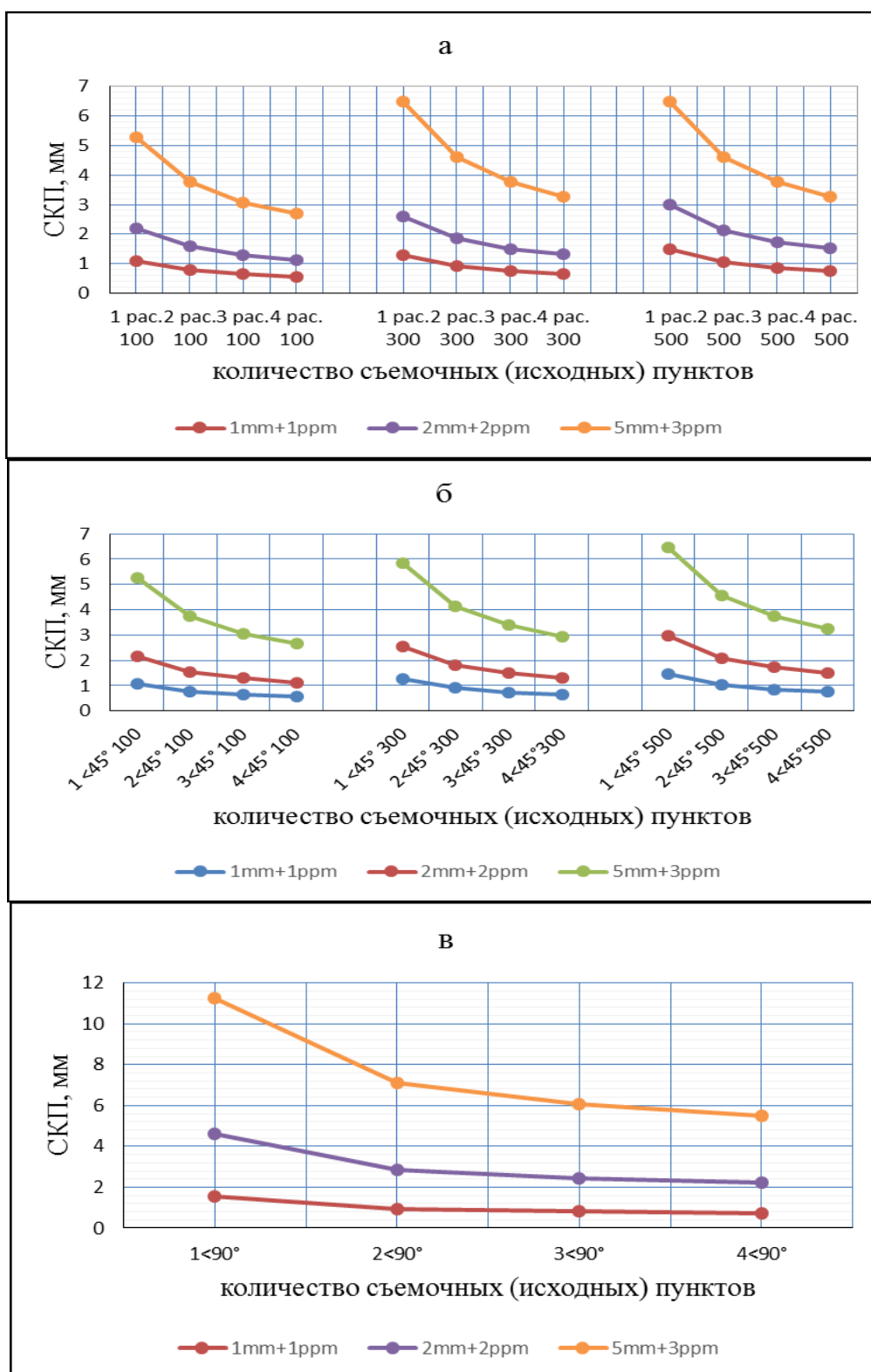


Рисунок 3.3 – Графики изменения точности положения деформационных марок от расстояний съемки и количества станций наблюдений (1,2,3 и 4):  
 а – угол наблюдения  $0^\circ$ ; б – угол наблюдения  $45^\circ$ ; в – угол наблюдения  $90^\circ$

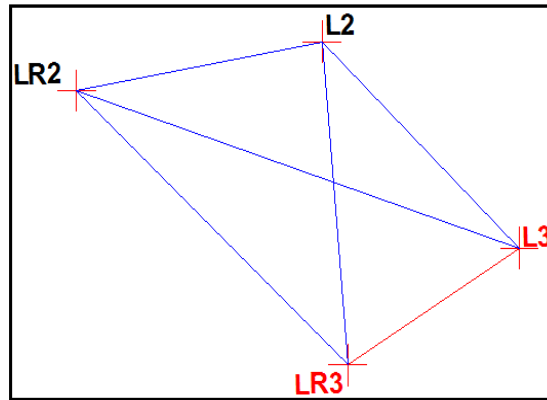


Рисунок 3.4 – Схема части сети исходных точек плотины «Дукан»

После повторных измерений (следующий цикл) вычисляют разницу между рассчитанными длинами ( $V$ ) (3.7):

$$V = D' - D \quad (3.7)$$

В таблице 3.2 представлен результат оценки устойчивости рассматриваемых точек части деформационной сети плотины «Дукан».

Таблица 3.2 – Результаты оценки устойчивости выбранных точек сетевой части плотины Дукан

Звенья	D'	D (2005 Г)	V	VV	$\sum[VV]$	Прим
L3	-	-	-	-	-	-
D(L3-LR3)	181.6549633	181.656	0.001036747	1.07485E-06	-	-
D(L3-L2)	246.9730539	246.971	-0.002053858	4.21833E-06	-	-
D(L3-LR2)	421.9708306	421.969	-0.001830609	3.35113E-06	8.64431E-06	min
LR3	-	-	-	-	-	-
D(LR3-L3)	181.6549633	181.652	-0.002963253	8.78087E-06	-	-
D(LR3-L2)	266.7992939	266.801	0.001706059	2.91064E-06	-	-
D(LR3-LR2)	334.1062154	334.108	0.001784553	3.18463E-06	1.48761E-05	min
L2	-	-	-	-	-	-
D(L2-L3)	246.9730539	246.976	0.002946142	8.67975E-06	-	-
D(L2-LR3)	266.7992939	266.803	0.003706059	1.37349E-05	-	-
D(L2-LR2)	226.3893441	226.393	0.003655881	1.33655E-05	3.57801E-05	-
LR2	-	-	-	-	-	-
D(LR2-L3)	421.9708306	421.972	0.002	2.38462E-06	-	-
D(LR2-LR3)	334.1062154	334.109	0.003	7.75373E-06	-	-
D(LR2-L2)	226.3893441	226.394	0.005	2.16772E-05	3.18156E-05	-

Точки L3 и LR3 имеют минимум  $\sum VV$ , что означает, что они являются наиболее стабильными пунктами в сети и от них следует производить расчеты смещений деформационных марок.

На рисунке 3.4 Линия L3-LR3 (красном цветом) считается наиболее

стабильной. При выполнении линейно угловых измерений от этой базовой линии следует вести расчет координат деформационных марок сети.

### 3.2 Выводы по третьей главе

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Текущая сеть мониторинга деформации плотины «Дукан» в Ираке была спроектирована в соответствии с американскими стандартами, принятыми в Ираке. По ее конфигурации особых возражений не возникает. Однако есть вопрос по интерпретации результатов измерений. Вследствие отсутствия проверки на устойчивость исходных пунктов оценка деформаций плотины, которая проводилась на основе уравнивания сети исходных пунктов и наблюдений за деформационными марками со станций А и В (рисунок 2.1), в каждом цикле накапливалась ошибка, из-за подвижности и пунктов А и В, и в меньшей степени других исходных пунктов. Для решения этих вопросов в настоящей главе подготовлен математический аппарат, включающий оценку стабильности исходных пунктов. По результатам оценки стабильности части сети наблюдения «Дукан» (рисунок 3.4), L3, LR3 самые стабильные исходные точки, которые рекомендуется использовать в качестве опорных.

2. Выбрана и протестирована методика моделирования точности определения координат деформационных марок по рассмотренным схемам с учетом разных СКП приборов. Использовались тахеометры с точностью измерения расстояний от  $1\text{ мм} + 1\text{ ppm}$  до  $5\text{ мм} + 3\text{ ppm}$ . При этом рассматривались различные варианты расположения исходных пунктов относительно деформационных марок. В результате можно рекомендовать к использованию тахеометр, точностью измерения расстояний в 2 мм (для достижения миллиметровой ( $< 2\text{ мм}$ ) точности оценки положения марок). При невозможности параллельного расположения тахеометрических станций (относительно деформационных марок) следует использовать тахеометр с точностью измерения расстояний 1 мм. Исходных пунктов при этом должно быть более двух.

## **ГЛАВА 4 ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ПЛОТИНЕ «ДУКАН»**

Объектом проверки разработанной методики была выбрана плотина «Дукан» как одна из наиболее важных в Ираке, от которой зависит благосостояние целого региона. Плотина «Дукан» - одна из крупнейших плотин и самая старая бетонная плотина, построенная в Ираке. Согласно распоряжению Министерства водных ресурсов мониторинг этой плотины проводится один раз в год.

### **4.1 Принципы организации мониторинга плотины «Дукан»**

Организация геодезического мониторинга выполняется в соответствии с разработанной схемой (рис. 3.1, глава 3).

Во второй главе данной работы была проанализирована взаимосвязь между уровнем воды в водохранилище и величинами горизонтального смещения плотины. В результате анализа обнаружено влияние повышения уровня воды в водохранилищах на горизонтальные смещения и численно доказано, что чем выше подъем уровня воды, тем больше деформация. Для этого с помощью системы ГИС была создана трехмерная цифровая модель водохранилища плотины «Дукан» на основе карт масштаба 1:20000 (глава 2, рисунок 2.6), которая является основой для реализации моделирования деформационного состояния плотины с помощью программного комплекса (плотины), разработанного автором. Расчетный объем водохранилища плотины «Дукан», с использованием 3D-модели созданной, с помощью ГИС, составил 4,24 миллиарда кубометров.

Далее с использованием разработанного автором программного комплекса «ПЛОТИНА» выполнено моделирование деформированного состояния плотины «Дукан». Установлено, что смещения увеличиваются от заделки плотины в массив к центру арки, при этом уровни и максимальные смещения составили 0,87 мм (глава 2, рисунок 2.10). График (рисунок 4.1) показывает увеличение смещения в зависимости от уровней воды водохранилища «Дукан».

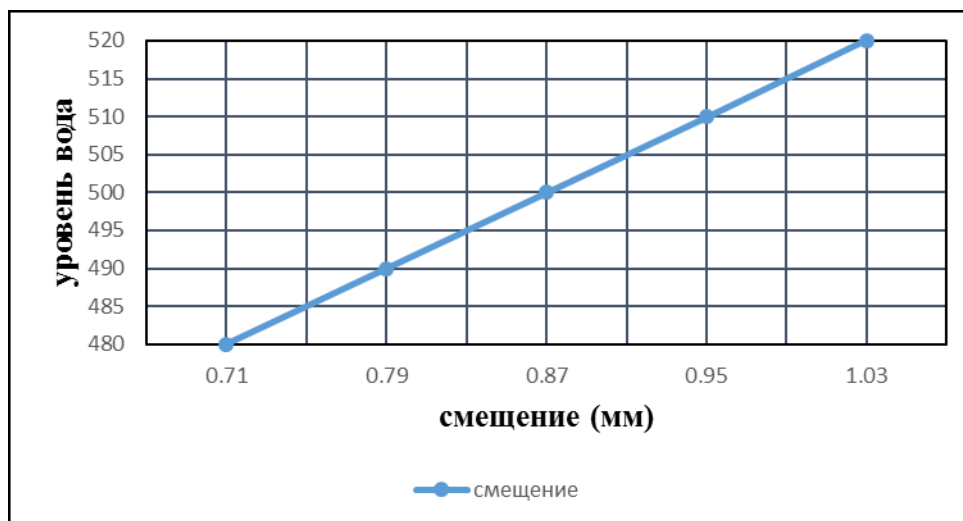


Рисунок 4.1 – График смещений срединной части плотины в зависимости от уровня воды водохранилища

Таким образом, модельные выкладки и фактические наблюдения позволяют распределить деформационные марки в зависимости от ожидаемых величин смещений плотины «Дукан». На рисунке 4.2 (б) выделены зоны, в которых интервал между деформационными марками отличается. Так, в красной зоне следует принять интервал, меньший, чем в оранжевой, и тем более зеленой зоне. Заметим, что при наблюдениях за смещениями на плотине Дукан принят интервал, равный 20 м (рисунок 4.2, а).

