

## ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 528.22.551.24

### СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАЙОНАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

*канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА*  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлен анализ выполненных исследований современных движений земной коры геодезическими методами в районах энергетических сооружений Беларуси. Сделан вывод о необходимости продолжения работ по обозначению опасных геологических участков магистральных трубопроводов на территории республики, по организации геодинамических полигонов по всему каскаду ГЭС на реке Западная Двина, по модернизации геодезических исследований на ГДП «Белорусская АЭС» и созданию нормативной базы по выполнению геодинамических исследований геодезическими методами в Республике Беларусь и их классификации как научно-исследовательских.*

**Ключевые слова:** *современные движения земной коры, повторные геодезические измерения, энергетические сооружения.*

Экономическое развитие государства во многом определяется степенью его энергетической безопасности. В последние десятилетия в Беларуси наряду с ранее действующими ГЭС (41 станция) построены новые: Гродненская (2012 г.), Витебская (2017 г.), Полоцкая (2017 г.); находятся в ожидании реализации проекта: Бешенковичская, Верхнедвинская и Немновская ГЭС; возводится атомная электростанция в Гродненской области (г. Островец), а также активно развиваются другие источники электрической энергии. Кроме того, по Беларуси проходят такие транспортные артерии энергетического сырья, как магистральные трубопроводы, на которых нередко случаются аварии. В комплексе с природной сейсмотектонической обстановкой это не может не оказывать влияния на состояние равновесия в земной коре и экологию окружающей среды.

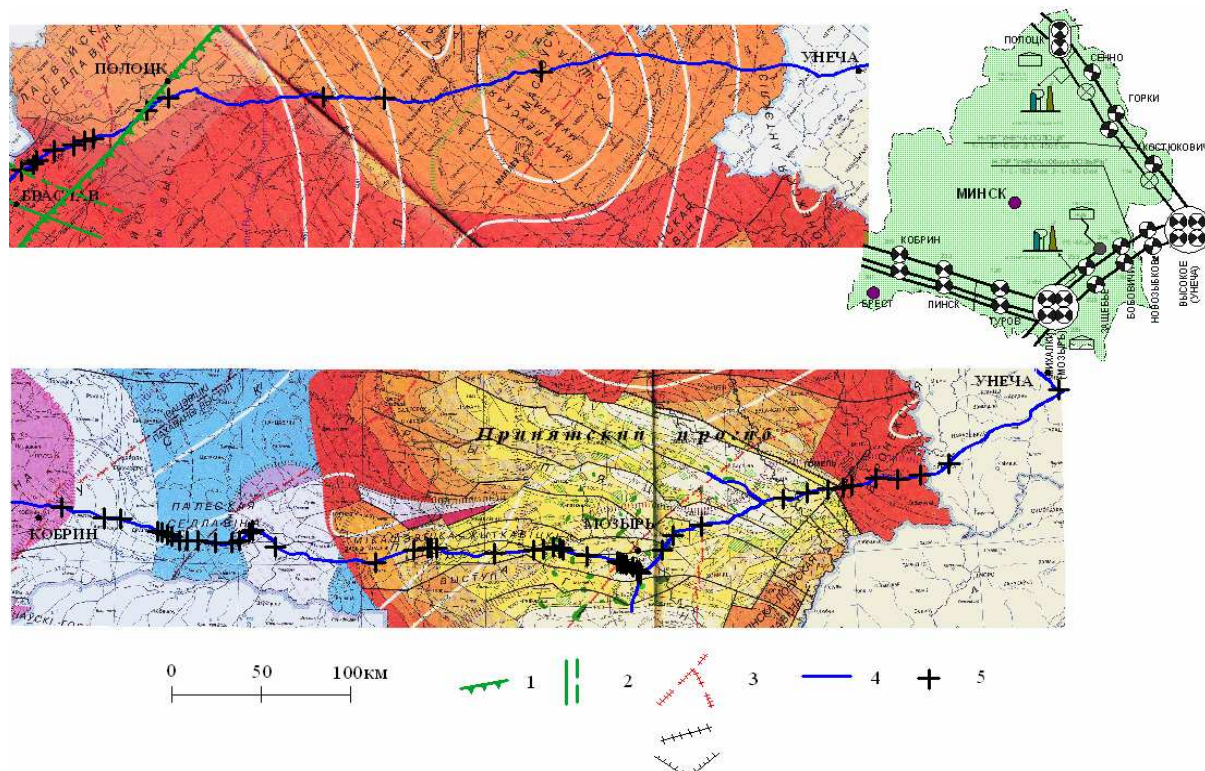
Так, выполненные нами исследования [1] расположения аварий на магистральных нефтепроводах Беларуси показали, что в более чем 70% случаев они приурочены к тектоническим разломам и активным тектоническим структурам (таблица 1, рисунок 1).

