

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 528.22.551.24(075.8)

№ ГР20170715

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной
работе

_____ Д.О. Глухов

«__» _____ 2017 г.

м.п.

ОТЧЕТ

о научно-исследовательской работе

Инструментальные исследования современной геодинамики Беларуси

(заключительный)

Руководитель НИР, к.т.н. Шароглазова Г.А.

подпись

«__» _____ 2017 г.

Новополоцк 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель,
канд. техн. наук, доцент _____ Г.А.Шароглазова

Младший научный сотрудник
ОСНИ, аспирант _____ К.И. Маркович
(ответственный исполнитель
ГНСС-наблюдений в 2017 г.,
математическая обработка,
введение, основной раздел, заключение)

Младший научный сотрудник
ОСНИ, м.т.н. _____ М.В. Макарова
(оформление отчета,
компьютерная верстка)

Соисполнители полевых работ,
студенты 4-ого курса специальности геодезия:

_____ В.А.Карпенко

_____ А.П.Савицкий

_____ Ю.А.Лебедев

_____ В.И.Климца

_____ Н.В.Иванько

_____ А.В.Тумаш

Нормоконтролер _____ Л.В.Ищенко

РЕФЕРАТ

Отчет 45 с., 18 рис., 10 табл., 17 ист.

СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОЛИГОН, ПОВТОРНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ТЕКТОНИЧЕСКИЕ РАЗЛОМЫ.

Объект исследований: современные движения земной коры (СДЗК) и связанные с ними геодинамические процессы, наблюдаемые в Полоцком регионе, содержащем элементы Полоцко-Курземского пояса тектонических разломов.

Цель работы: Получение новых данных о развитии деформаций земной коры на ГДП «Полоцкая ГЭС», созданного в 2014-2015 гг. в рамках выполнения задания 5.4.15 раздела «Геологические модели» подпрограммы «Природно-ресурсный потенциал» ГПНИ «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал» [1].

Методы исследования: Метод высокоточных повторных ГНСС наблюдений; способ наименьших квадратов; методика дифференциального описания деформаций сплошных сред, используемая в теории упругости.

Результаты работы: Количественные характеристики деформаций земной коры на ГДП «Полоцкая ГЭС»; схемы распределения деформаций.

Степень внедрения: результаты использованы при подготовке кандидатской диссертации, а также в учебном процессе кафедры геодезии и ГИС учреждения образования «Полоцкий государственный университет».

Область применения: проектирование, строительство и эксплуатация ответственных инженерных сооружений в зонах влияния глубинных тектонических разломов.

Экономическая эффективность: результаты исследований будут способствовать повышению безопасности эксплуатации Полоцкой ГЭС.

Прогнозные предложения о развитии объекта исследования: геодинамический мониторинг на ГДП «Полоцкая ГЭС» необходимо продолжить.

СОДЕРЖАНИЕ

	С.
Введение.....	5
ВЫПОЛНЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПОЛОЦКОМ РЕГИОНЕ.....	6
1 Проектирование геодинимического полигона «Полоцкая ГЭС».....	6
2 Проект геодезической сети на ГДП «Полоцкая ГЭС».....	12
3 Методика ГНСС-наблюдений на ГДП «Полоцкая ГЭС».....	15
4 Производство полевых геодезических работ.....	17
4.1 Производство полевых геодезических работ в 2014 году.....	17
4.2 Производство полевых геодезических работ в 2015 и 2017 годах.....	19
5 Математическая обработка результатов ГНСС-измерений.....	20
6 Характеристики деформаций земной коры в Полоцком регионе по результатам инструментальных исследований и их интерпретация.....	26
6.1 Характеристики горизонтальных деформаций земной поверхности на геодинимическом полигоне «Полоцкая ГЭС».....	26
6.2 Применение теории деформации при анализе результатов геодезических исследований СДЗК на геодинимическом полигоне «Полоцкая ГЭС».....	29
6.3 Интерпретация полученных результатов.....	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	42
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	43

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчет составлен по результатам исследований, выполненных в соответствии с техническим заданием аспирантского гранта №1017 «Инструментальные исследования современной геодинамики Беларуси» (№ гос. регистрации 20170715 от 19.05.2017г.). Они являются логическим продолжением работ по заданию 5.4.15 раздела «Геологические модели» подпрограммы «Природно-ресурсный потенциал» ГПНИ «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал», в результате которых был создан геодинамический полигон (ГДП) Полоцкая ГЭС [1].

Как известно [2] Полоцкая ГЭС расположена в зоне влияния тектонических разломов (Чашникского, Полоцкого и Туровлянского). Поэтому схема геодезических построений на данном полигоне и методика наблюдений максимально нацелены на возможность осуществления надежного контроля за этими разломами, а также исследования факта взаимообусловленного влияния тектонических и техногенных факторов на состояние земной коры и инженерных сооружений Полоцкой ГЭС.

В отчетный период на ГДП выполнен очередной цикл высокоточных ГНСС наблюдений по методике, совпадающей с методикой работ 2015 г. [1]. Определены параметры горизонтальных деформаций земной коры в районе ГЭС из сравнения результатов 2017 г. с данными ГНСС наблюдений 2014 г. и 2015 г. Построены картосхемы распределения деформационных характеристик на территорию полигона. Дополнительно к предыдущим исследованиям в 2017 г. были вычислены компоненты деформации [3] на период (2015-2017) гг., представленные в настоящем отчете в виде соответствующих схем.

ВЫПОЛНЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПОЛОЦКОМ РЕГИОНЕ.

1. Проектирование геодинамического полигона «Полоцкая ГЭС»

Проектирование геодинамического полигона в Полоцком регионе выполнялось в 2014 году на основании результатов геодинамических исследований 2006-13 гг. в районах, примыкающих к Полоцкой ГЭС [4,5,6,7]. На основании ранее выполненных исследований в [5] составлена схема расположения тектонических разломов на территорию Полоцкой ГЭС (рисунок 1) и рекомендовано выполнение постоянного геодинамического мониторинга (сейсмологического, геодезического и геофизического) в районе размещения Полоцкой ГЭС и прилегающих территорий с целью прогноза возможного проявления наведенной или вызванной сейсмичности.

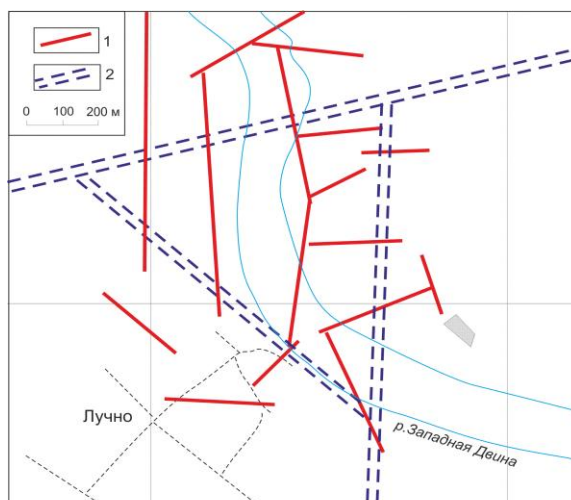


Рисунок 1 – Схема разломов на территории Полоцкой ГЭС: 1- локальные разломы в осадочном чехле; 2- фрагменты относительно региональных разломов в кристаллическом фундаменте [6].

Исследования 2006-10 гг. [5,6] не только подтвердили опасения о непростой сеймотектонической обстановке в районе строительства Полоцкой ГЭС, но и усилили их. Так показанные на рисунке 1 фрагменты относительно региональных разломов в кристаллическом фундаменте проявили себя как развивающиеся разломные зоны, слабо отражающиеся в

крупномасштабных потенциальных геофизических полях, но способные привести к дестабилизации геодинамической обстановки вблизи них.

По результатам исследований вызывающие опасения активные процессы связаны, прежде всего, с зоной динамического влияния Туровлянского разлома, секущего р. Западная Двина в месте строительства гидроузла Полоцкой ГЭС (рисунок 2).



Рисунок 2- Схема расположения геодинамически - активных участков Полоцкого регионального полигона.

I, II, III - тектонические разломы: Туровлянский; Полоцкий региональный; Яновский

Как известно [7], подобные данные о наличии геодинамических процессов, происходящих в зонах тектонических нарушений, и вызванных ими знакопеременных деформаций и движений сопряжены с серьезной

опасностью для объектов и инженерных сооружений, оказавшихся в области влияния подвижных тектонических структур, что напрямую относится к Полоцкой ГЭС.

Недостаточный объем проведенных до 2010 года экспериментальных работ в районе Полоцкой ГЭС не позволил установить характер деформирования массива горных пород исследуемой тектонической зоны. Особенно важно здесь учитывать тот факт, что спокойные в динамическом отношении участки массива могут играть опасную роль накопителя энергии, напряжений и деформаций.

Исходя из приведенных результатов, расположение пунктов в районе Полоцкой ГЭС в 2014 г. выбрано из необходимости опроса Полоцкого, Чашникского и Туровлянского разломов и сообразно с конфигурацией имеющейся здесь дорожной сети (рисунок 3).

С целью повышения надежности выбора мест закладки центров пунктов на ГДП «Полоцкая ГЭС» силами отдела аэрокосмических исследований государственного предприятия «НПЦ по геологии» НАНБ было выполнено структурное дешифрирование материалов аэрокосмических съемок (МАКС) в пределах территории листов N-35-22-Б,Г и N-35-23-А,В на площади 670 кв. км.:

- черно-белые аэрофотоснимки масштабов 1:25 000 и 1:50 000 залета 1979 г.;

- многозональные синтезированные (синтез каналов 4-5-3) космические снимки масштаба 1:100 000 и 1:500 000, полученные с американского космического спутника Landsat 5ТМ 2011 года съемки.

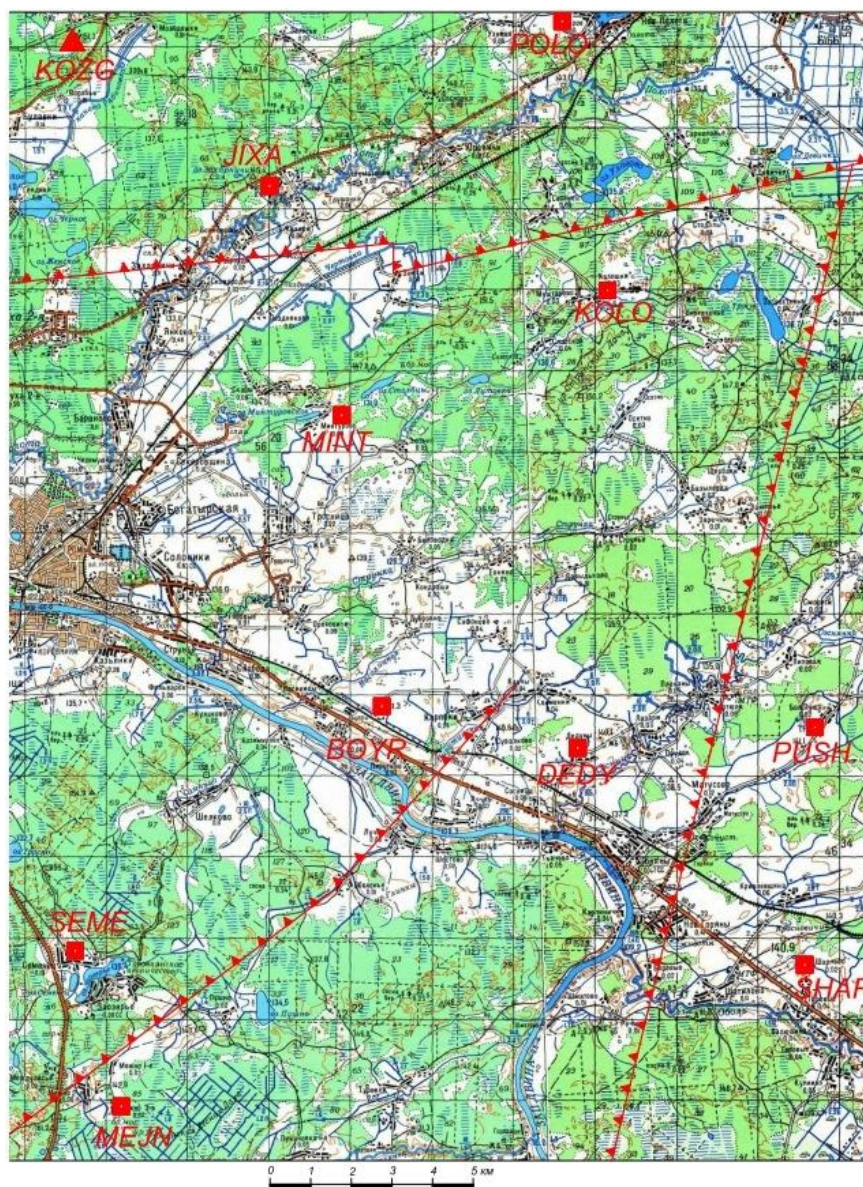


Рисунок 3 - Расположение тектонических разломов и пунктов геодинамического полигона в районе Полоцкой ГЭС: DEDY, BOYR, SEME, MEJN – пункты, контролирующие Туровлянский разлом; POLO, KOLO, JIXA.MINT – Полоцкий; DEDY, KOLO, PUSH, SHAR–Чашникский.