Рекомендуется принять интервал в красной зоне равным 15 м, а у заделки плотины (зеленая зона) 25 м. В оранжевой зоне интервал традиционный, равный 20 м. В соответствии с приведенными выкладками на рисунке 4.2 (б) приведено распределение деформационных марок на плотине «Дукан».

Применительно к плотине Дукан скорректирован порядок наблюдений в зависимости от степени опасности уровня воды водохранилища.

Выделены три уровня воды в водохранилище: неопасный, предупредительный и опасный. Ранжирование уровней выполнено с использованием фактических данных, определен средний (предупредительный) уровневый интервал равный 484 -500 м (Глава 2, таблица 2.5).

Уровни воды выше среднего следует считать опасными и геодезический мониторинг надо проводить еженедельно или даже ежедневно в зависимости от

деформирования плотины. Если уровень воды ниже среднего интервала ситуация может считаться неопасной и геодезические наблюдения проводятся один раз в год.

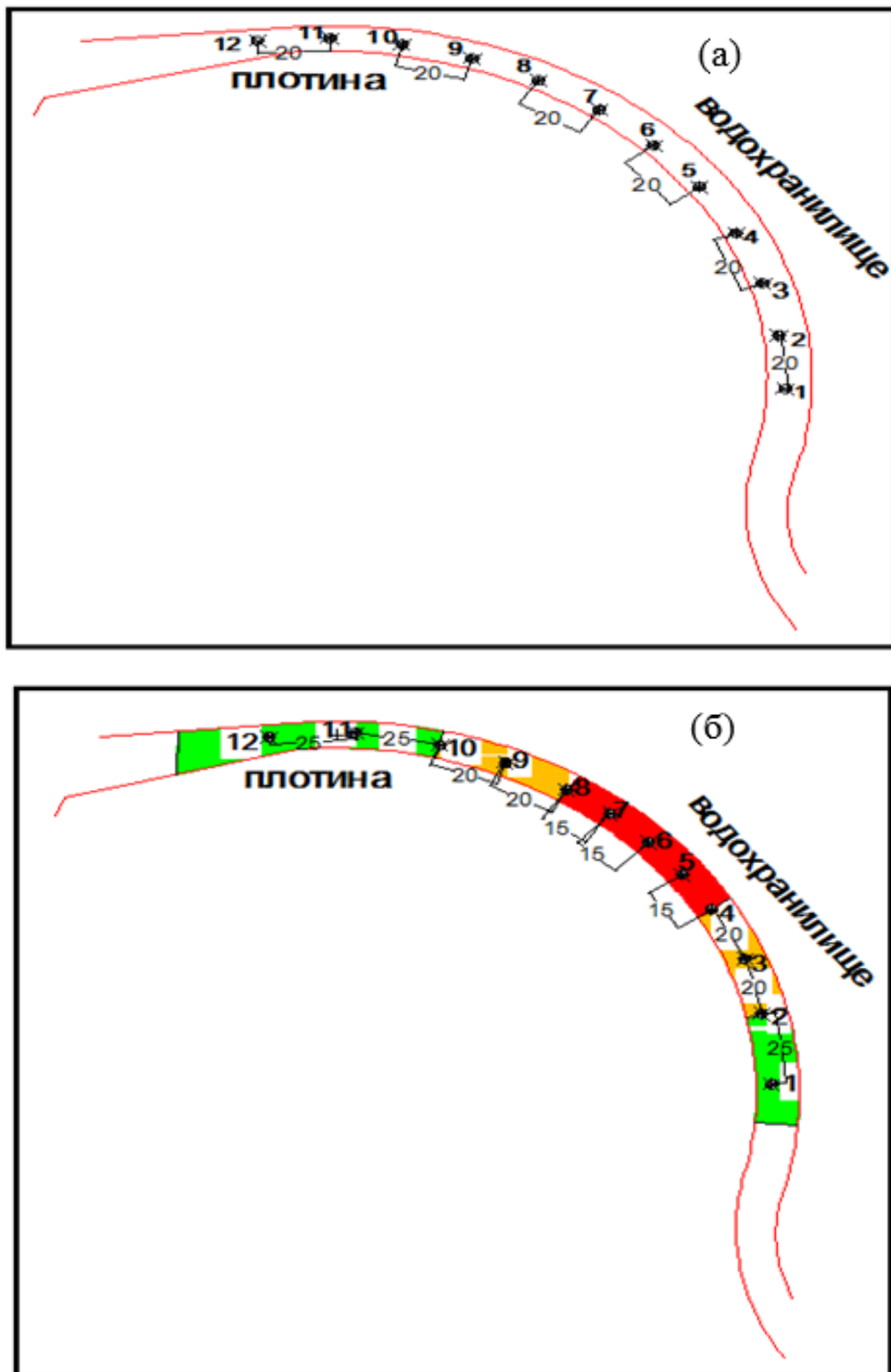


Рисунок 4.2 – Схемы расположения деформационных марок на плотине «Дукан»:  
 а - текущая сеть деформационных марок на плотине; б-рекомендуемое  
 неравномерное расположение деформационных марок в теле плотины

## 4.2 Корректирование методики оценки смещений деформационных марок при геодезическом мониторинге плотины «Дукан»

Как было замечено в главе 3 деформационная сеть при мониторинге деформаций плотины «Дукан», представлена 8 исходными пунктами, включая пункты А и В, которые являются тахеометрическими станциями, и 12 деформационными марками. При этом деформационные марки рекомендуется распределить неравномерно в соответствии с концентрациями деформаций плотины (рисунок 4.2, б).

Также было установлено, что съемочные станции А, В не стабильны. На рисунок 4.3 приведен график взаимосвязи между смещениями деформационных марок и уровнем воды водохранилища. На графике показаны уровни воды водохранилища по годам и значения измеренных деформаций (скорректированные смещения средней части плотины без учета данных съемочной точки А). Результаты оценки величин смещений деформационных марок должны быть проверены на основе выявления стабильности исходных пунктов и выполнен пересчет координат и смещений.

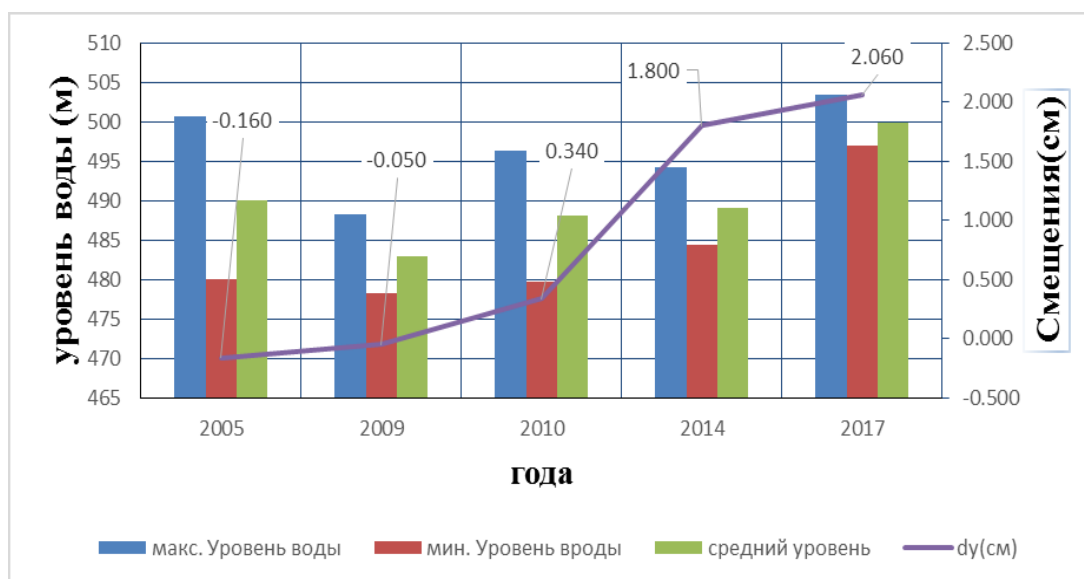


Рисунок 4.3 – Графики деформаций (смещений) и уровня воды по годам плотины «Дукан» (Ирак)

В третьей главе выполнено моделирование точности определения координат деформационных марок по линейным измерениям от станций измерений на 5 целей (марок).



При моделировании учитывались факторы, влияющие на точность оценки положений деформационных марок при мониторинге (приборная точность, количество исходных точек, из которых наблюдаются деформационные марки на плотине, расстояние между исходными точками и деформационными марками, угол между линией наблюдения и линией деформационных марок), использовались расстояния 100 м, 300 м и 500 м и углы визирования  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , и  $90^\circ$ . На рисунке 4.4 показана схема наблюдений за деформационными марками плотины Дукан с пунктов А и В.

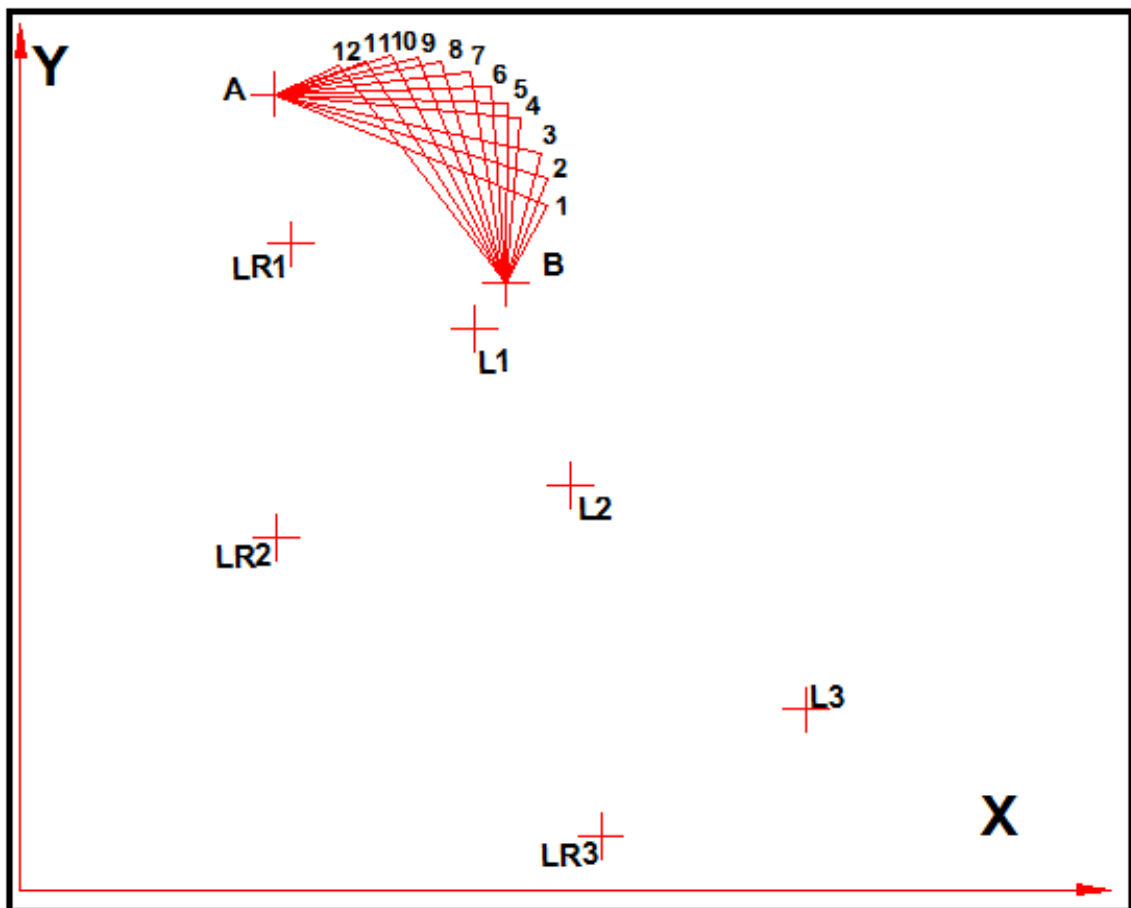


Рисунок 4.4 – Схема деформационной сети для наблюдения деформаций наплотины «Дукан» с выделением линий наблюдений за деформационными марками с пунктов А и В.