Таблица 1. – Сопоставление числа аварий, активности тектонических структур и скоростей современных вертикальных движений земной коры на анализируемых участках трубопроводов

Наименование участка трубопровода (тектонической структуры), протяженность	Число аварий	Скорость медленных СВДЗК, мм/год
Полоцк – Браслав (Полоцко-Курземский пояс тектонических разломов, активный), <b>100 км</b>	<b>10</b>	<b>от –1,3 до +1,0</b>
Полоцк – Унеча (Витебская и Могилевская мульды, спокойные тектонические структуры), <b>450 км</b>	3	<b>–1,0</b>
Унеча – Восточный край Припятского прогиба (район Гомеля), <b>166 км</b>	<b>7</b>	<b>–1,7</b>
Припятский прогиб, активная тектоническая структура, <b>330 км</b>	<b>44</b>	<b>(–3,6)...(–1,6)</b>
Западный край активного Припятского прогиба Полесская седловина – Кобрин, <b>210 км</b>	<b>22</b>	<b>(–2,8)...(–1,1)</b>

На наш взгляд, данную статистику нельзя игнорировать, и исследования по обозначению опасных геологических участков магистральных трубопроводов на территории Республики Беларусь необходимо продолжить. Что касается гидроэлектростанций, то здесь следует обратить внимание, прежде всего, на ГЭС реки Западная Двина: вновь построенные Полоцкую и Витебскую ГЭС; запроектированные Бешенковичскую и Верхнедвинскую гидроэлектростанции, а также возведенные еще в 1930–1970 годы латвийские ГЭС (Кегумская, Плявиньская и Рижская общей мощностью более 1000 МВт), которые представляют собой гидроэнергетический каскад, отнесенный к одной реке Западная Двина и принадлежащий к одной активной тектонической структуре – Полоцко-Курземскому поясу тектонических разломов (рисунок 2) [2]. Поэтому влияние всех перечисленных гидроэлектростанций на состояние

равновесия в земной коре, на тектоническую активность и окружающую среду следует рассматривать в данном случае в комплексе, а не в отдельности.



- 1 – Полоцкий краевой региональный разлом; 2 – тектонические нарушения Полоцко-Курземского пояса разломов;  
3 – тектонические разломы и стыки тектонических структур юга Беларуси;  
4 – положение магистрального нефтепровода; 5 – места аварий

Рисунок 1. – Схема расположения аварий на магистральных трубопроводах и основные тектонические структуры территории Республики Беларусь