Основные результаты проведенных исследований даны на «Космоструктурной карте по данным структурного дешифрирования материалов аэрокосмических съемок (мозаика Landsat) геодинамического полигона «Полоцкая ГЭС» (рисунок 4) и карте «Результаты структурного дешифрирования материалов космической съемки (мозаика Landsat, синтез каналов 4-5-3) и интерпретация геолого-геофизических данных на ГДП «Полоцкая ГЭС» (рисунок 5).

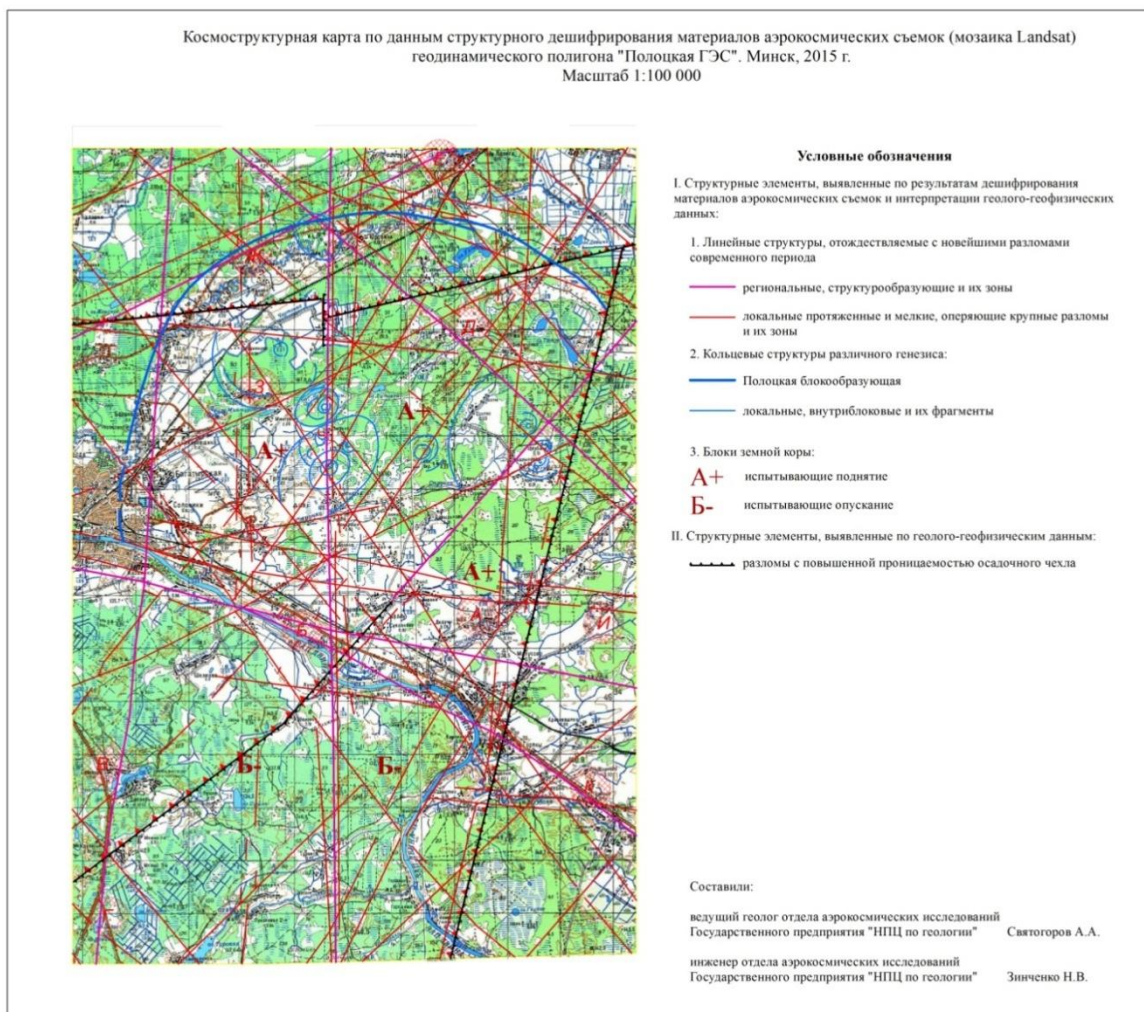


Рисунок 4 - Космоструктурная карта по данным структурного дешифрирования материалов аэрокосмических съемок (мозаика Landsat) геодинамического полигона «Полоцкая ГЭС».

Согласно карты «Результатов структурного дешифрирования материалов космической съемки и интерпретации геолого-геофизических данных на ГДП «Полоцкая ГЭС» (рисунок 5), изучаемая площадь в структурном отношении имеет разломно-блоковое строение, отражающее интенсивные глубинные процессы, происходящие в земной коре на современном этапе тектонического развития. Основную часть изучаемой территории занимает крупный блок земной коры, испытывающий поднятие на фоне общего опускания окружающей территории. Располагается он восточнее г. Полоцка на правом берегу р. Зап. Двина.

На космических снимках описываемый выше блок земной коры дешифрируется в виде крупной Полоцкой кольцевой структуры, имеющей ярко выраженный светлый фототон и ячеистый рисунок фотоизображения. Диаметр ячеек 0,5-1,5 км, в отдельных случаях до 3,0 км. Диаметр всей кольцевой структуры достигает 16 км.

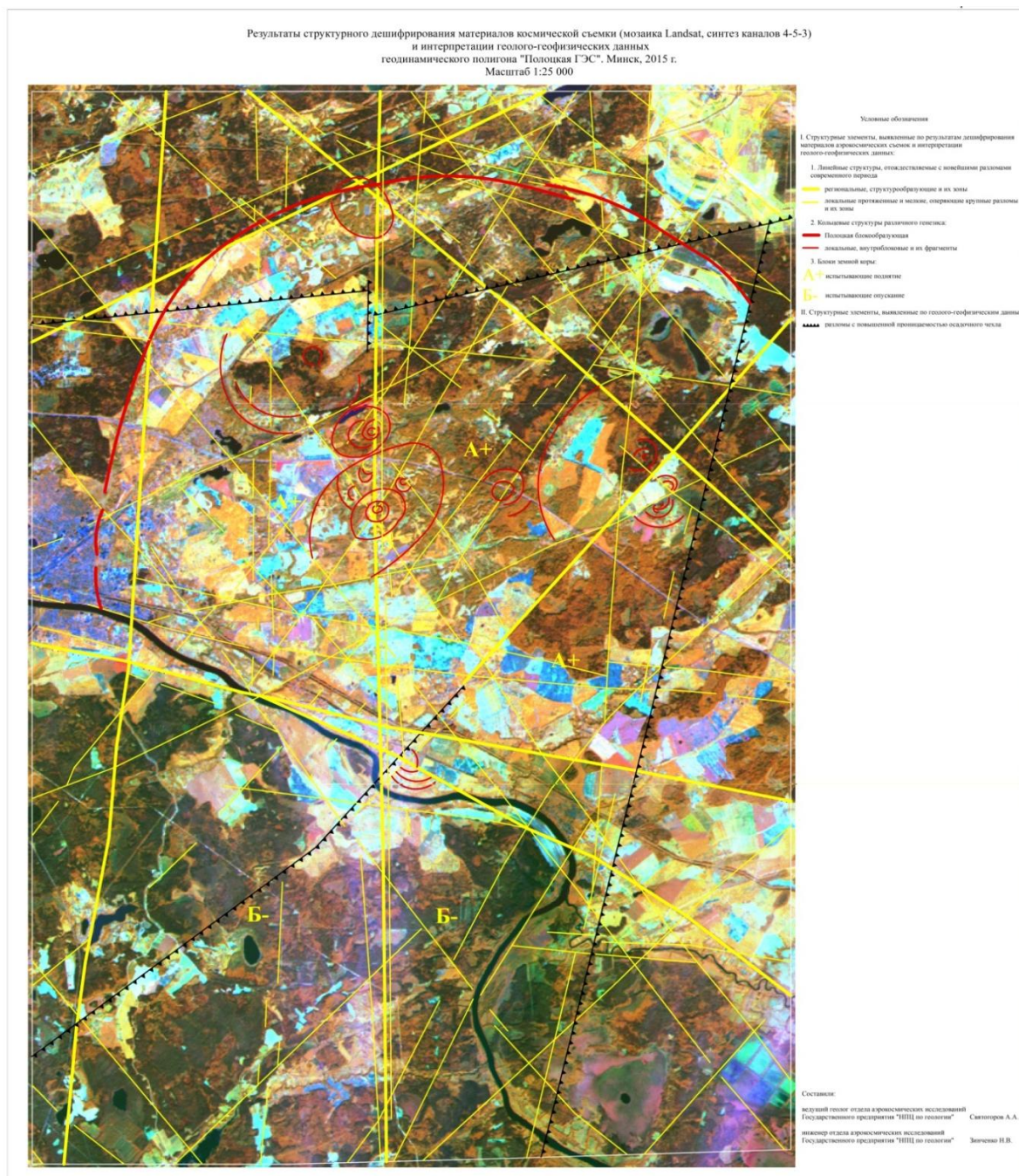


Рисунок 5 – Результаты структурного дешифрирования материалов космической съемки (мозаика Landsat, синтез каналов 4-5-3) и интерпретация геолого-геофизических данных на ГДП «Полоцкая ГЭС».

Выявленная по космическим снимкам (КС) структура находит четкое отражение в физических полях Земли в виде положительных аномалий магнитного (ΔT до 500 ед.) и гравитационного (остаточные аномалии $\Delta g R$ оср. = 5 км до 1,0 ед.) полей. Полоцкая структура практически со всех сторон ограничена протяженными разломами и их зонами, среди которых выделяется важная зона разломов шириной до 3,0 км. Эта зона разломов обрывает южную часть Полоцкой структуры, контролируя спрямленное русло р.Зап. Двина.

Таким образом, проведенные исследования по структурному дешифрированию материалов аэрокосмических съемок (МАКС) позволили выявить общий план предполагаемых тектонических нарушений и ранее неизвестный активный на современном этапе тектонического развития блок земной коры, определить зоны предполагаемых тектонических нарушений и определить наиболее рациональное размещение мест закладки глубинных реперов на геодинамическом полигоне «Полоцкая ГЭС».

2 Проект геодезической сети на ГДП «Полоцкая ГЭС»

На рисунке 6 представлена запроектированная геодезическая ГНСС-сеть в районе Полоцкой ГЭС. Для связи пунктов в районе Полоцкой ГЭС и пунктов Полоцкого геодинамического микрополигона, в дополнение к десяти пунктам, представленным на рисунке 3, в сеть включен пункт KOZG (Козьи горки нов.), который по результатам геофизических исследований находится вне зоны Полоцкого разлома. В схеме сети пункт BOYR (Бояры) является связующим по отношению к оставшимся десяти.

С целью исключения ошибок центрирования антенн спутниковых приемников, запроектирована закладка центров пунктов, обеспечивающих принудительное центрирование (рисунки 7-8). Закладка пунктов выполнена способом бурения с отбором пород грунта и присутствием геолога.