В итоге анализа запроектированной сети (учитывая ландшафт местности, определяющий видимость пунктов, результаты оценки точности положения деформационных марок) рекомендуется существующую деформационную сеть оставить в прежнем виде. Однако следует коренным образом изменить оценку

результатов измерений. При этом необходимо выполнять оценку устойчивости исходных пунктов с включением в схему съёмочных точек (А, В, рисунок 4.5). Непосредственно наблюдение деформационных марок проводить с использованием тахеометра (с угловой точностью  $0,5''$  мм и линейной  $2\text{мм}+2\text{ppm}$ ) и выполнять пересчет смещений, опираясь на самый стабильный пункт.

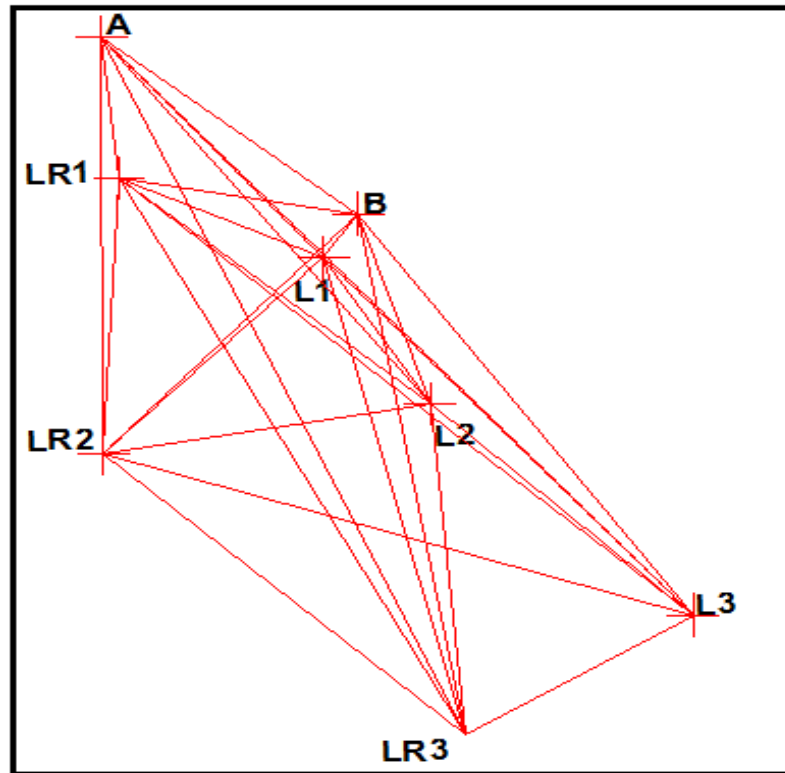


Рисунок 4.5 – Схема измерений исходных пунктов деформационной сети «Дукан».

При анализе взаимосвязи между фактическими данными смещения и уровнем воды в водохранилище использованы данные, полученные по измерениям со съёмочных станций А и В. При этом установлено их подвижность (рисунок 4.3).

В связи с важностью этого момента проведен расчет смещений точек А и В относительно выявленных (см. главу 3) наиболее стабильных пунктов LR3, L3. На рисунок 4.6 а, б приведены результаты этого пересчета и определены смещения точек А и В.

Как видно из рассмотрения графиков (рисунок 4.6) смещения точек А и В составляют единицы сантиметров, что безусловно неприемлемо при наблюдениях за деформациями. Таким образом, как уже было сказано наблюдения можно

выполнять со станций А и В, однако следует выполнять оценку стабильности исходных пунктов и опираться на наиболее устойчивые.

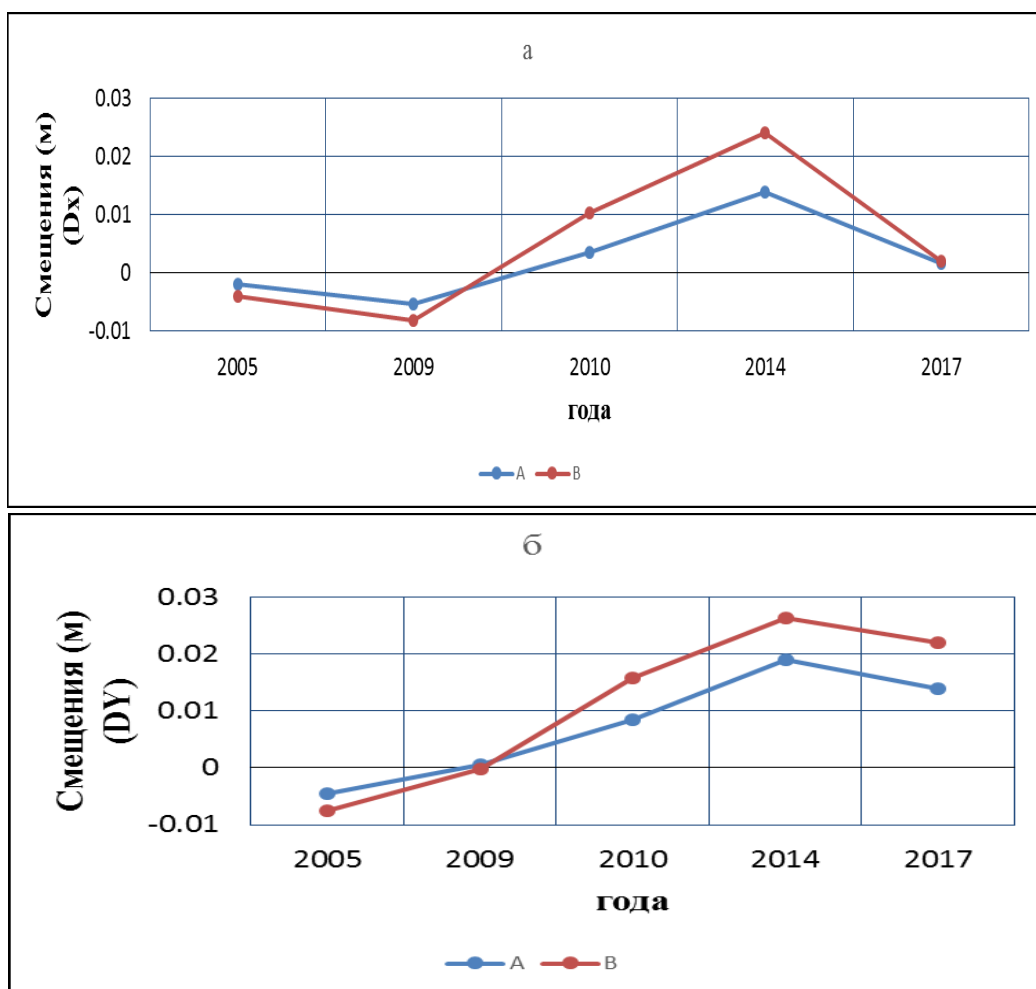


Рисунок 4.6 – Результаты измерений смещений деформационных марок: а- смещения точек А и В по оси Х; б- смещения точек А и В по оси Y.

Устойчивость исходных реперов выполнена по модифицированному способу Костехеля [25,27,58]. Модификация состоит в распространении способа на горизонтальные смещения. Для плотины «Дукан» предлагается выполнять линейно-угловые измерения с каждого из пунктов: А, В, LR1, L1, LR2, L2, LR3 L3, с наведением на все соседние указанные пункты. Определяются координаты всех пунктов. Далее вычисляются расстояния между измеренными точками сети наблюдения плотины «Дукан». При повторных измерениях (следующий цикл) вычисляются разности вычисленных длин  $[v]$  и их среднеквадратические отклонения  $[vv]$ . В таблице 4.1 показан механизм применения модифицированного способа Костехеля. В каждом цикле проверяется оценка устойчивости и определяется наиболее устойчивый исходный пункт.

Таблица 4.1– Данные для реализации алгоритма модифицированного способа Костехеля

-	Звенья сети							[-V]/[VV]	Прим.
L3	L3-LR3	L3-L2	L3-LR2	L3-L1	L3-LR1	L3-A	L3-B	-	-
V	$D_{L3-LR3}' - D_{L3-LR3}$	$D_{L3-L2}' - D_{L3-L2}$	$D_{L3-LR2}' - D_{L3-LR2}$	$D_{L3-L1}' - D_{L3-L1}$	$D_{L3-LR1}' - D_{L3-LR1}$	$D_{L3-A}' - D_{L3-A}$	$D_{L3-B}' - D_{L3-B}$	-	-
VV	$(D_{L3-LR3}' - D_{L3-LR3})^2$	$(D_{L3-L2}' - D_{L3-L2})^2$	$(D_{L3-LR2}' - D_{L3-LR2})^2$	$(D_{L3-L1}' - D_{L3-L1})^2$	$(D_{L3-LR1}' - D_{L3-LR1})^2$	$(D_{L3-A}' - D_{L3-A})^2$	$(D_{L3-B}' - D_{L3-B})^2$	$\sum[V_{L3}V_{L3}]$	-
LR3	LR3-L3	LR3-L2	LR3-LR2	LR3-L1	LR3-LR1	LR3-A	LR3-B	-	-
V	$D_{LR3-L3}' - D_{LR3-L3}$	$D_{LR3-L2}' - D_{LR3-L2}$	$D_{LR3-LR2}' - D_{LR3-LR2}$	$D_{LR3-L1}' - D_{LR3-L1}$	$D_{LR3-LR1}' - D_{LR3-LR1}$	$D_{LR3-A}' - D_{LR3-A}$	$D_{LR3-B}' - D_{LR3-B}$	-	-
VV	$(D_{LR3-L3}' - D_{LR3-L3})^2$	$(D_{LR3-L2}' - D_{LR3-L2})^2$	$(D_{LR3-LR2}' - D_{LR3-LR2})^2$	$(D_{LR3-L1}' - D_{LR3-L1})^2$	$(D_{LR3-LR1}' - D_{LR3-LR1})^2$	$(D_{LR3-A}' - D_{LR3-A})^2$	$(D_{LR3-B}' - D_{LR3-B})^2$	$\sum[V_{LR3}V_{LR3}]$	-
L2	L2-LR3	L2-L3	L2-LR2	L2-L1	L2-LR1	L2-A	L2-B	-	-
V	$D_{L2-LR3}' - D_{L2-LR3}$	$D_{L2-L3}' - D_{L2-L3}$	$D_{L2-LR2}' - D_{L2-LR2}$	$D_{L2-L1}' - D_{L2-L1}$	$D_{L2-LR1}' - D_{L2-LR1}$	$D_{L2-A}' - D_{L2-A}$	$D_{L2-B}' - D_{L2-B}$	-	-
VV	$(D_{L2-LR3}' - D_{L2-LR3})^2$	$(D_{L2-L3}' - D_{L2-L3})^2$	$(D_{L2-LR2}' - D_{L2-LR2})^2$	$(D_{L2-L1}' - D_{L2-L1})^2$	$(D_{L2-LR1}' - D_{L2-LR1})^2$	$(D_{L2-A}' - D_{L2-A})^2$	$(D_{L2-B}' - D_{L2-B})^2$	$\sum[V_{L2}V_{L2}]$	-
LR2	LR2-LR3	LR2-L2	LR2-L2	LR2-L1	LR2-LR1	LR2-A	LR2-B	-	-
V	$D_{LR2-LR3}' - D_{LR2-LR3}$	$D_{LR2-L2}' - D_{LR2-L2}$	$D_{LR2-L2}' - D_{LR2-L2}$	$D_{LR2-L1}' - D_{LR2-L1}$	$D_{LR2-LR1}' - D_{LR2-LR1}$	$D_{LR2-A}' - D_{LR2-A}$	$D_{LR2-B}' - D_{LR2-B}$	-	-
VV	$(D_{LR2-LR3}' - D_{LR2-LR3})^2$	$(D_{LR2-L2}' - D_{LR2-L2})^2$	$(D_{LR2-L2}' - D_{LR2-L2})^2$	$(D_{LR2-L1}' - D_{LR2-L1})^2$	$(D_{LR2-LR1}' - D_{LR2-LR1})^2$	$(D_{LR2-A}' - D_{LR2-A})^2$	$(D_{LR2-B}' - D_{LR2-B})^2$	$\sum[V_{LR2}V_{LR2}]$	-
L1	L1-LR3	L1-L2	L1-LR2	L1-L3	L1-LR1	L1-A	L1-B	-	-
V	$D_{L1-LR3}' - D_{L1-LR3}$	$D_{L1-L2}' - D_{L1-L2}$	$D_{L1-LR2}' - D_{L1-LR2}$	$D_{L1-L3}' - D_{L1-L3}$	$D_{L1-LR1}' - D_{L1-LR1}$	$D_{L1-A}' - D_{L1-A}$	$D_{L1-B}' - D_{L1-B}$	-	-
VV	$(D_{L1-LR3}' - D_{L1-LR3})^2$	$(D_{L1-L2}' - D_{L1-L2})^2$	$(D_{L1-LR2}' - D_{L1-LR2})^2$	$(D_{L1-L3}' - D_{L1-L3})^2$	$(D_{L1-LR1}' - D_{L1-LR1})^2$	$(D_{L1-A}' - D_{L1-A})^2$	$(D_{L1-B}' - D_{L1-B})^2$	$\sum[V_{L1}V_{L1}]$	-
LR1	LR1-LR3	LR1-L2	LR1-LR2	LR1-L1	LR1-L3	LR1-A	LR1-B	-	-