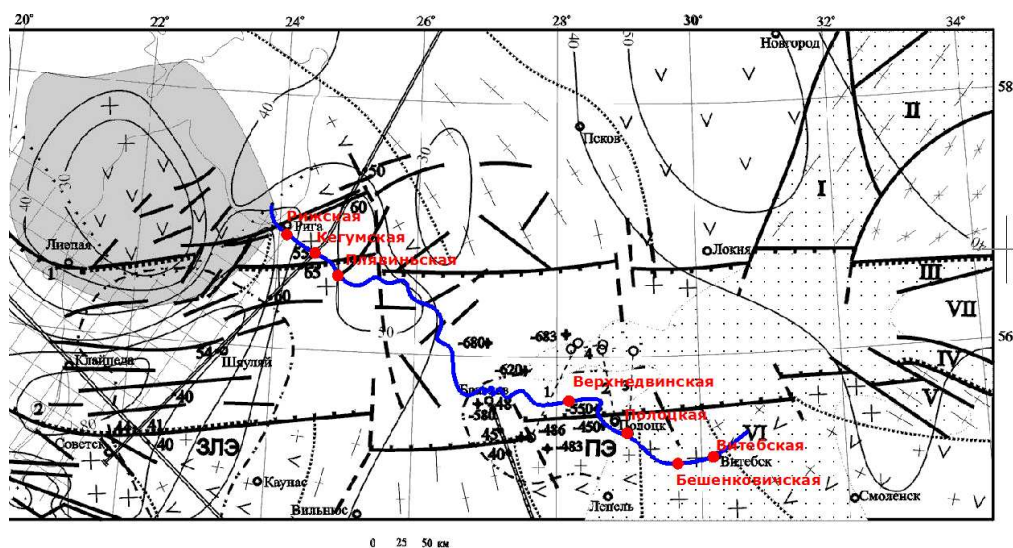
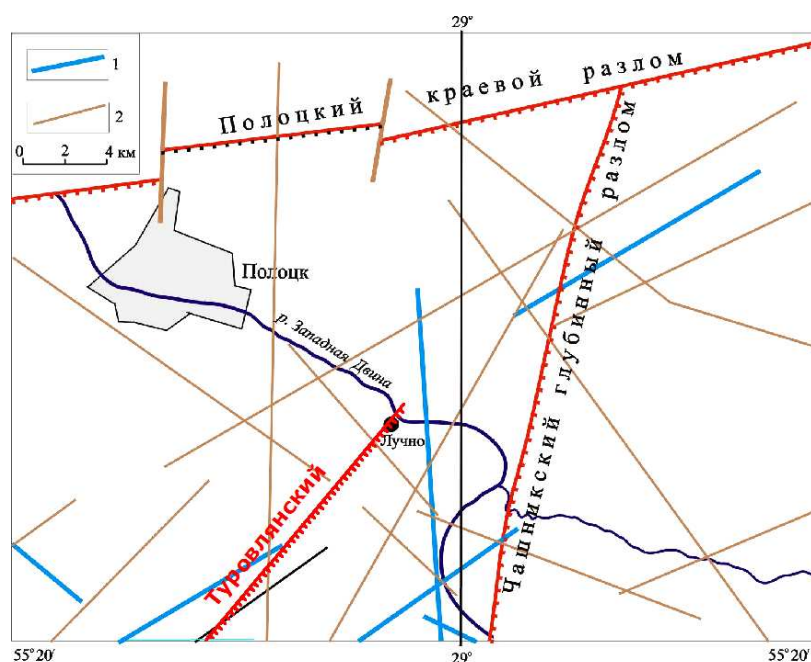


Рисунок 2. – Полоцко-Курземский пояс тектонических разломов и расположение каскада ГЭС на реке Западная Двина (Рижская, Кегумская, Плявиньская, Верхнедвинская, Полоцкая, Бешенковичская, Витебская)

Статистика сейсмической активности в районе латвийских ГЭС за последние 50 лет свидетельствует о том, что здесь происходили землетрясения до 6 баллов по шкале Рихтера.

В результате выполненных Полоцким университетом совместно с Институтом геологических наук и Центром геофизического мониторинга НАН Беларуси в районе Полоцкой ГЭС предпроектных геодинамических исследований получены следующие *выводы* [3]:

- территория Полоцкой ГЭС расположена в зоне влияния тектонических разломов: Полоцкого, Чашникского и Туровлянского (рисунок 3);
- на площадке строительства Полоцкой ГЭС присутствует [А.Г. Аронов, Р.Р. Сероглазов, 2006] сейсмическая опасность от возникновения местных небольших, а также сильных землетрясений других регионов;
- на устойчивость данного инженерного сооружения могут неблагоприятно влиять и ослабленные грунты тектонических разломов, где максимально проявляются деформации не только тектонического происхождения, но и вследствие действия сезонных и технологических факторов;
- рекомендуемый уровень сейсмостойкости – 7 баллов.



1 – флексурно-разломные зоны активизации; 2 – разломы кристаллического фундамента

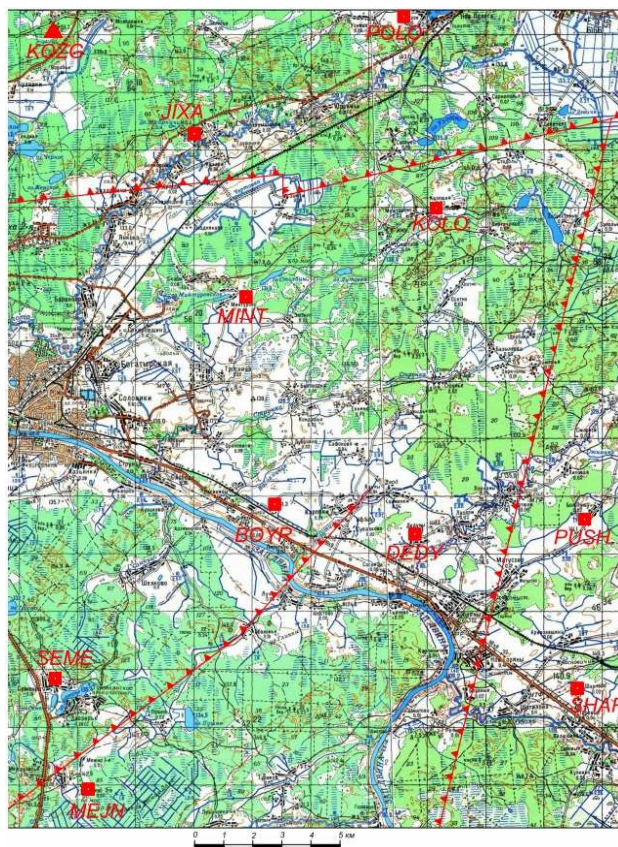
**Рисунок 3. – Схема расположения тектонических разломов в районе Полоцкой ГЭС (д. Лучно) [по Каратаеву] (Туровлянский разлом установлен по данным геофизических исследований 2006 г.)**