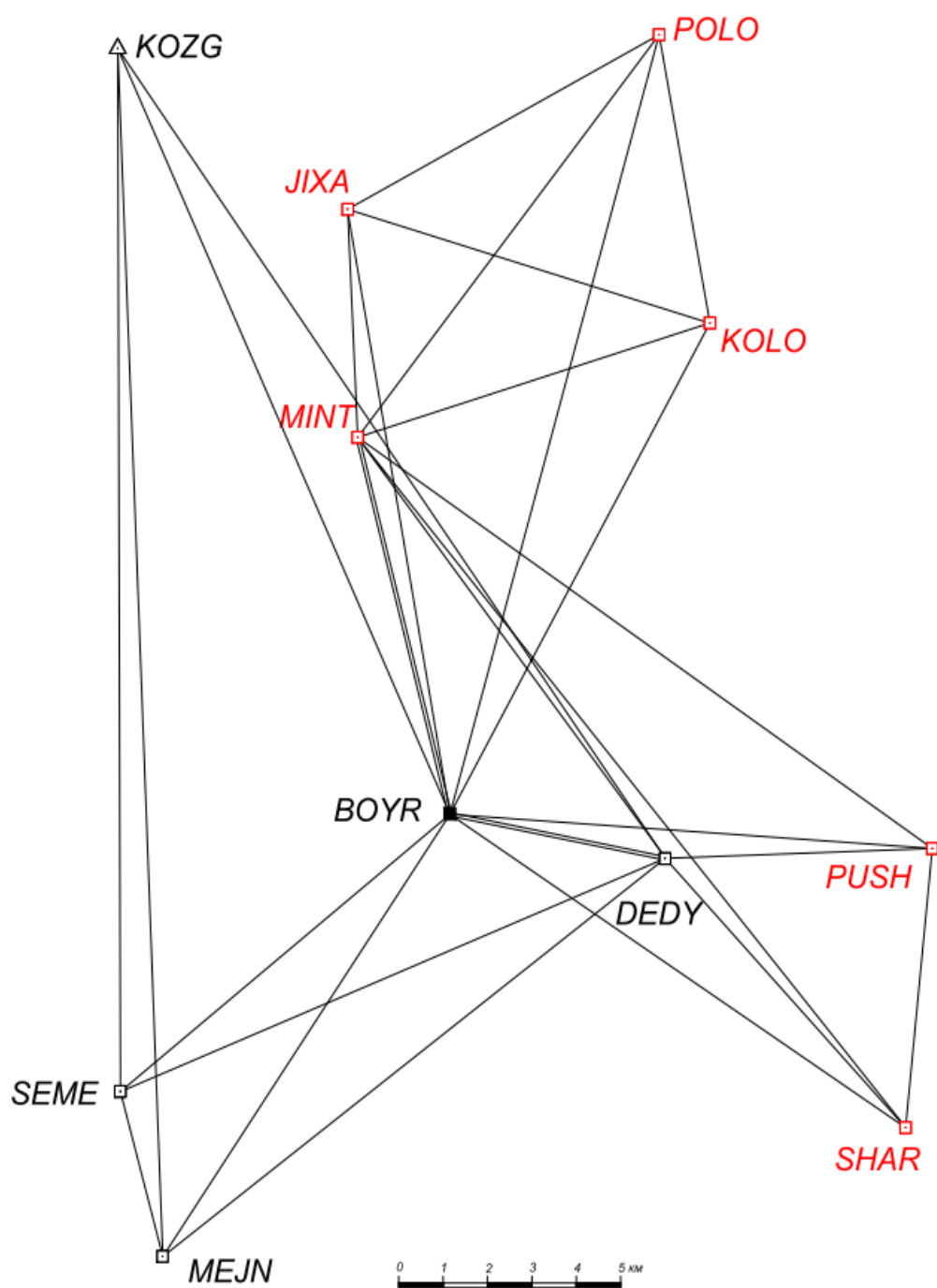


Рисунок 6 - Схема геодезической сети на ГДП «Полоцкая ГЭС»

□ – вновь заложенные центры пунктов ГДП с устройствами для принудительного центрирования спутниковых антенн (*DEDY, BOYR, SEME, MEJN* – в 2014 г.; *POLO, KOLO, JIXA.MINT, PUSH, SHAR* – в 2015 г.); Δ *KOZG* – ранее заложенный центр [5].

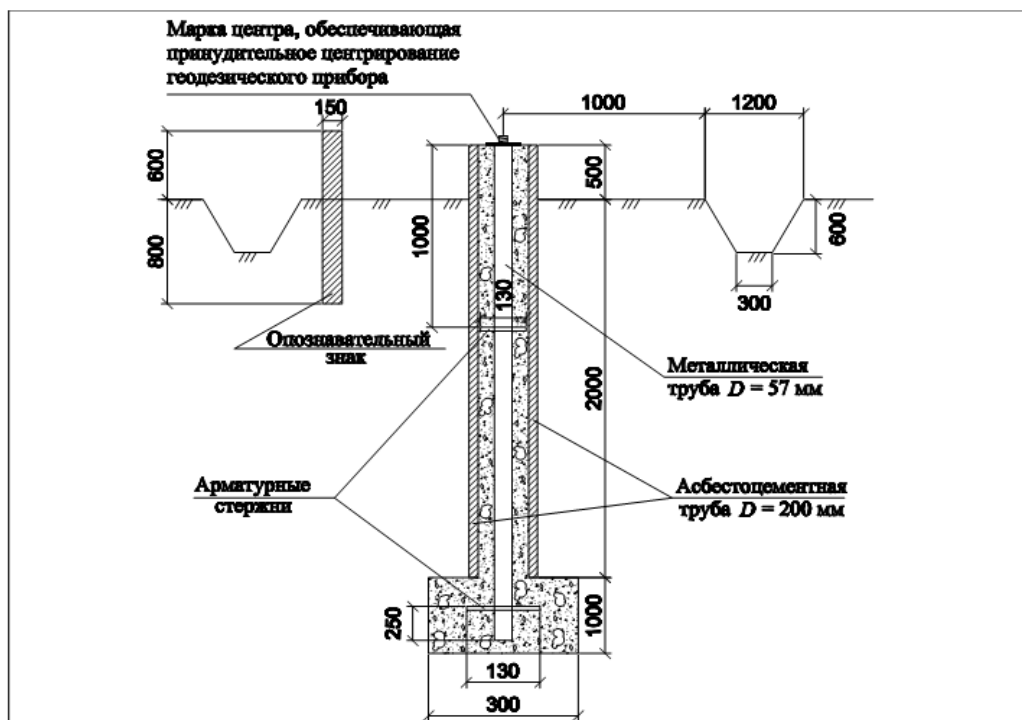


Рисунок 7 – Конструкция центров пунктов на геодинамическом полигоне Полоцкая ГЭС с маркой, обеспечивающей принудительное центрирование спутниковых антенн.



Рисунок 8 – Вид центра с приспособлением для принудительного центрирования спутниковых антенн на местности.

3 Методика ГНСС-наблюдений на ГДП «Полоцкая ГЭС»

Геодезическое оборудование и методика производства ГНСС-наблюдений выбраны, исходя из необходимости достижения точности измерений не хуже 2-3 мм в плане и 5-7 мм по высоте. На основании приборной точности оборудования принято решение в процессе измерений использовать пять двухчастотных спутниковых приемников фирмы Trimble: четыре приемника R7 с антенной Zephyr Geodetic Model-2 и один приемник R8 с антенной Internal Model-2.

Для выполнения наблюдений на представленной на рисунке 6 сети запроектировано три расстановки спутниковых приемников (рисунки 9 -10), которые образуют серию. Программа ГНСС-наблюдений в сети состоит из двух серий измерений, произведенных с интервалом не менее суток, с контролем сходимости результатов между сериями.

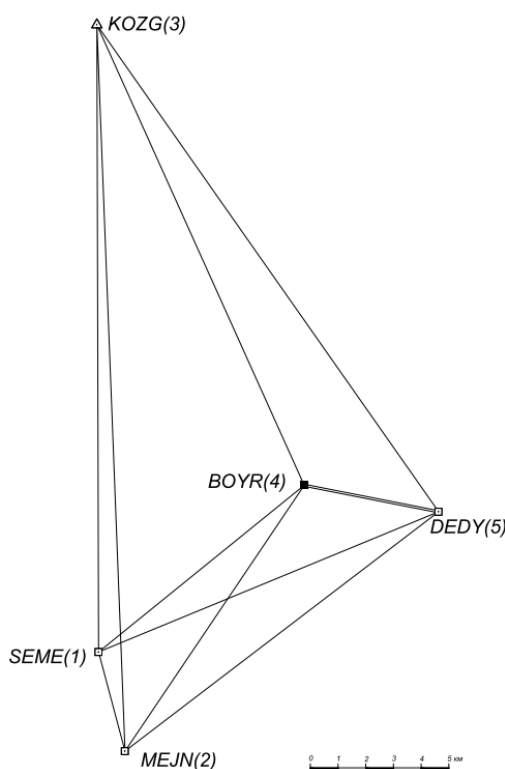


Рисунок 9 - Схема первой расстановки в серии измерений *SEME* (1) – название пункта и номер приемника.

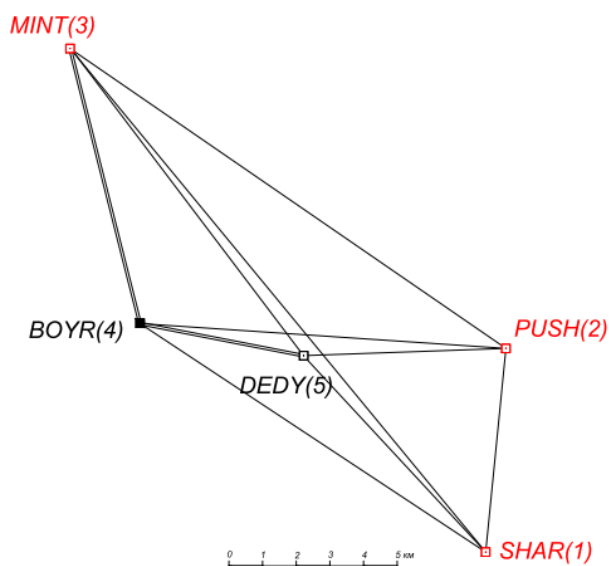


Рисунок 10 - Схема второй расстановки в серии измерений (красным показаны пункты, заложенные в 2015 г.).

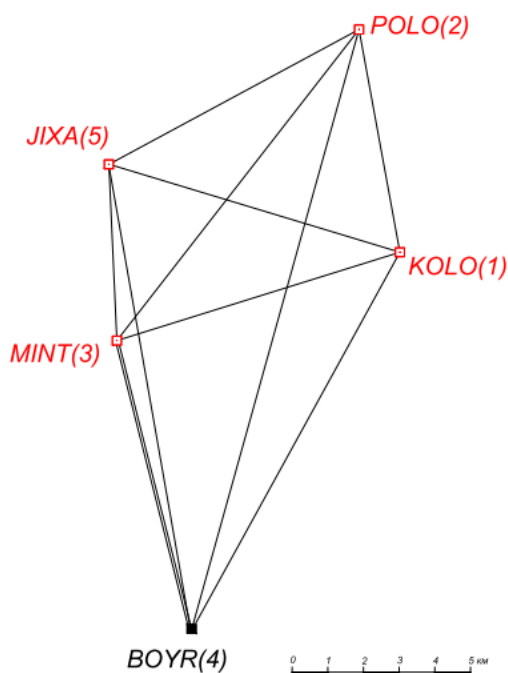


Рисунок 11- Схема третьей расстановки в серии измерений (красным показаны пункты, заложенные в 2015 г.).

Сторона *BOYR-DEDY* (обозначена двойной линией) является связующей между первой и второй расстановками, сторона *BOYR-MINT* – связующей между второй и третьей, пункт *BOYR* – связующий во всех расстановках в серии. Исходя из максимальной длины стороны сети (около

30 км), длительность сеанса измерений в расстановке, необходимая для достижения требуемой точности, установлена в 6 часов.

Для единообразного выполнения серий ГНСС-измерений приемники в одноименных сериях устанавливались на одних и тех же точках. На каждой схеме расстановок в скобках на пункте обозначен номер приемника. Приемникам R7 с антенной Zephyr Geodetic Model-2 присвоены номера 1,2,4,5, приемнику R8 Internal Model-2 – номер 3.

По результатам измерений и их обработки предполагается оценивать смещения пунктов как по линиям, пересекающим разломы (*DEDY-BOYR*, *SEME-MEJN*, *DEDY-PUSH*, *DEDY-SHAR*, *POLO-KOLO*, *JIXA-MINT*, *PUSH-KOLO*), так и в рамках объекта в целом от эпохи к эпохе. С целью контроля смещения пунктов в рамках объекта от эпохи к эпохе - установить систему плоских прямоугольных координат Меркатора.