Продолжение таблицы 4.1

V	$D_{LR1-LR3}' - D_{LR1-LR3}$	$D_{LR1-L2}' - D_{LR1-L2}$	$D_{LR1-LR2}' - D_{LR1-LR2}$	$D_{LR1-L1}' - D_{LR1-L1}$	$D_{LR1-L3}' - D_{LR1-L3}$	$D_{LR1-A}' - D_{LR1-A}$	$D_{LR1-B}' - D_{LR1-B}$	-	-
VV	$(D_{LR1-LR3}' - D_{LR1-LR3})^2$	$(D_{LR1-L2}' - D_{LR1-L2})^2$	$(D_{LR1-LR2}' - D_{LR1-LR2})^2$	$(D_{LR1-L1}' - D_{LR1-L1})^2$	$(D_{LR1-L3}' - D_{LR1-L3})^2$	$(D_{LR1-A}' - D_{LR1-A})^2$	$(D_{LR1-B}' - D_{LR1-B})^2$	$\Sigma[V_{LR1} V_{LR1}]$	-
A	A-LR3	A-L2	A-LR2	A-L1	A-LR1	A-L3	A-B	-	-
V	$D_{A-LR3}' - D_{A-LR3}$	$D_{A-L2}' - D_{A-L2}$	$D_{A-LR2}' - D_{A-LR2}$	$D_{A-L1}' - D_{A-L1}$	$D_{A-LR1}' - D_{A-LR1}$	$D_{A-L3}' - D_{A-L3}$	$D_{A-B}' - D_{A-B}$	-	-
VV	$(D_{A-LR3}' - D_{A-LR3})^2$	$(D_{A-L2}' - D_{A-L2})^2$	$(D_{A-LR2}' - D_{A-LR2})^2$	$(D_{A-L1}' - D_{A-L1})^2$	$(D_{A-LR1}' - D_{A-LR1})^2$	$(D_{A-L3}' - D_{A-L3})^2$	$(D_{A-B}' - D_{A-B})^2$	$\Sigma[V_A V_A]$	-
B	B-LR3	B-L2	B-LR2	B-L1	B-LR1	B-A	B-L3	-	-
V	$D_{B-LR3}' - D_{B-LR3}$	$D_{B-L2}' - D_{B-L2}$	$D_{B-LR2}' - D_{B-LR2}$	$D_{B-L1}' - D_{B-L1}$	$D_{B-LR1}' - D_{B-LR1}$	$D_{B-A}' - D_{B-A}$	$D_{B-L3}' - D_{B-L3}$	-	-
VV	$(D_{B-LR3}' - D_{B-LR3})^2$	$(D_{B-L2}' - D_{B-L2})^2$	$(D_{B-LR2}' - D_{B-LR2})^2$	$(D_{B-L1}' - D_{B-L1})^2$	$(D_{B-LR1}' - D_{B-LR1})^2$	$(D_{B-A}' - D_{B-A})^2$	$(D_{B-L3}' - D_{B-L3})^2$	$\Sigma[V_B V_B]$	-

Пункт, у которого получились минимальные значения ( $\min \sum[VV]$ ) считается самым стабильным.

Применения модифицированного способа Костехеля к нашему случаю (плотины «Дукан») (таблица 4.2), показало, что минимальные измерения ( $\min \sum[VV]$ ) получились от исходных точек L3 и L2, поэтому эти точки, считаются самыми стабильными точками сети.

Таблица 4.2 – Результаты оценки стабильности исходных точек плотины «Дукан»

D	D <sub>0</sub>	D <sub>2005</sub>	V	VV	Прим.
L3			-	-	-
L3- LR3	181.654963 3	181.654963 3	0	0	-
L3-L2	246.973053 9	246.973742 3	0.00068841 8	4.73919E -07	-
L3- LR2	421.970830 6	421.972374 8	0.00154422 1	2.38462E -06	-
L3-L1	382.262751 5	382.263063 2	0.00031171 2	9.71646E -08	-
L3- LR1	526.898564 5	526.901700 5	0.00313606 1	9.83488E -06	-
L3-A	616.357988 2	616.360221 3	0.00223311	4.98678E -06	-
L3-B	395.849255 6	395.850605 4	0.00134982 9	1.82204E -06	0.0000195993994664389 (min) Стаб.
LR3	-	-	-	-	-
LR3- L3	181.654963 3	181.654963 3	0	0	-
LR3- L2	266.799293 9	266.801398 7	0.00210478 7	4.43013E -06	-
LR3- LR2	334.106215 4	334.107315 6	0.00110016 2	1.21036E -06	-
LR3- L1	395.192300 7	395.193885 6	0.00158492 1	2.51198E -06	-
LR3- LR1	506.837512 4	506.841614 8	0.00410231 5	1.6829E- 05	-
LR3-A	614.115452 7	614.118857 1	0.00340434 4	1.15896E -05	-
LR3-B	425.023828 6	425.026475 6	0.00264697 9	7.0065E- 06	4.35775E-05
L2	-	-	-	-	-
L2-L3	246.973053 9	246.973742 3	0.00068841 8	4.73919E -07	-
L2- LR3	266.799293 9	266.801398 7	0.00210478 7	4.43013E -06	-

Продолжение таблицы 4.2

L2-LR2	226.389344 1	226.392596 9	0.00325280 5	1.05807E -05	-
L2-L1	138.151574 8	138.151078 5	- 0.00049630 1	2.46315E -07	-
L2-LR1	280.100923 8	280.103414 4	0.00249065 2	6.20335E -06	-
L2-A	371.304829 4	371.306271 2	0.00144180 1	2.07879E -06	-
L2-B	160.734399 9	160.734929 6	0.00052966 1	2.80541E -07	0.0000242937779265904(min) Стаб.
LR2	-	-	-	-	-
LR2-L3	421.970830 6	421.972374 8	0.00154422 1	2.38462E -06	-
LR2-LR3	334.106215 4	334.107315 6	0.00110016 2	1.21036E -06	-
LR2-L2	226.389344 1	226.392596 9	0.00325280 5	1.05807E -05	-
LR2-L1	217.797844 6	217.802077 2	0.00423261 1	1.7915E- 05	-
LR2-LR1	223.316499 2	223.321395 5	0.00489632 9	2.3974E- 05	-
LR2-A	336.507726 7	336.512468 5	0.00474181 1	2.24848E -05	-
LR2-B	259.510468 6	259.515329 9	0.00486132 4	2.36325E -05	0.000102182
L1	-	-	-	-	-
L1-L3	382.262751 5	382.263063 2	0.00031171 2	9.71646E -08	-
L1-LR3	395.192300 7	395.193885 6	0.00158492 1	2.51198E -06	-
L1-L2	138.151574 8	138.151078 5	- 0.00049630 1	2.46315E -07	-
L1-LR2	217.797844 6	217.802077 2	0.00423261 1	1.7915E- 05	-
L1-LR1	154.100583 1	154.103474 6	0.00289159 1	8.3613E- 06	-
L1-A	234.111103 2	234.113021 7	0.00191854 6	3.68082E -06	-
L1-B	42.2971468 1	42.2978928 3	0.00074601 7	5.56541E -07	3.33691E-05
LR1	-	-	-	-	-
LR1-L3	526.898564 5	526.901700 5	0.00313606 1	9.83488E -06	-
LR1-LR3	506.837512 4	506.841614 8	0.00410231 5	1.6829E- 05	-

## Продолжение таблицы 4.2

LR1-L2	280.100923 8	280.103414 4	0.00249065 2	6.20335E -06	-
LR1-LR2	223.316499 2	223.321395 5	0.00489632 9	2.3974E- 05	-
LR1-L1	154.100583 1	154.103474 6	0.00289159 1	8.3613E- 06	-
LR1-A	114.032951 4	114.032686 2	- 0.00026512 8	7.02929E -08	-
LR1-B	165.443444 4	165.445718 3	0.00227387 6	5.17051E -06	7.04434E-05
A	-	-	-	-	-
A-L3	616.357988 2	616.360221 3	0.00223311	4.98678E -06	-
A-LR3	614.115452 7	614.118857 1	0.00340434 4	1.15896E -05	-
A-L2	371.304829 4	371.306271 2	0.00144180 1	2.07879E -06	-
A-LR2	336.507726 7	336.512468 5	0.00474181 1	2.24848E -05	-
A-L1	234.111103 2	234.113021 7	0.00191854 6	3.68082E -06	-
A-LR1	114.032951 4	114.032686 2	- 0.00026512 8	7.02929E -08	-
A-B	225.692262 1	225.693308	0.00104596 5	1.09404E -06	4.59851E-05
B	-	-	-	-	-
B-L3	395.849255 6	395.850605 4	0.00134982 9	1.82204E -06	-
B-LR3	425.023828 6	425.026475 6	0.00264697 9	7.0065E- 06	-
B-L2	160.734399 9	160.734929 6	0.00052966 1	2.80541E -07	-
B-LR2	259.510468 6	259.515329 9	0.00486132 4	2.36325E -05	-
B-L1	42.2971468 1	42.2978928 3	0.00074601 7	5.56541E -07	-
B-LR1	165.443444 4	165.445718 3	0.00227387 6	5.17051E -06	-
B-A	225.692262 1	225.693308	0.00104596 5	1.09404E -06	3.95627E-05

## 4.3 Выводы по четвертой главе

В 4 главе проведена обобщение и адаптация разработок, представленных в главах 1-3 применительно к геодезическому мониторингу плотины «Дукан».

Основные выводы:



1. Разработанная методика геодезического мониторинга плотин продемонстрирована на конкретном объекте, плотине Дукан. Главным ее достоинством является тот факт, что в результате исследований не потребовалось полностью менять деформационную сеть. Это важно и с точки зрения преемственности использования данных измерений и конечно с экономической точки зрения. Изменения должны претерпеть лишь деформационные марки. Автором предлагается неравномерное их размещение, без изменения их количества;

2. В итоге предлагается деформационная сеть, состоящая из 8 исходных пунктов (в прежнем виде). Неравномерное размещение 12 деформационных марок (рисунок 4.3, б). Для обеспечения миллиметровой точности измерений, что требуется в соответствии с нормами России предлагается использовать тахеометр с угловой точностью  $0,5''$  мм и линейной  $2\text{мм}+2\text{ppm}$ . Как показано расчетами при количестве исходных пунктов 2 и более требуемая точность достигается (в случае плотины Дукан исходных съемочных пункта 2). Обязательно выполнять оценку устойчивости исходных пунктов с включением в схему съемочных точек (А, В) и выполнять пересчет смещений опираясь на самый стабильный пункт.

3. По результатам настоящих исследований сформулировано третье научное положение: точность прогнозирования деформационного процесса плотин повышается при использовании разработанной методики проведения геодезических наблюдений за смещениями, включающей, заложение деформационных марок в местах их априорных концентраций и периодичности замеров с частотой, соразмерной уровню воды в водохранилище, а также с применением модифицированного способа оценки стабильности исходных пунктов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно – квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи: разработки методики геодезических наблюдений, учитывающей уровень воды водохранилища и расчетное распределение деформаций в плотине, обеспечивающей повышение точности оценки ее деформированного состояния.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. В результате проведенных исследований, опирающихся на натурные данные о смещениях плотин и на результаты моделирования точности измерений, а также характера их смещений, разработана методика геодезических наблюдений, позволяющая повышение точности оценки фактического деформированного состояния плотин.

2. При геодезическом мониторинге плотин необходимо учитывать уровень воды в водохранилище. Предлагается, по результатам расчетов и фактических данных, выделять уровни воды, которые определяют степень опасности конкретной плотины. Так, для исследуемой плотины «Дукан» в Ираке выделены 3 уровня воды. Выделен средний интервал, при котором выполняется нормативный порядок измерений (один раз в квартал). Уровни воды выше среднего следует считать опасными и геодезический мониторинг надо проводить еженедельно или даже ежедневно в зависимости от деформирования плотины. Если уровень воды ниже среднего интервала ситуация может считаться неопасной и геодезические наблюдения проводятся один раз в год.

3. Разработана программа «ПЛОТИНА» (реализация метода конечных элементов, получено свидетельство на программу) и проведено моделирование деформаций в плотине, по результатам которого выделяется зона наибольшей деформации, что позволяет проектировать сеть деформационных марок в теле плотины. В зоне наибольших смещений (красная зона) интервал между

деформационными марками учащается, в оранжевой зоне (средней) интервал традиционный и в зеленой зоне, где степень смещения меньше – интервал больше среднего. Методика дифференцированного интервала реализована для плотины «Дукан». Приняты следующие интервалы между деформационными марками – 15, 20 и 25 м.

4. Разработана методика геодезического мониторинга плотин, предусматривающая заложение деформационных марок в местах их априорных концентраций, периодичность замеров с частотой, соразмерной уровню воды в водохранилище, а также с применением модифицированного способа оценки стабильности исходных пунктов.

5. В работе выполнена модификация известного способа Костехеля, заключающаяся в его обобщении на горизонтальные смещения и вовлечении в расчетную схему исходных пунктов и съемочных точек деформационной сети.

6. Разработанная методика геодезического мониторинга адаптирована для практического ее применения на плотине «Дукан».

7. Перспективы дальнейших исследований представляются в использовании спутниковых определений координат деформационных марок с уточнением их положения путем специальных тахеометрических измерений.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ГНСС	–	Глобальная навигационная спутниковая система
ГИС	–	Географическая информационная система
ИПД	–	Измерение площади деформации
МНК	–	Метод наименьших квадратов
НДС	–	Напряженно-деформированное состояние
ПК	–	Программный комплекс
СКП	–	Средняя квадратическая погрешность
ТНС/TIN	–	Треугольные нерегулярные сети
ЦМР	–	Цифровой модель рельефа
ЦММ	–	Цифровая модель местности
ЦМП	–	Цифровая модель поверхности
DInSAR	–	Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar
ETM	–	Enhanced Thematic Mapper
GPS	–	Global Positioning System
IDW	–	Inverse distance weighted
GB- SAR	–	Green band- Specific Absorption Rate
OLI	–	Operational Land Imager
RAR	–	Real Aperture Radar
SAR	–	Specific Absorption Rate
SLC	–	Scan Line Corrector
НЛС	–	Наземное лазерное сканирования
TIRS	–	Thermal Infrared Sensor
WGS84	–	World Geodetic System 1984. Всемирная геодезическая система 1984

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аврунев, Е.И., Гиниятов, И.А. Основы земельного кадастра и мониторинга земель: методические указания / Е.И. Аврунев, И.А. Гиниятов. – Новосибирск: СГГА, 2002. – 21с.
2. Аврунев, Е. И., Метелева, М. В. Результат оптимизации построения опорной геодезической сети на территорию города новосибирска / Е. И. Аврунев, М. В. Метелева // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т.3. – №2. – С. 120-125.
3. Азаров, Б.Ф. Современные методы геодезических наблюдений за деформациями инженерных сооружений / Б.Ф. Азаров // Алтайский государственный технический университет. – 2011. – № 1. – С. 19-29.
4. **Аль Фатин, Х. Д.**, Мустафин М.Г., Исмаэль Х.С., Геодезический мониторинг деформаций водоподпорных гидротехнических сооружений с учетом оценки уровня воды водохранилища/ **Х.Д. Аль Фатин**, М.Г. Мустафин, Х.С. Исмаэль // Естественные и технические науки. – Москва. – 2019. – №4 (130). – С.122-125.
5. **Аль Фатин, Х. Д.**, Мустафин М.Г. методика оценки деформаций водоподпорных плотин/ Х.М. Хатум, М.Г. Мустафин // Вестник СГУГиТ. – Новосибирск. – 2021. – Том 26 –№ 1–DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1- С.45-56.
6. Аль Фатин, Х. Д. Влияние атмосферных условий и геометрии сети на результаты геодезических наблюдений / Х. Д. Аль Фатин, Х. М. Хатум, Х. М. Шокер, О. А. Колесник // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. –Вып. 2. – С. 3–20.
7. Афонин, К.Ф. Технологии геодезических и картографических работ: учеб. пособие / К.Ф. Афонин. – Новосибирск: СГГА, 2007. – 100 с.
8. Афонин, К.Ф., Мазуров, Б.Т. Основные геодезические работы. Уравнивание линейно-угловых геодезических сетей параметрическим

способом: методические указания / К.Ф. Афонин, Б.Т. Мазуров. – Новосибирск : СГГА, 1999. – 27 с.

9. Александров, Ю.Н. Расчетные исследования поведения плотины Саяно-Шушенской ГЭС в годовом цикле изменения нагрузок в 2004-2005 году. / Ю.Н. Александров // Гидротехническое строительство 2006. - № 6, -С.9-13.

10. Балжинням, Т., Мягмаржав, И. Реконструкция опорной геодезической сети с помощью GPS технологии / Т. Балжинням, И. Мягмаржав // Интерэкспо гео-сибирь. – Новосибирск: СГГА. – 2007. – Т.2. – С.68-74.

11. Бугакова, Т. Ю. Применение ГИС-технологий и методов математического моделирования для определения крена плиты фундамента инженерного сооружения/ Т. Ю. Бугакова, А. А. Басаргин, А. И. Каленицкий // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 70–78.

12. Безродный, К.П. О нагрузках от горного давления на обделки тоннелей закрытого способа работ / К.П.Безродный, М.О.Лебедев // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 649-653. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.649.

13. Большаков, В. Д. Геодезия. Изыскания и проектирование инженерных сооружений [Текст] / В. Д. Большаков, Е. Б. Ключин, И. Ю. Васютинский: практикум. - М.: Недра, 1991. - 238 с.

14. Брызгалов, В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций / В.И. Брызгалов. — Красноярск: Сибир. издат. дом «Суриков», 1999. 560 с.

15. Брынь, М.Я. Оценка точности определения положения точек способом свободного нивелирования/ М.Я. Брынь, Ю.В. Лобанова, Д.А. Афонин, Г.Г. Шевченко// Геодезия и картография.– 2021.– Т. 82.– №5.– С.2 – 9.– DOI: 10.22389/0016-7126-2021-971-5-2-9

16. Вальков, В.А. Применение наземного лазерного сканирования для создания трехмерных цифровых моделей Шуховской башни / В. А. Вальков, М. Г. Мустафин, Г. В. Макаров // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 58–61.

17. Виноградов, А.В. Оценка точности метода Precise Point Positioning и возможности его применения при кадастровых работах / А.В. Виноградов, А.В. Войтенко, А.Ю. Жигулин. // Геопрофи. – Москва. – 2010. – № 2. – С.27-30.

18. Волохов, Е.М. Современные системы контроля сдвижений и деформаций при строительстве подземных сооружений / Е.М.Волохов, С.Ю.Новоженин, Нгуен Суан Бак.// Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 253–259.

19. Гусев, В.Н. Исследование процессов сдвижения и деформаций горных пород по данным геомеханического мониторинга на Яковлевском руднике / В.Н.Гусев, Е. М.Малюхина // Маркшейдерский вестник. 2017. № 5. С.64-71.

20. Губайдуллина, Р.А. О соотношении точностей линейных и угловых измерений в линейно-угловых сетях/ Р.А. Губайдуллина, Ю.Н. Корнилов// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. Т. 64. № 2. С. 145-149.

21. Государственный стандарт российской федерации. ГОСТ Р 22.1.11-2002 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг состояния водоподпорных гидротехнических сооружений (плотин) и прогнозирование возможных последствий гидродинамических аварий на них. Общие требования // ИПК Издательство стандартов -2002- Группа Т58. - с. 18.

22. Госстрой России. СП 11-104-97 Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства // М.: ПНИИИС Госстроя России -1997- 11-104-97/ Часть III. - с. 126.

23. Госстрой России. СП 40.13330.2012, Свод правил. Плотины бетонные и железобетонные, 2013-01-01

24. Гудков, В. М., Хлебников А. В. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений // Учебник для вузов.— М.: Недра — 1990.—335 с.

25. Ганьшин, В.Н. Измерение вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / В. Н. Ганьшин, А. Ф. Стороженко, А. Г. Ильин. // Недра, 1981. – 215 с.

26. Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР. Москва. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1 000 и 1:500// Москва, Недра – 1982.- ГКИНП - 02-033-79.- С. 5-7.

27. Ганьшин, В.Н. Геодезические методы измерения вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / В.Н. Ганьшин, А.Ф. Стороженко, Н.А. Буденков и др. - М.: Недра, 1991. – 188

28. Грищенко, Н.Н. Прогноз деформаций земной поверхности на подрабатываемых территориях с учетом мезорельефа / Н.Н. Грищенко, Е.В. Блишкова // Маркшейдерский вестник. - 2013. - №4. - С. 34-38.

29. Гуляев, Ю.П. Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений [Текст] / Ю. П. Гуляев. - Новосибирск : СГГА, 2008. - 256 с.

30. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений [Текст] / Д. Ш. Михеев и др. - М. : Недра, 1977. 151 с.

31. Деменков, П.А. Метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов в условиях плотной городской застройки с применением способа «стена в грунте» /П.А.Деменков, Л.А.Голдобина, О.В.Трушко // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 480-486. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.480.

32. Дьяков, Б.Н. Сравнительный анализ формул для оценки точности площади многоугольников/ Б.Н. Дьяков, А.А. Кузин// Маркшейдерский вестник. 2020. № 3 (136). С. 30-33.

33. Елисеева, Н.Н. применение методов поисковой оптимизации при решении геодезических задач/ Н. Н Елисеева, А.В. Зубов, В. Н Гусев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка-2020- №5. pp. 491-498.



34. Журнал "Ближний Восток, 2016. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aawsat.com/home/article/582586/يحذر-السابق-العراقية-المائية-الموارد-وزير>?amp (дата обращения 01.11.2016)

35. Жуков, Б. Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации [Текст] / Б. Н. Жуков. - Новосибирск: СГГА, 2004. - 376 с

36. Зубов, А.В. Программный комплекс для определения кренов сооружений башенного типа по данным наземного лазерного сканирования/ А.В. Зубов, Н.Н. Елисеева// Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 7. С. 2-7.

37. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике // М: Мир. 1975. – с. 271, С.543.

38. Инженерная геодезия и геоинформатика. краткий курс Брынь М.Я., Богомолова Е.С., Коугия В.А., Лёвин Б.А., Матвеев С.И., Полетаев В.И., Сергеев О.П., Толстов Е.Г. Санкт-Петербург, 2015. - 285 с.

39. Карпик, А.П., Чешева, И.Н. Исследование и анализ точности специальных инженерно-геодезических сетей методом математического моделирования: методические указания / А.П. Карпик, И.Н. Чешева. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 32 с.

40. Корнилов, Ю.Н. Геодезия. Топографические съемки: учебное пособие / Ю.Н. Корнилов. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический универси-тет), 2008. – 145 с.

41. Кобелева, Н. Построение по геодезическим данным прогнозной модели процесса перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС (на этапе эксплуатации 2007–2009 гг.)// Н. Кобелева, В. С Хорошилов// Вестник СГУГиТ, 2015, Вып. 4 (32). – С. 5–12.

42. Корнилов, Ю.Н. Использование относительных величин для исключения систематических погрешностей геодезических измерений/ Ю.Н. Корнилов, Р.А. Губайдуллина// Маркшейдерский вестник. 2020. № 3 (136). С. 17-24.

43. Калустян, Э.С. Оценка и роль рисков в плотиностроении // Гидротехническое строительство. 1999. - № 12. - С. 27—31.