4 Производство полевых геодезических работ

4.1 Производство полевых геодезических работ в 2014 году

В 2014 году выполнены работы по рекогносцировке мест расположения 4-ех пунктов ГДП (*DEDY*, *BOYR*, *SEME*, *MEJN*), закладке центров и производству геодезических измерений на них, а также на пункте KOZG (рисунок 12), входящем в состав Полоцкого геодинамического микрополигона.

В июне, в ходе рекогносцировки выбраны места закладки по критериям наличия открытого горизонта точки и отсутствия линий ЛЭП ближе 50 метров от нее.

В этом же месяце на выбранных в ходе рекогносцировки местах заложены центры четырех пунктов. Схема центра и его вид на местности приведены на рисунках 7-8. В отличие от центров, заложенных ранее на Полоцком геодинамическом микрополигоне (рисунок 12 - пункт KOZG),

данный центр имеет подъем над уровнем грунта и устройство для принудительного центрирования, позволяющее единообразно устанавливать антенну в любой расстановке и в любую эпоху наблюдений.

После закладки центрам пунктам *DEDY*, *BOYR*, *SEME*, *MEJN* даны названия согласно классификации IGS по ближайшим к ним населенным пунктам: *DEDY* – Дедуны; *BOYR* – Бояры; *SEME* –Семенец; *MEJN*– Межно.



Рисунок 12 – Пункт KOZG, заложенный ранее на Полоцком геодинамическом микрополигоне.

На указанных вновь заложенных пунктах в 2014 году произведены ГНСС-наблюдения спустя 3 месяца после закладки по схеме первой расстановки (рисунок 9), которая включила также пункт Полоцкого микрополигона *KOZG* (Козьи Горки нов.). В соответствии с принятой методикой выполнено две серии измерений 6-часовыми сеансами в каждой серии. Интервал между сериями составил четверо суток.

4.2 Производство полевых геодезических работ в 2015 и 2017 годах

В 2015 году полевые геодезические работы включили следующие процессы:

- рекогносцировка мест расположения и закладка центров оставшихся 6 пунктов ГДП Полоцкая ГЭС: *POLO, KOLO, JIXA, MINT, PUSH, SHAR* (рисунок 3).

- производство высокоточных спутниковых наблюдений на всех пунктах сети (рисунок 6) по схемам 3-ех расстановок, указанных на рисунках 9-11.

В 2017 г. полевые геодезические работы полностью повторили работы 2015 г. по производству высокоточных спутниковых наблюдений на всех пунктах сети по схемам 3-ех расстановок.

Полевые наблюдения в 2015 г. были выполнены как и в предыдущем цикле 2014 г. в период с 10 сентября по 20 сентября (рисунок 13). ГНСС-измерения в 2017 г. выполнены в период с 28 июня по 7 июля.



Рисунок 13 –Выполнение ГНСС наблюдений на пункте MINT (Минтурово) ГДП «Полоцкая ГЭС» в 2017 г.

5 Математическая обработка результатов ГНСС-измерений

Методика математической обработки результатов ГНСС-измерений в 2014г., 2015г. и 2017г. на ГДП «Полоцкая ГЭС» принята одинаковой с использованием программного обеспечения Trimble Business Center. Уравнивание ГНСС-сети во всех циклах выполнено параметрическим способом без предварительного фиксирования исходных дат. Подобная процедура уравнивания приводит к использованию системы "внутренних координат" и подробно описана в [8]. Так, стандартная процедура уравнивания приводит в этом случае к вырожденной матрице нормальных уравнений и задача решается путем нахождения псевдообратной матрицы, т.е. вводится дополнительное условие, накладываемое на искомые поправки принятых начальных значений координат пунктов сети.

В качестве пункта сети с начальными координатами для уравнивания без фиксирования исходных дат использован пункт *BOYR* ($B=55^{\circ}27'18,26800''$; $L=28^{\circ}56'17,86700''$; $H=158,0000$ - в системе WGS84), расположенный в непосредственной близости от центра тяжести ГНСС-сети.

Для обеспечения контролей результатов измерений и обработки уравнивание в каждую эпоху измерений выполнялось трижды: каждая серия отдельно, а затем обе серии совместно. По результатам отдельной обработки получены среднее, затем сравнивались значения наклонных дальностей и превышений между двумя сериями наблюдений, и выполнялась оценка точности по известной формуле разностей двойных измерений.

$$m = \sqrt{\frac{\sum (d^2)}{2n}}, \quad (1)$$

где, m - средняя квадратическая погрешность измерения; d - разность между сериями оцениваемой величины, полученной из уравнивания каждой серии измерений в эпоху; n - число разностей (линий или превышений).

Средние из двух серий значения наклонных дальностей и превышений сравнивались также со значениями одноименных величин, полученных из

совместного уравнивания. Параметры деформаций земной поверхности между эпохами вычислялись по результатам совместного решения двух серий в каждой эпохе.

Результаты математической обработки ГНСС-наблюдений для эпохи 2014 г. представлены в таблицах 1-2, для эпохи 2015 г. – в таблицах 3-4, а для эпохи 2017 г. – в таблицах 5-6.

Таблица 1 – Разности наклонных дальностей и превышений, полученных из раздельного уравнивания каждой серии в 2014 г.

Названия линий	Разности уравненных значений наклонных дальностей (S) и превышений (h)	
	Разность ds 2-1(мм)	Разность dh 2-1(мм)
<i>BOYR - SEME</i>	-0,5	-9,7
<i>SEME - MEJN</i>	0,6	2,4
<i>MEJN - DEDY</i>	1,0	6,6
<i>DEDY - BOYR</i>	1,1	0,6
<i>BOYR - MEJN</i>	-0,6	-7,3
<i>DEDY - SEME</i>	1,2	-9,1
<i>KOZG - BOYR</i>	2,2	-7,5
<i>KOZG - SEME</i>	-0,2	-17,2
<i>KOZG - MEJN</i>	0,5	-14,8
<i>KOZG - DEDY</i>	2,7	-8,2
Оценка точности по формуле 1	$m_s=0,9$ мм	$m_h=6,7$ мм

Таблица 2 - Сравнение наклонных дальностей и превышений, полученных как среднее значение из двух серий и из совместного уравнивания двух серий в 2014 г.

Названия линий и превышений	Сравнение наклонных дальностей			Сравнение превышений		
	S _{CP} - S _{COBM} , мм	Совместное решение S _{COBM} , (м)	mS _{COBM} , мм	h _{CP} - h _{COBM} , мм	Совместное решение h _{COBM} , (м)	mh _{COBM} , мм
<i>BOYR - SEME</i>	-0,3	9748,9746	1.7	0.5	2,3221	7.9
<i>SEME - MEJN</i>	0,1	3926,8238	1.6	0.3	2,2458	6.4
<i>MEJN - DEDY</i>	-0,2	14255,2359	1.7	-0.5	-6,1591	8.2
<i>DEDY - BOYR</i>	0,1	4899,5704	1.2	-0.2	1,5911	6.6
<i>BOYR - MEJN</i>	-0,2	11851,0799	2.0	0.8	4,5679	8.4
<i>DEDY - SEME</i>	-0,1	13299,2160	1.5	0.3	3,9132	7.9
<i>KOZG - BOYR</i>	-0,1	18248,8308	2.3	-0.5	-6,2741	10.7

Продолжение таблицы 2

<i>KOZG - SEME</i>	0.0	22790,0641	2.4	0.0	-3,952	10.7
<i>KOZG - MEJN</i>	0.0	26582,9482	2.4	0.3	-1,7062	10.9
<i>KOZG - DEDY</i>	0.0	21606,1620	2.2	-0.3	-7,8652	10.7

Таблица 3 – Разности наклонных дальностей и превышений, полученных из раздельного уравнивания каждой серии в 2015 г.

Названия линий	Разности уравненных значений наклонных дальностей (S) и превышений (h)	
	Разность ds 2-1(мм)	Разность dh 2-1(мм)
<i>MEJN-SEME</i>	-0.8	-2.2
<i>DEDY-BOYR</i>	-1.8	0.8
<i>MINT-JIXA</i>	0.1	2.8
<i>PUSH-DEDY</i>	-2.5	-4
<i>PUSH-SHAR</i>	-3.7	5
<i>KOLO-POLO</i>	-3.3	-2.8
<i>KOLO-MINT</i>	-3.0	-5.2
<i>MINT-BOYR</i>	-2.8	-10.6
<i>JIXA-POLO</i>	-4.3	-0.4
<i>DEDY-SHAR</i>	-3.5	9
<i>KOLO-JIXA</i>	-3.6	-2.4
<i>SEME-BOYR</i>	-0.9	6.4
<i>DEDY-MINT</i>	-5.5	-9.8
<i>PUSH-BOYR</i>	-3.7	-3.2
<i>KOLO-BOYR</i>	-3.2	5.4
<i>MINT-POLO</i>	-3.9	2.4
<i>MEJN-BOYR</i>	-1.6	4.2
<i>BOYR-SHAR</i>	-5.5	8.2
<i>SEME-DEDY</i>	-0.9	5.6
<i>BOYR-JIXA</i>	-2.7	-7.8
<i>PUSH-MINT</i>	-6.8	-13.8
<i>MEJN-DEDY</i>	-0.7	3.4
<i>BOYR-POLO</i>	-5.8	-8.2
<i>SHAR-MINT</i>	-9.1	-18.8
<i>KOZG-BOYR</i>	5.9	15
<i>KOZG-DEDY</i>	2.7	14.2
<i>KOZG-SEME</i>	5.1	8.6
<i>KOZG-MEJN</i>	4.3	10.8
Оценка точности по формуле 1	$m_s = 2,9$ мм	$m_h = 6,0$ мм

Таблица 4 - Сравнение наклонных дальностей и превышений, полученных как среднее значение из двух серий и из совместного уравнивания двух серий в 2015 г.

Названия линий и превышений	Сравнение наклонных дальностей			Сравнение превышений		
	$S_{CP}-S_{COBM},$ мм	Совместное решение $S_{COBM},$ (м)	$mS_{COBM},$ мм	$h_{CP}-h_{COBM},$ мм	Совместное решение $h_{COBM},$ (м)	$mh_{COBM},$ мм
MEJN-SEME	0.2	3926.8256	1.4	0	-2.2428	6.1
DEDY-BOYR	0	4899.5727	0.8	-0.3	1.5946	4.4
MINT-JIXA	0.1	6223.3551	1.6	0.7	6.3205	7.6
PUSH-DEDY	0.3	6376.0021	1.1	-0.1	-2.4830	6.2
PUSH-SHAR	0.1	6727.2044	1.7	0.1	0.3103	7.0
KOLO-POLO	-0.1	7032.5721	1.7	0	2.9064	7.4
KOLO-MINT	0.2	7113.6574	1.2	-0.4	-3.7392	7.4
MINT-BOYR	0	7207.2740	1.2	1.4	-0.0608	5.2
JIXA-POLO	-0.2	7800.5894	1.4	-0.3	0.3251	7.8
DEDY-SHAR	0.2	7901.4747	1.4	0.2	2.7933	6.6
KOLO-JIXA	-0.1	8052.1715	1.3	0.3	2.5813	7.6
SEME-BOYR	-0.1	9748.9793	1.4	0	-2.3143	7.1
DEDY-MINT	0.1	10079.6532	1.3	-1.7	1.6554	5.9
PUSH-BOYR	0.3	11035.4075	1.1	-0.4	-0.8884	6.4
KOLO-BOYR	0.2	11541.0786	1.6	1	-3.8000	7.4
MINT-POLO	-0.1	11574.1716	1.6	0.4	6.6456	7.9
MEJN-BOYR	0	11851.0850	1.6	0	-4.5571	7.3
BOYR-SHAR	0.2	12359.5281	1.3	0.5	1.1987	6.7
SEME-DEDY	-0.3	13299.2209	1.3	0.3	-3.9089	7.3
BOYR-JIXA	0.1	13429.7307	1.7	-0.7	6.3813	7.7
PUSH-MINT	0.3	13971.1415	1.4	-1.8	-0.8276	7.0
MEJN-DEDY	-0.2	14255.2408	1.4	0.3	-6.1517	7.4
BOYR-POLO	0.1	17827.9311	1.8	-1.0	6.7064	7.9
SHAR-MINT	0.2	17903.8882	1.6	-1.9	-1.1379	7.3
KOZG-BOYR	0	18248.8295	2.0	-0.3	-6.2569	10.2
KOZG-DEDY	0.1	21606.1589	1.9	0	-7.8515	10.3
KOZG-SEME	0.1	22790.0597	2.1	-0.3	-3.9426	10.5
KOZG-MEJN	0.2	26582.9384	2.2	-0.3	-1.6998	10.6

Таблица 5 – Разности наклонных дальностей и превышений, полученных из раздельного уравнивания каждой серии в 2017 г.