44. Кафтан, В.И. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений / В.И. Кафтан, П.А. Докукин // Геодезия и картография. - 2007. - №9. - С. 18-22.

45. Карпик, А.П. Оценка состояния Саяно-Шушенской плотины в период нормальной эксплуатации по данным геодезических измерений / А.П. Карпик, Н.И. Стефаненко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2009. - № 5. -С. 3-11.

46. Карлсон, А.А. Руководство по натурным наблюдениям за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований геодезическими методами. — М.: Энергия, 1980.

47. Комиссаров, А. В. Мониторинг деформаций сооружений в сочетании с технологией трехмерного моделирования [Текст] / А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова, В. А. Середович, А. В. Середович, Г. Н. Ткачева, С. С. Студенков // Геодезия и картография. - 2006. - № 6. - С. 12-14.

48. Куштин, И. Ф. Геодезия: обработка результатов измерений [Текст]: учеб. пособие. - М.: ИКЦ «МарТ». - Ростов н/Д.: Издат. центр «МарТЧ», 2006. - 288 с.

49. Ле, Ван Хау Обоснование параметров подземной разработки наклонных угольных пластов бассейна Куангнинь под охраняемыми объектами на поверхности // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 412-419. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.412

50. Мазуров, Б. Т. Геодинамические системы (теоретические основы качественного исследования горизонтальных движений) // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 26–35.

51. Мазуров, Б.Т. Метод оценки дивергенции векторных полей деформаций земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых // Б.Т.Мазуров, М.Г.Мустафин, А.А.Панжин // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 376-382. DOI 10.31897/PMI.2019.4.376

52. Мазуров, Б.Т. Математическое моделирование по геодезическим данным: учебное пособие / Б.Т. Мазуров. – Новосибирск, СГГА, 2013, 127 с

53. Маркузе, Ю. И. Теория математической обработки геодезических измерений. Основы метода наименьших квадратов и уравнительных вычислений: учебное пособие / Ю. И. Маркузе. Книга 2. – М.: МИИГАиК, 2005. – 280 с.

54. Мустафин, М.Г., Аль Фатин Х.Д., Хатум Х.М. Некоторые особенности мониторинга деформационных процессов на горно-гидротехнических объектах / М.Г. Мустафин, Х.Д. Аль Фатин, Х.М. Хатум // Маркшейдерский вестник. – Москва. – 2020. – № 6 (139). – С.51-60.

55. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. РД 153-34.2-21.342-00. М.2001. 24с.

56. Медведская, Т.М. Совершенствование методики геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования: Автореферат дис. ... канд. техн. наук.: — Новосибирск, 2019. — 24 с.

57. Мустафин, М.Г. Современное маркшейдерско-геодезическое обеспечение эксплуатации горных предприятий /М.Г.Мустафин, Е.Н. Грищенкова, Ж.А. Юнее, Г.И. Худяков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. -2017- Вып.4. С. 190-203.

58. Нгуен, Х.В. Анализ и пути развития методов оценки устойчивости опорных реперов при наблюдениях за оседаниями земной поверхности / Х.В. Нгуен, М.Г. Мустафин // Естественные и технические науки. – 2017. – № 5 (107). – С. 89–96.

59. Пандул, И.С. Геодезические работы при изысканиях и строительстве гидротехнических сооружений// Политехника, 2012. — 156 с.

60. Правила проведения натурных наблюдений за работой бетонных плотин рд 153-34.2-21.545 // ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева-2003- с. 34.

61. Плотина Лаос [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/2018\\_Laos\\_dam\\_collapse](https://en.wikipedia.org/wiki/2018_Laos_dam_collapse). (дата обращения 29.07.2018).

62. Плотина Мальпассе́ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Malpasset\\_Dam](https://en.wikipedia.org/wiki/Malpasset_Dam) (дата обращения 22.11.2019)

63. Прорыв дамбы на реке Сейба [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%80%D1%8B%D0%B2\\_%D0%B4%D0%B0%D0%BC%D0%B1%D1%8B\\_%D0%BD%D0%B0\\_%D1%80%D0%B5%D0%BA%D0%B5\\_%D0%A1%D0%B5%D0%B9%D0%B1%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%80%D1%8B%D0%B2_%D0%B4%D0%B0%D0%BC%D0%B1%D1%8B_%D0%BD%D0%B0_%D1%80%D0%B5%D0%BA%D0%B5_%D0%A1%D0%B5%D0%B9%D0%B1%D0%B0) (дата обращения 01.06.2021)

64. Попов, В.Н., Чекалин, С.И. Геодезия: учебник для вузов / В.Н. Попов, С.И. Чекалин. – Москва: Горная книга, 2007. – 703 с.

65. Поклад, Г. Г. Геодезия [Текст]: учеб. пособие для вузов / Г. Г. Поклад, С. П. Гриднев. - М.: Академический проект, 2007. - 592 с.

66. Петров, В. В. Контроль геометрических характеристик вращающихся печей [Текст] / В. В. Петров, С. В. Тюрин, А. Н. Копытов // Цемент и его применение. - 2010. - № 2. - С. 78-82.

67. Российская Федерация. Законы. О безопасности гидротехнических сооружений: федеральный закон № 117-ФЗ, 21.07.1997 г. // Рос. газ. 1997.

68. Рекомендации по анализу данных и проведению натурных наблюдений за осадками и горизонтальными смещениями бетонных плотин П83-2001 / ВНИИГ, СПб., 2001.

69. Рекомендации по анализу данных и проведению натурных наблюдений за противодавлением и состоянием дренажных систем в основании и теле бетонных плотин П 84-2001/ ВНИИГ, СПб., 2001

70. Скрипников, В.А. Геодезические наблюдения за горизонтальными смещениями плотин/ В. А. Скрипников, М.А. Скрипникова // Интерэкспо Гео-Сибирь -2016- Т. 1. – С. 9-12.

71. Салищев, К.А. Картоведение// Издательство московского университета, 1976-438с.

72. Серебрякова, Л.И. К вопросу оценки точности спутниковых определений, выполняемых на геодинамических полигонах / Л.И. Серебрякова,

В.П. Горобец, Л.Ю. Козлова, Р.А. Сермягин // Геодезия и картография. – Москва. – 2006. – №6. – С.34-39.

73. Судаков, С.Г. Основные геодезические сети: учебник для вузов / С.Г. Судаков. – М.: Недра, 1975. – 368 с.

74. Стефаненко, Н.И. Необратимые перемещения плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Вестник Краснояр. гос. архитектурно-строит. акад.: сборник науч. тр. 2003. - С. 33-43. - 2003. - Вып. 6.

75. Стефаненко, Н.И. Совершенствование системы геодезического мониторинга арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС: Автореферат дис. канд. техн. наук: — Новосибирск, 2010. — 24 с.

76. Столбов, Ю.В. Назначение точности возведения строительных конструкций с учетом ответственности зданий и сооружений [Текст] / Ю. В. Столбов, С. Ю. Столбова // Вестник СибАДИ. - 2006. - Вып. 4. - С. 134-137.

77. Столбов, Ю.В. Прикладная геодезия. Геодезические разбивочные работы при строительстве зданий и сооружений [Текст] / Ю. В. Столбов, Ю. В. Столбова. -Омск: СибАДИ, 2016. - 43 с.

78. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667291 Российская Федерация. Программа «ПЛОТИНА» для расчета напряженно-деформированного состояния плотины / **Аль Фатин Хасан Джамил Ибрахим**, Мустафин Мурат Газизович // – № 2020665930; заявл. 04.12.2020; зарегистр. 22.12.2020.

79. Тамутис, З.П. Оптимальные методы проектирования геодезических сетей / З.П. Тамутис. – М.: Недра, 1979. – 128 с.

80. Толошинов, А.В. Построение конечно-элементной расчетной модели для оценки напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС /А.В. Толошинов, Ю.Н. Александров, А.П. Епифанов //Известия Вузов. Строительство, 2006. - № 7. - С.38-47.

81. Уставич, Г.А. Геодезия. В 2-х кн. Кн. 1 [Текст] : учебник для вузов / Г.А. Уставич. - Новосибирск: СГГА, 2012. - 352 с.

82. Уставич, Г.А. Определение крена сооружений башенного типа СРС-приемниками и тахеометрами [Текст] / Г. А. Уставич // Геодезия и картография. -2003. - № 9. - С. 30-33.

83. Хиллер, Б. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга/ Б. Хиллер, Х. К. Ямбаев// Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий) -2016- 1 (33).

84. Худяков, Г.И. Развитие методов аналитической геометрии на сфере для решения задач геодезии и навигации // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 70-81. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.70

85. Яковлев, Н.В. Высшая геодезия: учебник для вузов / Н. В. Яковлев. – М.: Недра, 1989. – 445 с.

86. Ямбаев, Х.К. Некоторые итоги геодезического мониторинга движений земной коры территории промышленных площадок крупных инженерных сооружений / Х.К. Ямбаев, В.Р. Ященко // Геодезия и картография. -2011. - №9. - С. 2-7.

87. Ямбаев, Х.К. Геодезический мониторинг движений земной коры: состояние, возможности, перспектива / Х.К. Ямбаев, В.Р. Ященко // Интерэкспо Гео-Сибирь. - 2012. - Т.3. - С. 139-155.

88. Adebajji, A. Empirics of Standard Deviation // Researchgate , 2014, DOI: 10.13140/RG.2.1.4103.5680.

89. Akhtarpour, A. The deformation mechanism of a high rockfill dam during the construction and the first impounding/ A. Akhtarpour, M. Salari// Researchgate,2018, DOI: 10.24200/sci.2018.20778.

90. **Al Fatin, H. J.** Geodetic deformation monitoring in the dam-reservoir system / **H. J. Al Fatin**, M. G. Mustafin, H. S. Ismael // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 698, no. 4, p. 44012.

91. Al-Husseinawi, Y. Evaluation of the Stability of the Darbandikhan Dam after the 12 November 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab (Iran–Iraq Border) Earthquake// Y. Al-Husseinawi

92. . Ali, A. GIS spatial model based for DAM reservoir on dry Wadis/ A. Ali, E.S. Mohamed, A. Belal, M. El-Shirbeny // 36th Asian Conference on Remote Sensing: Fostering Resilient Growth in Asia, Proceeding ,2015, – P 15.
93. Al Ghsieh, H. The storm center weather Amateurs [Электронныйресурс] -Режим доступа: <https://www.storm.ae/vb/showthread.php?t=31893> (дата обращения 15.02.2021)
94. Al-Sadik, B. S. Displacement Computation of Mosul Dam by Using Free Geodetic Network Adjustment/ B. S. Al-Sadik ,Y. H. Al-Kanani // 2010/10/01 - journal of engineering - Baghdad university ER -
95. Al-Ansari, N. Is Mosul Dam the Most Dangerous Dam in the World? Review of Previous Work and Possible Solutions / N. Al-Ansari, N. Adamo, V. Sissakian, S. Knutsson, J. Laue // Engineering, 2017, Vol. (1947-394X). – P. 801–823. doi:10.4236/eng.2017.910048.
96. Al-Ansari, N. Mystery of Mosul Dam the most Dangerous Dam in the World: The project/ N. Al-Ansari, I. E. Issa, V. Sissakian, N. Adamo// Researchgate, 2015. Vol 38. P. 1-21
97. Bayrak, T. Verifying Pressure of Water on Dams, a Case Study// Sensors, 2008.
98. Bayrak, T. Modelling the relationship between water level and vertical displacements on the Yamula Dam, Turkey //Natural Hazards and Earth System Sciences, 2007.
99. Beregovoi D.V. Monitoring of quarry slope deformations with the use of satellite positioning technology and unmanned aerial vehicles / D. V. Beregovoi, J. A. Younes, M. G. Mustafin // Procedia engineering, 2017 (189). – pp. 737-743.
100. Berberan, A. Deformation monitoring of earth dams using laser scanners and digital imagery, research gate, 2007.
101. Chrzanowski, A.S. Use of deformation monitoring results in solving geomechanical problems-case studies/ A.S. Chrzanowski, A. Chrzanowsk, M. Massiera//Engineering Geology 2005, 79, 3-12.