Названия линий	Разности уравненных значений наклонных дальностей (S) и превышений (h)	
	Разность ds 2-1(мм)	Разность dh 2-1(мм)
<i>MEJN-SEME</i>	-2.4	-3
<i>DEDY-BOYR</i>	-0.6	4.7
<i>MINT-JIXA</i>	1.2	11
<i>PUSH-DEDY</i>	0.7	-2.3
<i>PUSH-SHAR</i>	-1.2	-0.2
<i>KOLO-POLO</i>	-0.4	-8.1
<i>KOLO-MINT</i>	1.0	-11.6
<i>MINT-BOYR</i>	-0.7	11.6
<i>JIXA-POLO</i>	-1.6	-7.5
<i>DEDY-SHAR</i>	-1.7	2.1
<i>KOLO-JIXA</i>	3.4	-0.6
<i>SEME-BOYR</i>	-0.1	1.4
<i>DEDY-MINT</i>	-0.8	-6.9
<i>PUSH-BOYR</i>	0.1	2.4
<i>KOLO-BOYR</i>	-1.4	0
<i>MINT-POLO</i>	-2.3	3.5
<i>MEJN-BOYR</i>	-1.7	-1.6
<i>BOYR-SHAR</i>	-2.1	-2.6
<i>SEME-DEDY</i>	-0.8	-3.3
<i>BOYR-JIXA</i>	0.4	-0.6
<i>PUSH-MINT</i>	0.0	-9.2
<i>MEJN-DEDY</i>	-1.7	-6.3
<i>BOYR-POLO</i>	-3.2	-8.1
<i>SHAR-MINT</i>	-2.4	-9
<i>KOZG-BOYR</i>	4.5	12.6
<i>KOZG-DEDY</i>	2.1	10.7
<i>KOZG-SEME</i>	4.8	6.9
<i>KOZG-MEJN</i>	3.9	8.7
Оценка точности по формуле 1	$m_s = 2,2$ мм	$m_h = 4,9$ мм

Таблица 6 - Сравнение наклонных дальностей и превышений, полученных как среднее значение из двух серий и из совместного уравнивания двух серий в 2017 г.

Названия линий и превышений	Сравнение наклонных дальностей			Сравнение превышений		
	$S_{CP}-S_{COBM}$, мм	Совместное решение S_{COBM} , (м)	mS_{COBM} , мм	$h_{CP}-h_{COBM}$, мм	Совместное решение h_{COBM} , (м)	mh_{COBM} , мм
MEJN-SEME	0.1	3926.8249	1.2	-0.1	-2.2362	4.9
DEDY-BOYR	0.1	4899.5742	0.6	-0.4	1.5911	3.6
MINT-JIXA	0	6223.3513	1.3	0.5	6.3113	6.2
PUSH-DEDY	0	6376.0064	0.9	0.1	-2.4915	5.1
PUSH-SHAR	0	6727.2093	1.4	0	0.3031	5.6
KOLO-POLO	0.2	7032.5737	1.5	0.5	2.9100	6.0
KOLO-MINT	0.3	7113.6566	1.1	-1.1	-3.7343	6.5
MINT-BOYR	0.3	7207.2780	1.1	-0.7	-0.0621	5.0
JIXA-POLO	0.3	7800.5924	1.2	1.1	0.3330	6.4
DEDY-SHAR	-0.2	7901.4775	1.1	-0.1	2.7946	5.4
KOLO-JIXA	0.1	8052.1717	1.0	-0.6	2.5770	6.1
SEME-BOYR	0.2	9748.9761	1.1	-0.1	-2.3246	5.8
DEDY-MINT	0.4	10079.6567	1.1	0.2	1.6532	5.5
PUSH-BOYR	0.1	11035.4130	0.9	-0.4	-0.9004	5.3
KOLO-BOYR	0.2	11541.0817	1.4	-1.8	-3.7964	6.3
MINT-POLO	0.5	11574.1714	1.5	1.7	6.6443	7.1
MEJN-BOYR	0.2	11851.0816	1.3	-0.2	-4.5608	5.9
BOYR-SHAR	-0.1	12359.5320	1.1	0.4	1.2035	5.5
SEME-DEDY	0.2	13299.2194	1.0	0.3	-3.9157	5.9
BOYR-JIXA	0.3	13429.7308	1.4	1.2	6.3734	6.3
PUSH-MINT	0.1	13971.1460	1.1	0.3	-0.8383	6.3
MEJN-DEDY	0.1	14255.2391	1.2	0.2	-6.1519	6.0
BOYR-POLO	0.5	17827.9356	1.6	2.3	6.7064	7.0
SHAR-MINT	0.2	17903.8943	1.3	0.3	-1.1414	6.5
KOZG-BOYR	-2	18248.8282	2.2	-5.9	-6.2591	10.9
KOZG-DEDY	-1	21606.1581	2.1	-6.9	-7.8502	11.0
KOZG-SEME	-1.9	22790.0568	2.3	-3.7	-3.9345	11.1
KOZG-MEJN	-2.6	26582.9349	2.4	-3.0	-1.6983	11.1

6 Характеристики деформаций земной коры в Полоцком регионе по результатам инструментальных исследований и их интерпретация

6.1 Характеристики горизонтальных деформаций земной поверхности на геодинамическом полигоне «Полоцкая ГЭС»

Характеристики горизонтальных деформаций земной поверхности на исследуемой территории представлены разностями наклонных дальностей между эпохами наблюдений 2015г. – 2014г., 2017г. - 2015г., 2017г. - 2014г. (таблица 7).

Таблица 7 – Разности наклонных дальностей между эпохами 2015г. – 2014г., 2017г. - 2015г., 2017г. - 2014г. на ГДП «Полоцкая ГЭС».

Название линии		Разность $d=(S_{15}-S_{14})$, мм	m_{d15-14} , мм	Разность $d=(S_{17}-S_{15})$, мм	m_{d17-15} , мм	Разность $d=(S_{17}-S_{14})$, мм	m_{d17-14} , мм
от	до						
MEJN	SEME	1,8	2,1	-0,7	1,8	1.1	2,0
DEDY	BOYR	2,3	1,4	1,5	1,0	3.8	1,3
MINT	JIXA	-	-	-3,8	2,1	-	-
PUSH	DEDY	-	-	4,3	1,4	-	-
PUSH	SHAR	-	-	4,9	2,2	-	-
KOLO	POLO	-	-	1,6	2,3	-	-
KOLO	MINT	-	-	-0,8	1,6	-	-
MINT	BOYR	-	-	4,0	1,6	-	-
JIXA	POLO	-	-	3,0	1,8	-	-
DEDY	SHAR	-	-	2,8	1,8	-	-
KOLO	JIXA	-	-	0,2	1,6	-	-
SEME	BOYR	4,7	2,2	-3,2	1,8	1.5	2,0
DEDY	MINT	-	-	3,5	1,7	-	-
PUSH	BOYR	-	-	5,5	1,4	-	-
KOLO	BOYR	-	-	3,1	2,3	-	-
MINT	POLO	-	-	-0,2	2,2	-	-
MEJN	BOYR	5,1	2,3	-3,4	2,1	1.7	2,4
BOYR	SHAR	-	-	3,9	1,7	-	-
SEME	DEDY	4,9	2,0	-1,5	1,6	3.4	1,8
BOYR	JIXA	-	-	0,1	2,2	-	-

Продолжение таблицы 7

PUSH	MINT	-	-	4,5	1,8	-	-
MEJN	DEDY	4,9	2,2	-1,7	1,8	3.2	2,1
BOYR	POLO	-	-	4,5	2,4	-	-
SHAR	MINT	-	-	6,1	2,1	-	-
KOZG	BOYR	-1,3	3,0	-1,3	3,0	-2.6	3,2
KOZG	DEDY	-3,1	3,4	-0,8	2,8	-3.9	3,0
KOZG	SEME	-4,4	3,2	-2,9	3,1	-7.3	3,3
KOZG	MEJN	-9,8	3,2	-3,5	3,3	-13.3	3,4

В таблице 7 точность определения разностей наклонных дальностей между эпохами измерений получена по формуле (2) на основании оценки точности векторов ГНСС-сети, представленной после уравнивания в программном обеспечении TrimbleBusinessCenter.

$$m_d = \sqrt{m_{S2014}^2 + m_{S2015}^2} \quad (2)$$

В формуле (2) m_s - средняя квадратическая ошибка (СКО) наклонной дальности (вектора) для оцениваемой эпохи; m_d - СКО определения разности наклонной дальности между эпохами.

На основании данных таблицы 7 построена схема разностей наклонных дальностей между эпохами 2014-2015гг., 2015-2017гг., 2014-2017гг. на ГДП Полоцкая ГЭС (рисунок 14).

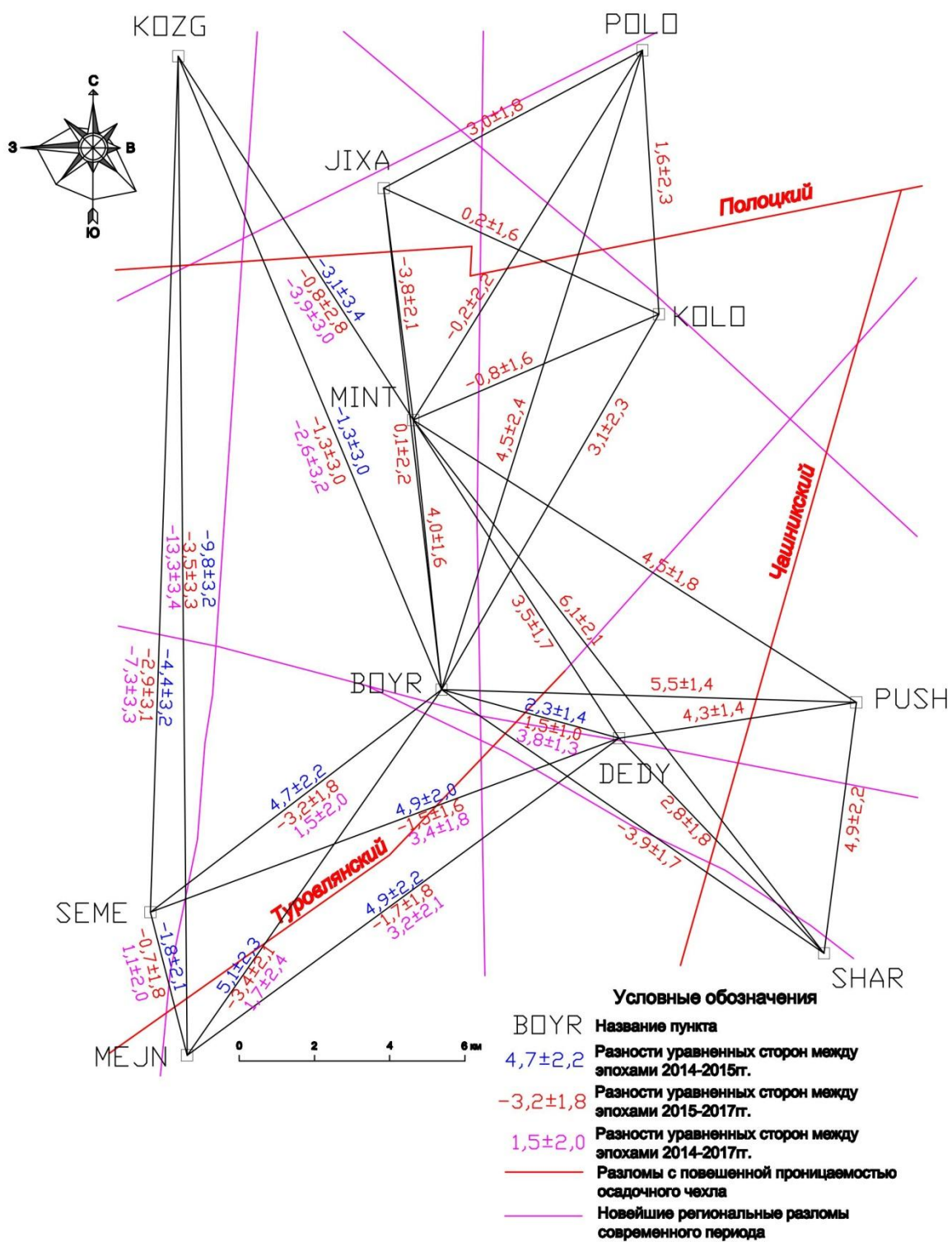


Рисунок – 14 Схема разностей наклонных дальностей между эпохами 2014-2015гг., 2015-2017гг., 2014-2017гг. на ГДП Полоцкая ГЭС.