102. Chen, Y. Reservoir-Induced Land Deformation: Case Study from the Grand Ethiopian Renaissance Dam/ Y. Chen, M. Ahmed, N. Tangdamrongsub, D. Murgulet// Remote Sens. 2021, vol. 13, pp. 874. <https://doi.org/10.3390/rs13050874>  
Aca.
103. Dukan Dam Reservoir Bed Sediment Kurdistan Region, Iraq, /R. Hassan, N. Al Ansari, S. S. Ali, A. A. Ali, T. Abdullah // Scientific Research Publishing, 2016.
104. Demidova, P. 3D Modelling in solution of cadastral and geodetic tasks / P. Demidova, O. Kolesnik, **H. Al Fatin**, // E3S Web of Conferences 164, 07014 (2020) TPACEE-2019, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016407014> 100 100
105. De Sousa Joaquim, J. M. Satellite SAR interferometry for monitoring dam deformations in portugal/ J. M. de Sousa Joaquim, L. Milan, H. Ivana, M. Bakon, Patricio G., Perissin D.// research gate, 2015. P. 21-24
106. Dam failure, Wikipedia [Электронныйресурс] - Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dam\\_failure](https://en.wikipedia.org/wiki/Dam_failure). (дата обращения 12.07.2019)
107. Deformation monitoring of earth dams using laser scanners and digital imagery/ A. Berberan, J. Marcelino, J. Boavida, A. Oliveira// research gate, 2007.
108. Erol, S. A general review of the deformation monitoring techniques and a case study: analysing deformations using GPS/levelling/ S. Erol, B. Erol, Ayan T.// XXth ISPRS Congress ,2004, Vol. (VII, WG VII/5). – P. 12–23.
109. Encyclopedia of Irrigation in Iraq February 1918- February 2005, Republic of Iraq/ ministry of water resources.
110. Engineer Manual, EM-1110-2-1004, 1994. Deformation Monitoring and Control Surveying. U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC., pp 191.
111. Fonseka P.G.C.C. Geodetic triangulation 2014// Researchgate, 2014, – FG447– pp. 51. doi: 10.13140/RG.2.1.4103.5680.
112. Fabio, L. am Failures in the 20th Century: Nearly 1,000 Avoidable Victims in Italy Alone// Journal of Environmental Science and Engineering A 3 (2014), Vol. 3, No. 1: 19-31



113. Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring/ M. Scaioni, M. Marsella, M. Crosetto, V. Tornatore, J. Wang// *Sensors*, 2018.
114. Gkalp, E. Deformation Monitoring by GPS at Embankment Dams and Deformation Analysis/ E. Gkalp, L. Taşçi// *Survey Review*, 2009, VL – 41, DO - 10.1179/003962608X390021.
115. Ground-based synthetic aperture radar interferometry for deformation monitoring: a case study at Geheyan Dam, China/ Q. Huang G. Luzi J. Monserrat M. Crosetto// *Journal of Applied Remote Sensing*, 2017, VL - 11, DO - 10.1117/1.JRS.11.036030
116. Herbei, M. V. Georeferencing of topographical maps using the software ARCGIS/ M. V. Herbei, V CIOLAC, A. SMULEAC, E. NISTOR, L. CIOLAC// *Research Journal of Agricultural Science*, 2010, – Vol. 42(3), pp. 595–606.
117. Kulkarni, M.N. Global Positioning System In Disaster Monitoring Of Koyna Dam/ M.N Kulkarni, N. Radhakrishnan, D. Rai// *Western Maharastra. Survey Review*, 2006, 38, 629-636.
118. Kuzin, A.A. Prediction of natural and technogenic negative processes based on the analysis of relief and geological structure / A.A. Kuzin, E.N. Grishchenkova, M.G. Mustafin // *Procedia Engineering*. - 2017. - T. 189. - Pp. 744751.
119. Kulkarni, M. N. Crustal & dam deformation studies using GPS// *geospatial word*, 2009.
120. Luzi, G. Advanced Techniques for Dam Monitoring/G. Luzi, M. Crosetto, O. Monserrat// *research gate*, 2010.
121. Litvinenko, V. Preface. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses // *International European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2018. Saint-Petersburg, Russia, 22 May 2018)*. London: Taylor and Francis Group. UK. 2018. Vol. 1. P. 9-15.
122. Lesson From a Dam Failure/ E. James, S.D. Mackey, J.F. Gottgens, G. Gill// *The Ohio journal of science*, 2000, VL - 100. P. 121-131.

123. Li, W., GPS in the tailings dam deformation monitoring/ W. Li, C. Wang// *Procedia Engineering* 26 (2011) 1648 – 1657.
124. Liscio, E. A Comparison of the Terrestrial Laser Scanner & Total Station for Scene Documentation// E. Liscio, A. Hayden<sup>2</sup>, J. Moody, *J Assoc Crime Scene Reconstr.* 2016:20
125. . Levin E. Bathymetric surveying in Lake Superior: 3D modeling and sonar equipment comparing/ E. Levin, G. Meadows, R. Shults , U. Karacelebi , H. S. Kulunk// *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*,2019, – Vol. (XLII-2/W10), pp. 101- 106.
126. Mustafa, N. F., Statistics and Variability of Darbandikhan and Dukan dams inflow time series//*JZS* ,2017, 19-2(part A).
127. Ministerial Committee, the encyclopedia of irrigation in Iraq (February 1918- February 2005), Republic of Iraq / ministry of water resources, 2005.
128. Mustafin, M.G. Monitoring of Deformation Processes in Buildings and Structures in Metropolises / M.G. Mustafin, V.A. Valkov, A.I. Kazantsev // *Procedia Engineering.* - 2017. - №189. - Pp. 729-736.
129. Perfomance of Darbndikhan Dam during a major eathquake on November 12, 2017/ Yousif O. S., Zaidn K., Alhkane Y., Khani A., Hama S. K. // *Researchgate*, 2019.
130. Pirt, A. Evaluation of some levelling techniques in surveying application/A. Pirt, R. G. Hosbas// *Geodesy and cartography*, 2019, DOI:<https://doi.org/10.24425/gac.2019.128463>
131. Pipitone, C. Monitoring Water Surface and Level of a Reservoir Using Different Remote Sensing Approaches and Comparison with Dam Displacements Evaluated via GNSS/C. Pipitone, A. Maltese, G. Dardanelli, M. Lo Brutto, G la Loggia// *Remote Sensing*, 2018 Vol. 10. P 1-24
132. Saad, A.A.,Simple model for improving the accuracy of the egyptian geodetic triangulation network [electronic resource]/A.A. Saad,M.S. El Sayed. Paper. – FIG Working Week 2007, Hong Kong SAR 13-17 May 2007. – Access mode:

[http://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2007/papers/ts\\_1b/ts01\\_b\\_03\\_saad\\_saad\\_1226.pdf](http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2007/papers/ts_1b/ts01_b_03_saad_saad_1226.pdf) (дата обращения 01.11.2021).

133. Saudi Arabia Standards on Terrestrial mapping. – Saudi Arabi: Ministry of municipal and rural affairs, General directorate of surveying and mapping, 2005. – 121 p.

134. Salih, S. Using of GIS spatial analyses to study the selected location for dam reservoir on Wadi Al-Jirnaf. West of Shirqat Area, Iraq/ S. Salih, A. S. M. Al-Tarif// Journal of Geographic Information System, 2012, Vol. (4 No.2) pp 117-127. doi:10.4236/jgis.2012.42016.

135. Soycan, A. Digital elevation model production from scanned topographic contour maps via thin plate spline interpolation/ A. Soycan, M. Soycan// Arabian Journal for Science and Engineering, 2012, Vol. 34, pp. 121.

136. Sylvia, G. Adjustment of positional geodetic networks by unconventional estimations /G. Sylvia, H. Juraj// Acta Montanistica Slovaca Volume 15 №1. – Slovaca, 2010. – pp. 71-85.

137. Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning/ M. Alba, L. Fregonese, F. Prandi, M. Scaioni, P. Valgoi// International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006.

138. Souza, L. Case study and forensic investigation of failure of dam above Kedarnath. (PDF)/L. Souza, S. P. Grishma, P. C. Tanvi International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Retrieved 28 January 2019.

139. Science Engineering & Sustainability: Dam break simulation with HEC-RAS: Chepete proposed dam. Science Engineering & Sustainability. Retrieved 2019-12-07.

140. US Army Corps of Engineers, Engineering and Design/ Structural deformation surveying, EM 111 0-2-1 009, 2002. pp. 292.

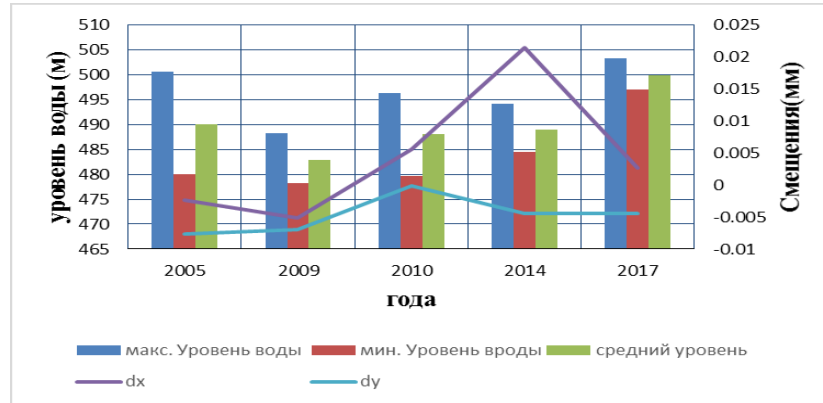
141. Wu, S. Analysis of working behavior of Jinping-I Arch Dam during initial impoundment/ S. Wu, W. Cao, J. Zheng //Water Science and Engineering, 2016.

142. Yong, L. Building a 3D digital reservoir/ L. Yong, L. Xiang-guoa // Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2005.
143. Zhou, Q. Digital Elevation Model and Digital Surface Model// Research gate, 2017.
144. Zhou, J. Accuracy analysis of dam deformation monitoring and correction of refraction with robotic total station/ J. Zhou, B. Shi, G. Ju S.//2021, PLOS ONE 16(5): e0251281. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251281>
145. Li, W. GPS in the tailings dam deformation monitoring/ W. Li, C. Wang// Procedia Engineering 26 (2011) 1648 – 1657.

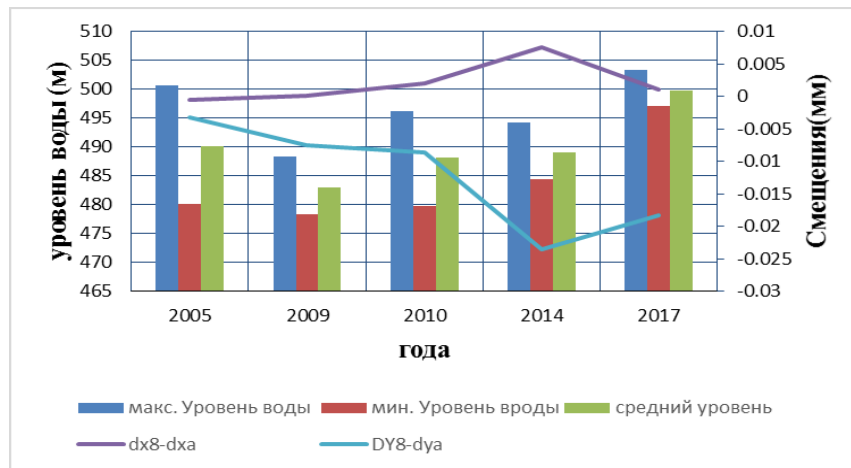
## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Графики смещений деформационной марки 8 и марки 10