6.2 Применение теории деформации при анализе результатов геодезических исследований СДЗК на геодинамическом полигоне «Полоцкая ГЭС»

Представленная методика определения двумерных деформаций земной коры по геодезическим данным основана на теории упругости и использует методы дифференциального описания деформации сплошной среды, которые позволяют получить не зависящие от системы отсчета характеристики деформаций.

Методика основана на предположении о существовании непрерывно меняющегося во времени поля деформаций земной коры, согласно которому каждой точке земной поверхности ставится в соответствие относящийся к определенному моменту времени тензор деформаций, получаемый по геодезическим данным о современных движениях.

Определение степени деформированности участков земной коры ГДП «Полоцкая ГЭС» выполнено на основании получения компонентов деформации в виде Q-дилатации (относительного изменения площади треугольника сети), E_1, E_2 - максимального и минимального растяжений, $\varphi_{E_1}, \varphi_{E_2}$ -направлений максимального и минимального растяжений, γ_m - максимального сдвига.

Определение представленных инвариантных характеристик СДЗК выполнено согласно методике Н.П.Есикова по разностям уравненных координат (формулы 3,4), теоретической базой которой служит принцип Коши-Гельмгольца о суперпозиции трех видов деформационного движения: сдвиг и вращение земной поверхности как абсолютно твердого тела, а также чистая деформация участка земной коры [3,9,10].

Для аппроксимации изучаемой территории использован метод конечных элементов, являющийся систематическим способом аппроксимации непрерывной функции дискретной моделью, которая представляет собой множество значений функции в некотором конечном числе точек области ее

определения в совокупности с кусочным представлением этой функции на конечном числе подобластей [9]. В качестве подобных областей для определения компонентов деформации использован симплекс в двумерном пространстве с тремя узлами.

Особенностью представленного метода конечных элементов является то, что при локальной аппроксимации функции на конечных элементах их можно рассматривать совершенно изолированными от остальной их совокупности и аппроксимацию функции выполнять с помощью ее значений в узлах [8].

Конечноэлементная модель искомой функции для циклов 2015г. и 2017г. представлена в виде треугольников геодезической сети согласно правила построения аппроксимационных моделей [3,9] (рисунок 15).

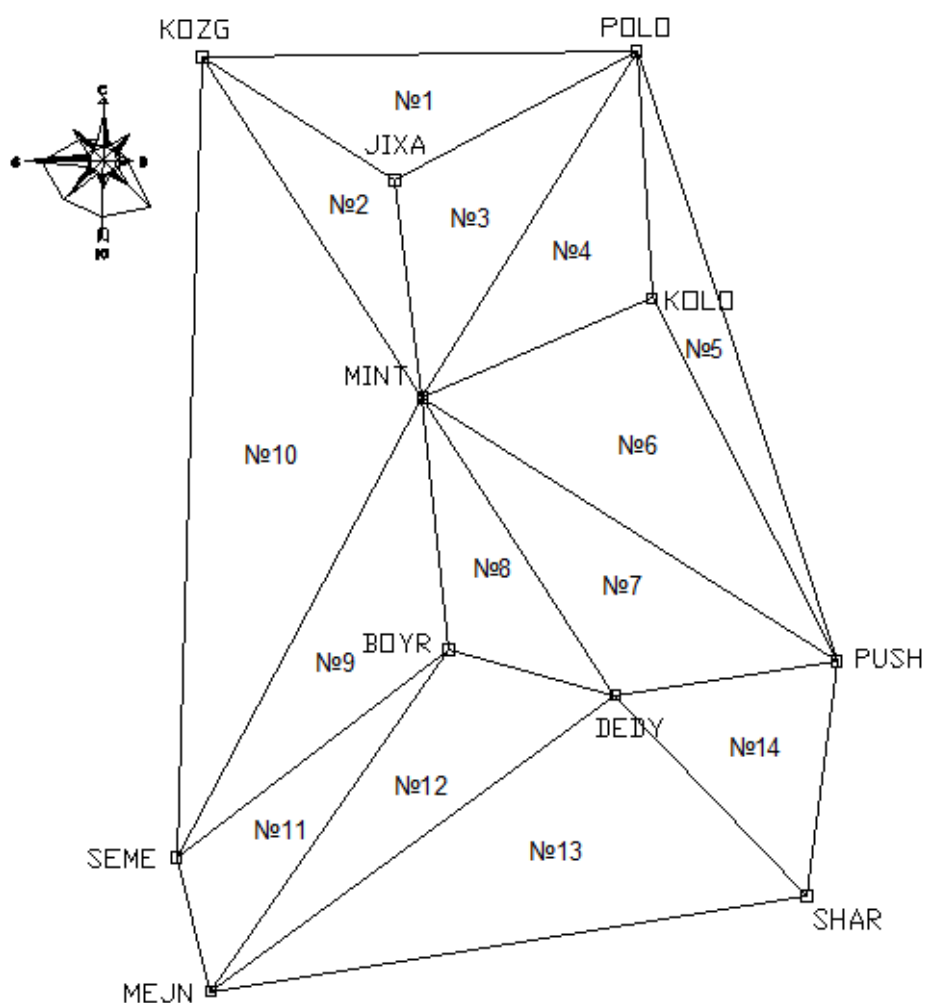
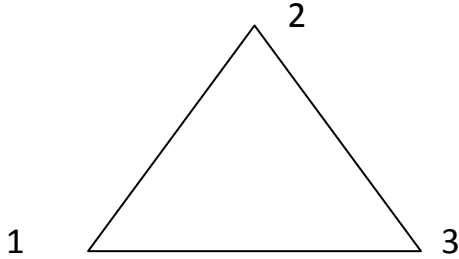


Рисунок 15 – Схема конечноэлементной модели геодезической сети ГДП «Полоцкая ГЭС».

Для определения компонентов деформации для каждого отдельного треугольника ГНСС-сети на рисунке 15 были составлены системы из шести линейных уравнений



$$\begin{cases} \Delta X_1 = X_1 e_{11} + Y_1 e_{12} + a \\ \Delta Y_1 = X_1 e_{21} + Y_1 e_{22} + b \\ \Delta X_2 = X_2 e_{11} + Y_2 e_{12} + a \\ \Delta Y_2 = X_2 e_{21} + Y_2 e_{22} + b \\ \Delta X_3 = X_3 e_{11} + Y_3 e_{12} + a \\ \Delta Y_3 = X_3 e_{21} + Y_3 e_{22} + b \end{cases} \quad (3)$$

где a, b – величины поступательного перемещения по осям X, Y.

На основании использования теории малых деформаций, метода конечных элементов и модели локально-однородного деформирования, полученной по данным о современных горизонтальных движениях земной коры задавалось тензорное поле второй валентности (4), анализ которого позволил выявить пространственную структуру деформаций земной поверхности.

$$|T_{ij}| = \begin{vmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где e_{ij} – компоненты тензора, относящиеся к центру треугольника

Используя различные сочетания компонентов тензора деформаций были определены компоненты деформации по формулам [3,9,10]

$$Q = \frac{e_{11} + e_{22}}{2}, \quad (5)$$

$$E1 = Q + \frac{1}{2} \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{12} + e_{21})^2} \quad (6)$$

$$E2 = Q - \frac{1}{2} \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{12} + e_{21})^2} \quad (7)$$

$$\gamma_m = E1 - E2 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}, \quad (8)$$

где γ_m – максимальный сдвиг;

$\gamma_1 = (e_{11} - e_{22})$ и $\gamma_2 = (e_{12} + e_{21})$ – компоненты сдвига.

С использованием компонентов сдвига вычислены направления главных осей деформаций $\varphi_{E1}, \varphi_{E2}$

$$\varphi_{E1,E2} = \frac{1}{2} \arctg \left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right) + A^0 \quad (9)$$

Для введения критерия значимости компонентов деформации выполнена их оценка точности (формулы 10-13). На основании положения о том, что компоненты деформации представляют собой функции начальных и повторных значений координат пунктов, в общем виде можно записать [3,9,10]:

$$m_{КД}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial(КД)}{\partial x_i} \right)^2 \cdot m_{x_i}^2, \quad (10)$$

где КД – компонент деформации;

$m_{КД}$ – ошибка определения компонента деформации;

m_{x_i} – средняя квадратическая ошибка определения аргументов.

Ошибка дилатации Q , имеющей смысл отношения приращения площади треугольника в результате перемещения его вершин к его первоначальной площади до деформации определялась по следующей формуле [9,10]:

$$m_Q^2 = \frac{1}{S_H^2} \cdot m_{SA}^2 + \frac{S_A^2}{S_H^4} \cdot m_{S_H}^2 \quad (11)$$

где S_A – актуальная площадь треугольника в данный момент времени;

S_H - площадь треугольника в начальный момент;

m_S – средняя квадратическая ошибка площади треугольника.

Средняя квадратическая ошибка площади треугольника получена на основании оценки точности координат вершин треугольника по формуле [11]:

$$m_P^2 = \frac{1}{2} \sum_{K=1}^{n-1} \left\{ \sum_{i=K}^{n-1} [(\Delta y_i + \Delta y_{i+1}) m_{\Delta x_k}^2] \right\} + \sum_{K=1}^n \left[(\sum_{i=K}^K \Delta x_i - \frac{\Delta x_K}{2}) m_{\Delta y_k}^2 \right] \quad (12)$$

Исходя из того, что компоненты тензора деформаций (4) определяются из системы уравнений (3) с одинаковой точностью и $Q=e_{11}+e_{22}$, $\gamma_1=e_{11}-e_{22}$, $\gamma_2=e_{12}+e_{21}$, можем записать

$$m_{\gamma_1} = m_{\gamma_2} = m_Q \quad (13)$$

Тогда используя формулы (10) и (11) [9]

$$m_{\gamma_m}^2 = \gamma_1^2(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)^{-1} \cdot m_{\gamma_1}^2 + \gamma_2^2(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)^{-1} \cdot m_{\gamma_2}^2 \quad (14)$$

Поскольку $E1 = \frac{1}{2}(Q + \gamma_m)$, $E2 = \frac{1}{2}(Q - \gamma_m)$, то очевидно

$$m_{E1} = m_{E2} = 0,7m_Q \quad (15)$$

Результаты расчета компонентов деформации и их характеристика точности представлены в таблицах 8-9. Пространственное распределение компонентов деформации дано на рисунках 16-18.

Таблица 8 - Значение компонентов деформации Q , γ_1 , γ_2 , γ_m и их характеристика точности для треугольников конечноэлементной модели геодезической сети ГДП «Полоцкая ГЭС».

№	Треугольник	Дилатация		Максимальный сдвиг			
		Q *10 ⁻⁷	mQ *10 ⁻⁷	γ_1 *10 ⁻⁷	γ_2 *10 ⁻⁷	γ_m *10 ⁻⁷	m γ_m *10 ⁻⁷
1	KOZG-POLO-JIXA	7.00	7.59	16.07	2.89	16.32	7.59
2	KOZG-JIXA-MINT	-6.77	7.28	-0.05	-6.65	6.67	7.28
3	MINT- JIXA-POLO	-1.32	4.79	-0.84	6.50	10.60	4.79
4	MINT-POLO-KOLO	0.73	4.90	2.42	-3.45	4.21	4.90
5	POLO-KOLO-PUSH	5.88	9.85	-6.92	4.87	8.47	9.85
6	POLO-KOLO-MINT	0.10	3.62	-1.95	-5.82	6.14	3.62
7	MINT-PUSH-DEDY	6.35	3.84	1.60	6.32	6.52	3.84
8	MINT-DEDY-BOYR	5.32	3.56	1.70	4.11	4.45	3.56
9	MINT-BOYR-SEME	0.63	3.12	9.29	-5.35	10.72	3.12
10	KOZG-MINT-SEME	-1.23	2.77	-0.37	5.60	5.61	2.77
11	BOYR-SEME-MEJN	-2.60	6.93	0.90	-0.93	1.29	6.93
12	MEJN-BOYR-DEDY	0.13	3.60	-5.28	-4.46	6.91	3.60
13	MEJN-DEDY-SHAR	0.91	3.03	-0.74	-4.67	4.73	3.03
14	DEDY-SHAR-PUSH	6.07	4.24	0.81	5.73	5.78	4.24

Таблица 9 - Значение компонентов деформации E_1 , E_2 , φ_{E1} , φ_{E2} и их характеристика точности для треугольников конечноэлементной модели геодезической сети ГДП «Полоцкая ГЭС».