а



б



в

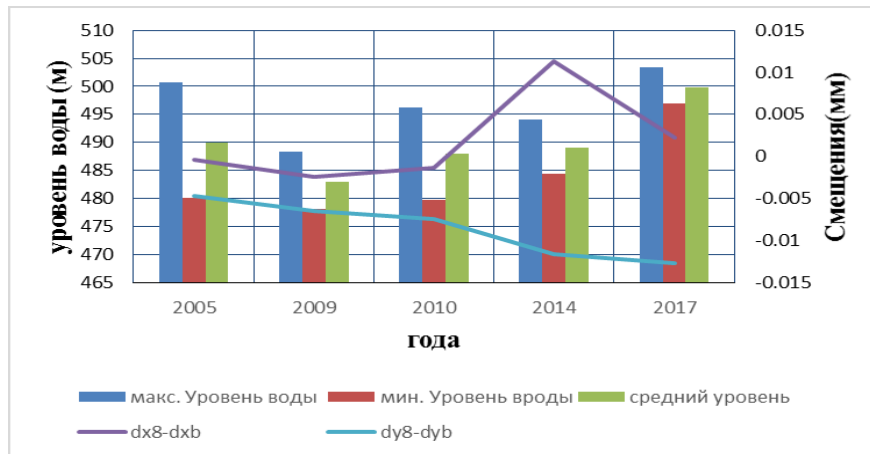
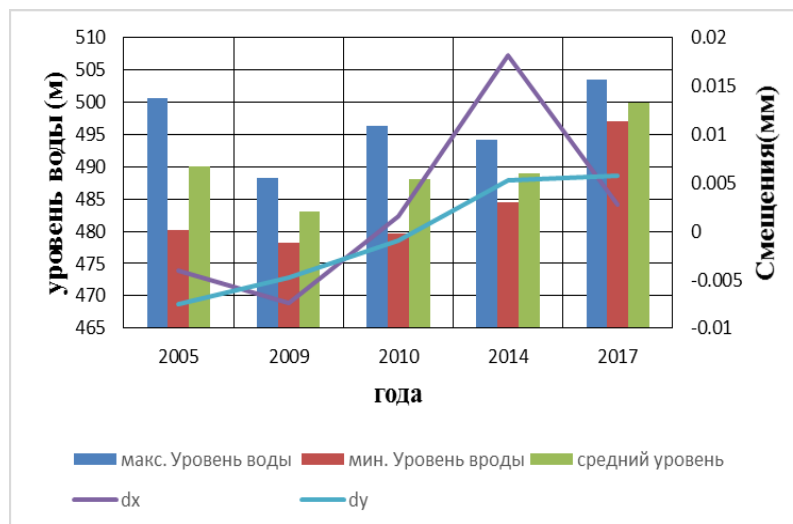
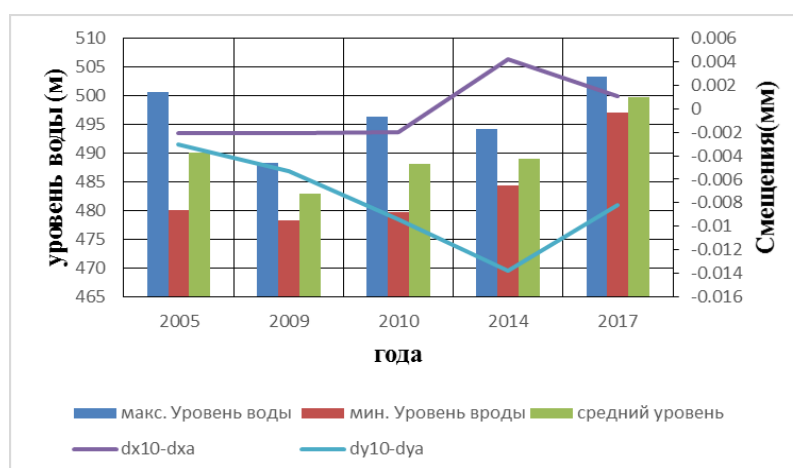


Рисунок А.1 – Графики смещений деформационной марки 8: а - диаграммы уровня воды в водохранилище по годам, б - то же без учета результатов наблюдений с точки А, в - то же без учета результатов наблюдений с точки В.

а



б



в

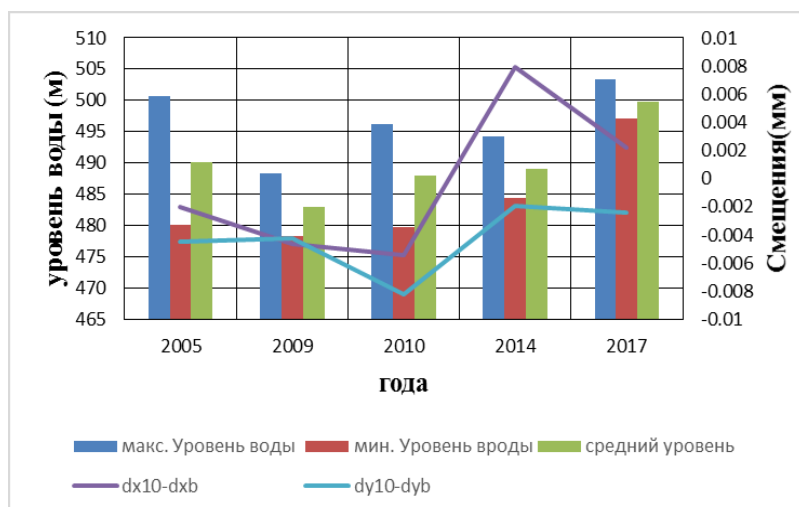


Рисунок А.2 – Графики смещений деформационной марки 10 (по осям X и Y):  
а - диаграммы уровня воды в водохранилище по годам, б - то же без учета результатов наблюдений с точки А, в - то же без учета результатов наблюдений с точки В.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### О точности положения деформационных марок

Таблица Б.1 – Результаты моделирования точности положения деформационных марок

–	СКП тахеометра, координаты исходных пунктов											
Расстояние(100m)	1mm+1pmm											
Цели (деформационные марки)	1	2	3	4	45° 1	45° 2	45° 3	45° 4	90° 1	90° 2	90° 3	90° 4
1	1.108236	0.789	0.644	0.562	1.139816	0.809	0.662	0.575	1.209608	0.953	0.823	0.75
2	1.101152	0.788	0.643	0.563	1.112992	0.792	0.648	0.566	1.189238	0.953	0.824	0.752
3	1.100237	0.788	0.643	0.564	1.086604	0.774	0.633	0.555	1.162923	0.946	0.82	0.749
4	1.106827	0.788	0.644	0.564	1.067895	0.758	0.62	0.546	1.13283	0.932	0.809	0.739
5	1.118125	0.79	0.645	0.564	1.065709	0.752	0.615	0.54	1.1	0.911	0.792	0.725
–	2mm+2pmm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–	1	2	3	4	45° 1	45° 2	45° 3	45° 4	90° 1	90° 2	90° 3	90° 4
1	2.216472	1.578	1.289	1.123	2.279632	1.618	1.324	1.149	2.419216	1.907	1.645	1.499
2	2.202304	1.576	1.286	1.126	2.225984	1.584	1.296	1.131	2.378475	1.907	1.649	1.504
3	2.200474	1.576	1.286	1.128	2.173209	1.548	1.296	1.111	2.325845	1.892	1.639	1.497
4	2.213654	1.576	1.288	1.128	2.135791	1.516	1.24	1.091	2.265661	1.864	1.617	1.479
5	2.23625	1.579	1.29	1.127	2.131417	1.504	1.229	1.08	2.2	1.822	1.583	1.449
–	5mm+3pmm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–	1	2	3	4	45° 1	45° 2	45° 3	45° 4	90° 1	90° 2	90° 3	90° 4
1	5.324708	3.783	3.089	2.686	5.419448	3.841	3.141	2.724	5.628824	4.28	3.635	3.268
2	5.303456	3.779	3.085	2.689	5.338977	3.789	3.099	2.697	5.567713	4.281	3.641	3.277
3	5.300711	3.778	3.084	2.691	5.259813	3.736	3.054	2.667	5.488768	4.259	3.628	3.267
4	5.320481	3.779	3.086	2.693	5.203686	3.689	3.015	2.638	5.398491	4.217	3.596	3.241
5	5.354375	3.785	3.091	2.693	5.197126	3.672	2.999	2.622	5.3	4.156	3.546	3.198

Продолжение таблицы Б.1

Расстояние (300m)	1mm+1pmm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	1	2	3	4	45° 1	45° 2	45° 3	45° 4	90° 1	90° 2	90° 3	90° 4
1	1.281156	0.91	0.742	0.649	1.330112	0.942	0.772	0.67	1.352045	0.953	0.823	0.75
2	1.296187	0.92	0.75	0.656	1.312184	0.93	0.761	0.663	1.355143	0.953	0.824	0.752
3	1.301266	0.923	0.753	0.659	1.284189	0.93	0.745	0.65	1.346835	0.946	0.82	0.749
4	1.297322	0.92	0.75	0.656	1.248089	0.884	0.724	0.633	1.32853	0.932	0.809	0.739
5	1.28348	0.909	0.742	0.649	1.204636	0.854	0.699	0.612	1.3	0.911	0.792	0.725
–	2mm+2pmm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–	1	2	3	4	45° 1	45° 2	45° 3	45° 4	90° 1	90° 2	90° 3	90° 4
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1	2.562312	1.82	1.484	1.297	2.660225	1.885	1.543	1.34	2.704089	1.907	1.645	1.499
2	2.592374	1.841	1.501	1.313	2.624369	1.859	1.523	1.325	2.710285	1.907	1.649	1.504
3	2.602533	1.847	1.506	1.318	2.568379	1.82	1.49	1.3	2.69367	1.892	1.639	1.497
4	2.594644	1.84	1.501	1.313	2.496177	1.769	1.449	1.266	2.657059	1.864	1.617	1.479
5	2.566961	1.818	1.484	1.298	2.409271	1.708	1.399	1.224	2.6	1.822	1.583	1.449
–	5mm+3pmm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–	1	2	3	4	45° 1	45° 2	45° 3	45° 4	90° 1	90° 2	90° 3	90° 4
1	5.843468	4.144	3.38	2.946	5.990337	4.241	3.47	3.011	6.056134	4.28	3.635	3.268
2	5.888561	4.175	3.406	2.969	5.936553	4.203	3.439	2.988	6.065428	4.281	3.641	3.277
3	5.903799	4.184	3.414	2.976	5.852568	4.144	3.39	2.95	6.040505	4.259	3.628	3.267
4	5.891966	4.174	3.406	2.969	5.744266	4.068	3.328	2.899	5.985589	4.217	3.596	3.241
5	5.850441	4.142	3.381	2.947	5.613907	3.976	3.253	2.836	5.9	4.156	3.546	3.198
Расстояние (500m)	1mm+1pmm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–	1	2	3	4	45° 1	45° 2	45° 3	45° 4	90° 1	90° 2	90° 3	90° 4
1	1.475584	1.046	0.853	0.745	1.527636	1.081	0.885	0.769	1.532856	0.953	0.823	0.75
2	1.494956	1.059	0.864	0.755	1.512007	1.07	0.876	0.762	1.544465	0.953	0.824	0.752
3	1.501231	1.063	0.868	0.758	1.483763	1.05	0.86	0.749	1.542259	0.946	0.82	0.749
4	1.495145	1.059	0.864	0.754	1.445518	1.023	0.838	0.73	1.527465	0.932	0.809	0.739
5	1.476038	1.045	0.853	0.745	1.399292	0.991	0.811	0.707	1.5	0.911	0.792	0.725



Продолжение таблицы Б.1

–	2mm+2pmm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–	1	2	3	4	45° 1	45° 2	45° 3	45° 4	90° 1	90° 2	90° 3	90° 4
1	2.951169	2.092	1.707	1.49	3.055272	2.162	1.771	1.538	3.065712	1.907	1.645	1.499
2	2.989911	2.119	1.729	1.509	3.024013	2.141	1.753	1.524	3.088929	1.907	1.649	1.504
3	3.002462	2.127	1.736	1.515	2.967526	2.101	1.72	1.497	3.084519	1.892	1.639	1.497
4	2.99029	2.118	1.728	1.509	2.891036	2.047	1.676	1.46	3.05493	1.864	1.617	1.479
5	2.952075	2.09	1.706	1.489	2.798584	1.982	1.623	1.415	3	1.822	1.583	1.449
–	5mm+3pmm	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–	1	2	3	4	45° 1	45° 2	45° 3	45° 4	90° 1	90° 2	90° 3	90° 4
1	6.426753	4.552	3.715	3.235	6.582908	4.658	3.811	3.307	6.598568	4.28	3.635	3.268
2	6.484867	4.592	3.748	3.264	6.53602	4.625	3.784	3.286	6.633394	4.281	3.641	3.277
3	6.503694	4.605	3.758	3.273	6.45129	4.565	3.735	3.246	6.626778	4.259	3.628	3.267
4	6.485435	4.591	3.747	3.263	6.336554	4.484	3.669	3.19	6.582395	4.217	3.596	3.241
5	6.428113	4.549	3.713	3.234	6.197875	4.387	3.589	3.122	6.5	4.156	3.546	3.198