№	Треугольник	Растяжение			Направления растяжения		
		E_1 * 10^{-7}	E_2 * 10^{-7}	$mE_{1,2}$ * 10^{-7}	$\varphi_{E1}, ^\circ$	$\varphi_{E2}, ^\circ$	$m\varphi_{E1,2}^\circ$
1	KOZG-POLO-JIXA	15.16	-1.16	5.31	84.9	174.9	0.2
2	KOZG-JIXA-MINT	-3.44	-10.11	5.09	47.2	137.2	0.5
3	MINT- JIXA-POLO	3.98	-6.62	3.35	108.9	198.9	0.2
4	MINT-POLO-KOLO	2.84	-1.37	3.43	117.5	207.5	0.6
5	POLO-KOLO-PUSH	10.12	1.65	6.90	17.5	107.5	0.6
6	POLO-KOLO-MINT	3.17	-2.97	2.53	-35.7	54.3	0.3
7	MINT-PUSH-DEDY	9.62	3.09	2.69	52.1	142.1	0.3
8	MINT-DEDY-BOYR	7.55	3.10	2.49	56.2	146.2	0.4
9	MINT-BOYR-SEME	5.99	-4.73	2.18	104.9	194.9	0.1
10	KOZG-MINT-SEME	1.58	-4.03	1.94	43.1	133.1	0.2
11	BOYR-SEME-MEJN	-1.95	-3.24	4.85	22.9	112.9	2.7
12	MEJN-BOYR-DEDY	3.59	-3.32	2.52	-20.1	69.9	0.3
13	MEJN-DEDY-SHAR	3.27	-1.45	2.12	-40.5	49.5	0.3
14	DEDY-SHAR-PUSH	8.96	3.17	2.97	49.0	139.0	0.4

Пространственное распределение векторов смещений пунктов ГНСС-сети за период 2015-2017гг. представлено на рисунке 18. Оценка точности векторов смещений в виде элементов эллипсов погрешностей (формулы 16-18) получена на основании ковариационной матрицы ошибок разностей координат по следующим формулам [12]:

$$A^2 = \frac{\mu^2}{2} (Q_{11} + Q_{22} + \frac{2Q_{12}}{\sin 2\Theta}) \tag{16}$$

$$B^2 = \frac{\mu^2}{2} (Q_{11} + Q_{22} - \frac{2Q_{12}}{\sin 2\Theta}) \tag{17}$$

$$\sin 2\Theta = \frac{2Q_{12}}{\sqrt{(Q_{11} - Q_{22})^2 + 4Q_{12}^2}} \tag{18}$$

Где A и B - большая и малая полуоси эллипса погрешностей разностей координат соответственно;

Θ - дирекционный угол большой полуоси эллипса погрешностей разностей координат;

μ – средняя квадратическая ошибка единицы веса;

Q_{ij} – элемент ковариационной матрицы.

В работах [13,14,15] показано, что физическая корреляция спутниковых наблюдений уменьшается с увеличением промежутка времени между эпохами измерений. Таким образом ковариационная матрица ошибок разностей координат будет являться суммой ковариационных матриц ошибок координат двух циклов независимых спутниковых измерений (2015г. и 2017г.).

Элементы ковариационных матриц ошибок координат каждого цикла спутниковых измерений получены на основании оценки точности плоских координат и элементов эллипсов ошибок пунктов, предоставляемых после уравнивания в программном обеспечении Trimble Business Center по формулам [16]:

$$Q_{11} = \frac{1}{2\mu^2}(A^2 + B^2 + W) \tag{19}$$

$$Q_{22} = \frac{1}{2\mu^2}(A^2 + B^2 - W) \tag{20}$$

$$Q_{12} = \frac{\sin 2\Theta}{2\mu^2}(A^2 - B^2) \tag{21}$$

$$W = (A^2 - B^2)\cos 2\Theta \tag{22}$$

где μ выражается на основании оценки точности координат [16, 20]:

$$m_{\Delta X} = \mu\sqrt{Q_{11}} \quad m_{\Delta Y} = \mu\sqrt{Q_{22}} \tag{23}$$

Значения векторов смещений пунктов ГНСС-сети за период 2015-2017гг. и их оценка точности в виде компонентов эллипса погрешностей представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Значения векторов смещений пунктов сети ГДП «Полоцкая ГЭС» за период 2015-2017 гг. и их оценка точности.

Пункт	Вектор смещения R, мм	СКП вектора смещения m _R , мм	Большая полуось A, мм	Малая полуось B, мм	Дирекционный угол α, °
DEDY	2.7	1.4	1.2	0.8	2.43
BOYR	1.5	1.2	1.0	0.7	2.31
SEME	4.5	2.2	1.8	1.3	3.7
MEJN	4.9	2.3	1.9	1.3	2.25
KOLO	4.5	2.3	1.9	1.3	3.67
POLO	5.8	2.5	2.1	1.4	2.42
JIXA	1.6	2.3	1.9	1.3	3.18
MINT	6.0	1.6	1.3	0.9	2.28
PUSH	7.3	2.1	1.7	1.2	1.6
SHAR	4.0	2.2	1.8	1.3	1.39
KOZG	2.6	3.4	2.8	1.9	1.53

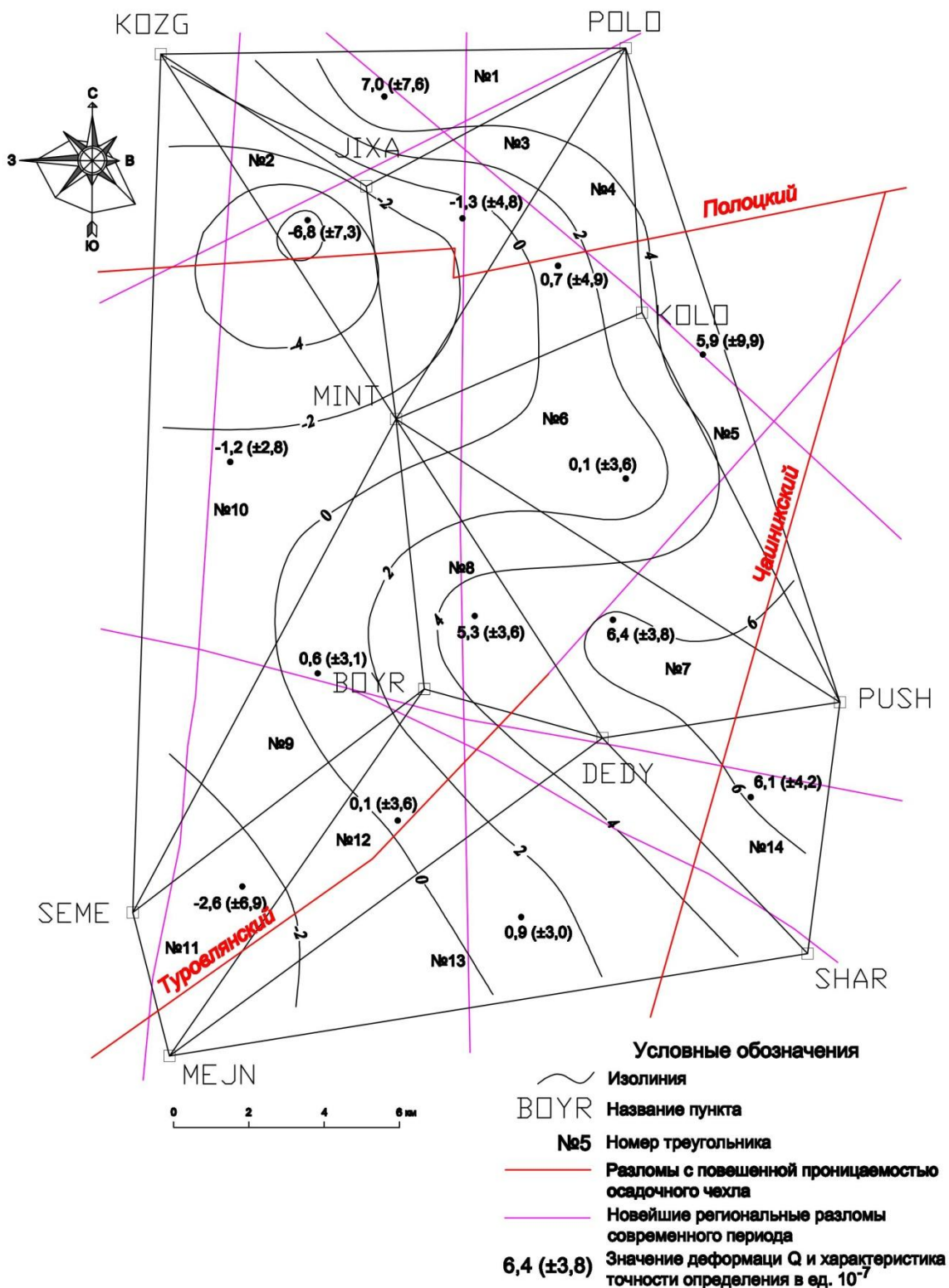


Рисунок 16 - Схема распределения дилатации Q на ГДП «Полоцкая ГЭС» за период 2015-2017 гг.

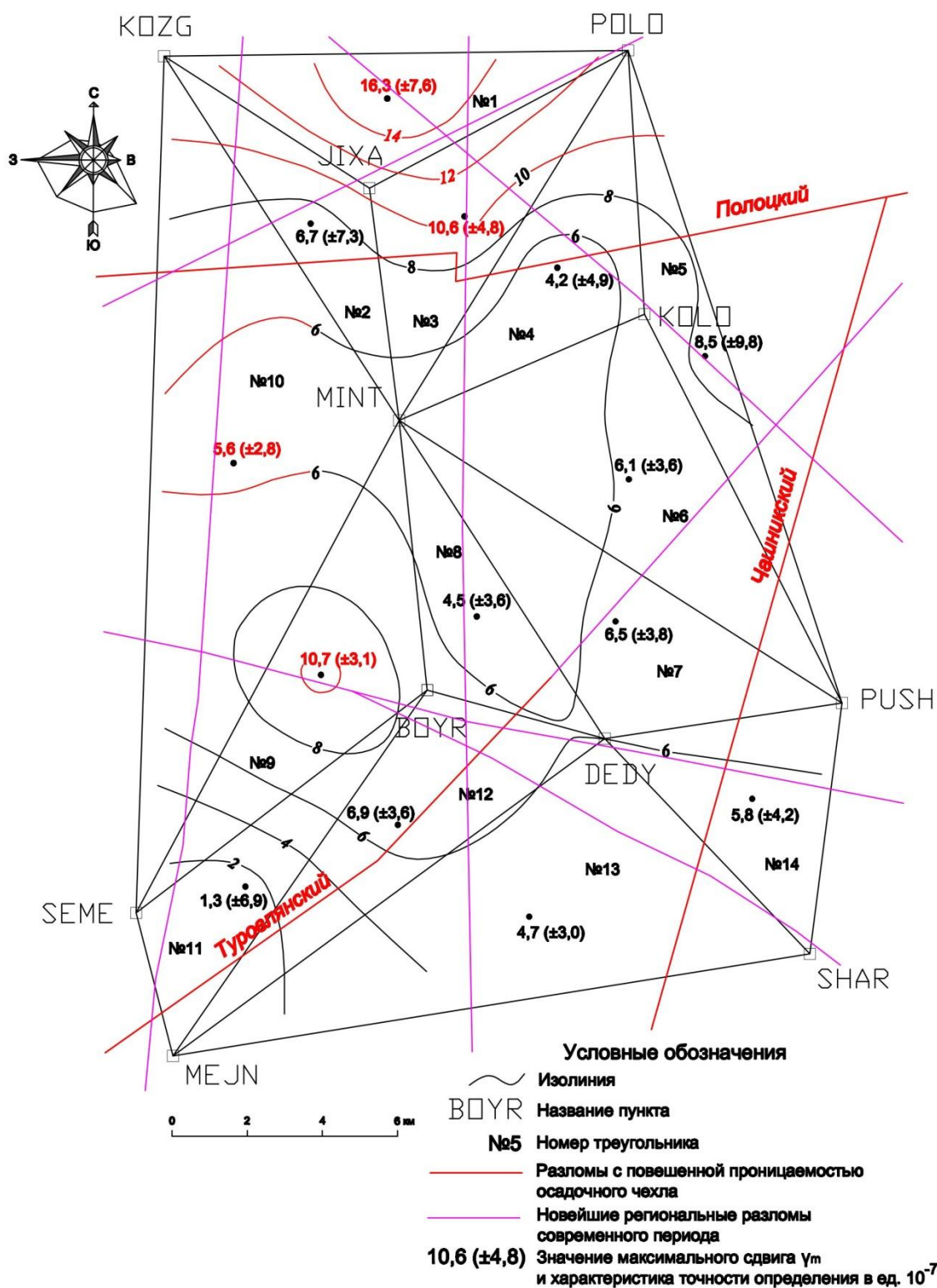


Рисунок 17 - Схема распределения максимального сдвига γ_m на ГДП «Полоцкая ГЭС» за период 2015-2017 гг. (новейшие региональные разломы по А.А Святогорову).

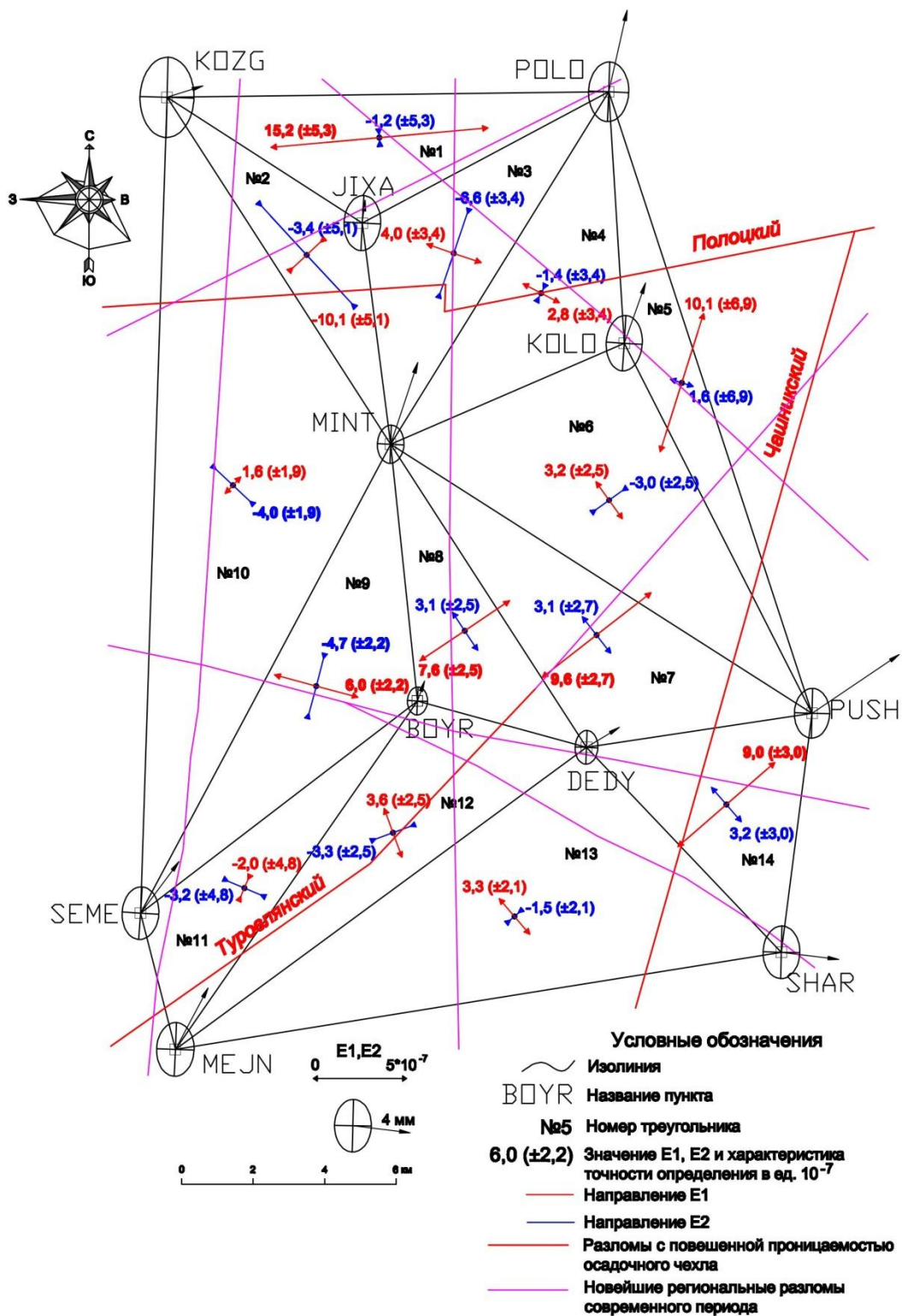


Рисунок 18 - Схема распределения максимального и минимального растяжений E1, E2 на ГДП «Полоцкая ГЭС» за период 2015-2017 гг.

6.3 Интерпретация полученных результатов

Интерпретация результатов исследований выполнена на основании картосхем деформаций, представленных на рис. (16-18). За критерий значимости принималась вероятность 0.95, когда оцениваемая величина \geq двойной ошибки ее определения.

Схема разностей наклонных дальностей (рис. 14) свидетельствует, что в первый период (2014-15г.) значимые растягивающие деформации наблюдаются в районе Туровлянского разлома по 3-м линиям, подтверждающим друг друга, которое в последующий период (2015-17г.) сменилось небольшим сжатием. Четыре линии, пересекающие Чашникский разлом, уверенно свидетельствуют о значимых деформациях растяжения около субширотного простирания в период (2015-17 г.). Полоцкий разлом по этой схеме никак не проявляет себя.

Схемы компонентов деформации даны только на 2-ой период, и они свидетельствуют, что значимых площадных изменений (дилатация, рис. 16) в 2015-17 г. не наблюдалось. Однако сдвиговые деформации (рис. 17), свидетельствующие о формоизменении конечного элемента (треугольника сети), в этот период больше проявляются в районе Полоцкого разлома.

Значимые растяжения, в основном, субширотного простирания (максимальное растяжение E1, рис. 18) наблюдаются на территориях всех исследуемых разломов.

Следует учесть, что Полоцкая ГЭС была введена в эксплуатацию в январе 2017 г., то есть ГНСС наблюдения 2017 г. проведены уже после введения ее в эксплуатацию. Можно констатировать, что существенных увеличений деформаций земной коры на Полоцком ГДП после начала эксплуатации станции не наблюдается, хотя значимые деформации есть, и они приурочены к разломам, в зоне влияния которых она находится.

Результаты интерпретации нуждаются еще в более детальном и глубоком осмыслении. Крайне желательно исследовать изменения

геофизических полей и уровня сейсмичности после введения ГЭС в эксплуатацию. Мы надеемся, что в ближайшее время у нас появится эта возможность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами выполненных работ в отчетный период является следующее:

1. Произведен 3-й цикл высокоточных ГНСС-наблюдений на геодинамическом полигоне «Полоцкая ГЭС». Выполнена строгая математическая обработка результатов повторных геодезических измерений. Определены характеристики горизонтальных деформаций земной поверхности на исследуемой территории в виде разностей наклонных дальностей и векторов смещений.

2. Применена теория деформации при анализе результатов геодезических исследований современных движений земной коры на геодинамическом полигоне «Полоцкая ГЭС». Определена степень деформированности участков земной коры на исследуемой территории на основании получения компонентов деформации в виде Q -дилатации, E_1, E_2 -максимального и минимального растяжений, $\varphi_{E_1}, \varphi_{E_2}$ -направлений максимального и минимального растяжений, γ_m -максимального сдвига.

3. Выполнена интерпретация результатов исследований на основании картосхем разностей наклонных дальностей между эпохами наблюдений, векторов смещений и компонентов деформации.

4. По результатам работ в отчетный период подготовлено к публикации 2 статьи, представлен 1 доклад на Международной конференции молодых ученых [17]. Результаты работ по гранту №1017 апробированы на кафедре «Высшей геодезии» Московского государственного университета геодезии и картографии МИИГАиК (г. Москва, Российская Федерация) и использованы при написании диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Г.А.Шароглазова, А.А.Святогоров, В.В.Ялтыхов, С.К.Товбас, К.И.Маркович, С.Г.Шнитко Отчет о научно-исследовательской работе «Инструментальные исследования современной геодинамики в Полоцком регионе» ГПНИ «Природно-ресурсный потенциал» по заданию 5.4.15 раздела «Геологические модели», № госрегистрации № 20142987/, Новополоцк, ПГУ, 2015, 83 с.
2. Г.А.Шароглазова, Г.И.Каратаев, А.Г.Аронов. Выполнение предпроектных геодинамических исследований в районе предполагаемого строительства Полоцкой ГЭС / Научно-технический отчет, ХД НИР № 6-1153/ 26552, Новополоцк, 2006, 64 с.
3. Н.П.Есиков Современные движения земной поверхности с позиций теории деформаций / Новосибирск, 1991. – 226 с.
4. Г.А. Шароглазова, В.Н. Коровкин, С.К.Товбас, А.Н. Соловьев, К.И.Маркович, С.Г. Шнитко. Отчет НИР ГПНИ «Природно-ресурсный потенциал», задание «Геологические модели 12 » 2011-2013, № госрегистрации № 20111099/ Новополоцк, ПГУ, 2013, 102 с.
5. Г.А. Шароглазова, В.Н. Коровкин, С.К.Товбас, А.Н.Соловьев, Д.Н.Усов Отчет НИР по ГПОФИ «Недра Беларуси 13» за 2006-10 гг.«Диагностика современных движений земной коры Беларуси по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований», Новополоцк, ПГУ, 2010 г., 165 с.
6. Г.И.Каратаев, О.В.Мясников. Отчет о результатах научно-исследовательских работ по заданию 40 «Заложить геофизические реперы и создать локальные сети полигонов: Полоцкого – в 2006 году, Краснослободского – в 2007 году, Лидского – в 2008 году, Борисовского – в 2009 году, Глушкевичского – в 2010 году» Государственной программы развития Национальной системы мониторинга окружающей среды в

Республике Беларусь на 2006 – 2010 годы/ Институт природопользования НАНБ, Минск, 2010.

7. Сашурин А.Д., Кашкаров А.А., Копырин В.В. Геофизические исследования земной коры при оценке аварийности Краснотурьинского участка многониточного газопровода //Горная геофизика. Международная конференция 22-25 июня 1998 г. С-Петербург, Россия. СПб: ВНИМИ 1998. – С.329-333.

8. Герасименко М.Г., Пеллинен Л.П., Остач О.М., Дмитроченков В.Н. Методическое руководство по геодезическим работам на геодинамических полигонах (вторая редакция) / Москва, 1984.

9. Н.П.Есиков Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности / Новосибирск, 1979. – 183 с.

10. Учеб. Пособие / Шароглазова Г.А. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 192 с.

11. Брынь М.Я. Разработка методов повышения точности геодезического обеспечения городского кадастра / Диссертация на соискание степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2015.

12. Гудков В.М., Хлебников А.В. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений: Учеб. Для вузов. – М.: Недра, 1990,-335с.: ил.

13. El-Rabbany A., Kleusberg A. Effect of temporal physical correlation on accuracy estimation in GPS relative positioning // Journal of Surveying Engineering, Vol.129, N 1, 2003, p. 28-32.

14. Howind J., Kutterer, Heck B. Impact of temporal correlations on GPS-derived relative point positions // Journal of Geodesy, Vol. 73, 1999, p. 246-258.

15. Оптимальное проектирование деформационных GNSS сетей / Шестаков Н.В., Герасименко М.Д. – Владивосток: Дальнаука. 2009. 134 с.

16. Шеховцов Г.А. Оценка точности положения геодезических пунктов. – М.: Недра, 1992. – 255 с.: ил.

17. 9-я Международная конференция молодых ученых «European national dimension in research / Европейский и национальный контексты в научных исследованиях» 26-27 апреля 2017 года, Полоцкий государственный университет, Новополоцк, 2017.