В рамках Государственной программы научных исследований в 2015–2016 годах специалистами Полоцкого университета создан геодинамический полигон «Полоцкая ГЭС» по мониторингу указанных выше разломов. Организация ГДП осуществлена в строгом соответствии с разработанной нами комплексной технологией выполнения геодинамических исследований [4], состоящей из следующих процессов:

- разработка научного обоснования и проектирование геодезических построений;
- выбор конструкции центров знаков и мест их закладки;
- методика высокоточных повторных геодезических измерений с использованием современного оборудования и требуемой точности определения характеристик исследуемых деформаций;
- методика математической обработки результатов повторных измерений с получением характеристик деформаций земной коры необходимой точности и их наглядного представления;
- интерпретация полученных результатов и прогноз развития СДЗК во времени и в пространстве;
- оценка взаимообусловленного влияния тектонических и техногенных факторов на устойчивость инженерных сооружений.

Известно, что стоимость высокоточных геодезических работ высокая. А если они выполняются с целью изучения СДЗК, геодезические работы следует классифицировать как научно-исследовательские, для этого должно быть разработано научное обоснование. Геодезические работы на ГДП выполняют под научным руководством, с контролем, по утвержденным методикам, опытными специалистами, обладающими способностями исследователя. Именно этим постулатом мы руководствовались, когда организовывали ГДП «Полоцкая ГЭС».

Ясно, что территориально полигон должен охватывать показанные на рисунке 3 разломы: Полоцкий, Чашникский, Туровлянский. Места закладки центров пунктов относительно опрашиваемых разломов на полигоне тщательно выбирались нами с привлечением специалистов по геологии из отдела аэрокосмических исследований государственного предприятия «НПЦ по геологии» НАН Беларуси. На этапе проектирования по нашей заявке геологи выполнили структурное дешифрирование материалов аэрокосмических съемок (МАКС) на площади 670 кв. км в районе ГЭС. Исходными данными послужили космические снимки Landsat 5TM масштабов 1:100 000, 1:500 000 и 1:1 000 000, а также комплект материалов аэрофотосъемки различных масштабов и лет залета, необходимых для расшифровки и уточнения спутниковых данных. Методика исследований с привлечением технологий ГИС изложена в материалах конференции [5]. Выполненное структурное дешифрирование МАКС в исследуемом районе, в результате которого была получена космоструктурная карта, показало, что территория ГДП «Полоцкая ГЭС» в структурном отношении имеет разломно-блоковое строение, отражающее интенсивные глубинные процессы, происходящие в земной коре на современном этапе тектонического развития. Положение тектонических разломов Полоцкого, Чашникского и Туровлянского на рисунке 3 в точности совпало с положением разломов с повышенной проницаемостью осадочного чехла на космоструктурной карте. Таким образом, геологи подтвердили потенциальную опасность проявления современных геодинамических процессов в исследуемом районе, а также конкретизировали наиболее рациональное размещение мест закладки глубинных реперов на геодинамическом полигоне «Полоцкая ГЭС», что и было учтено нами при создании ГДП (рисунок 4).



**Рисунок 4. – 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**

Для закрепления пунктов полигона были выбраны надежные центры, устойчивость которых к влияниям нетектонического характера проверена в течение 12 лет на Полоцком геодинамическом профиле [5; 6], с устройствами для принудительного центрирования.

Геодезическое оборудование производства ГНСС измерений 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 ГНСС наблюдений в сети ГДП (рисунок 5) запроектировано три расстановки спутниковых приемников, 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. Длительность сеанса в каждой расстановке составляет 6 часов.

Полевые наблюдения на ГДП «Полоцкая ГЭС» планируется выполнять ежегодно в сентябре строго по вышеизложенной методике, сохраняя ее неизменной, включая и порядок расстановки приемников в сериях наблюдений.

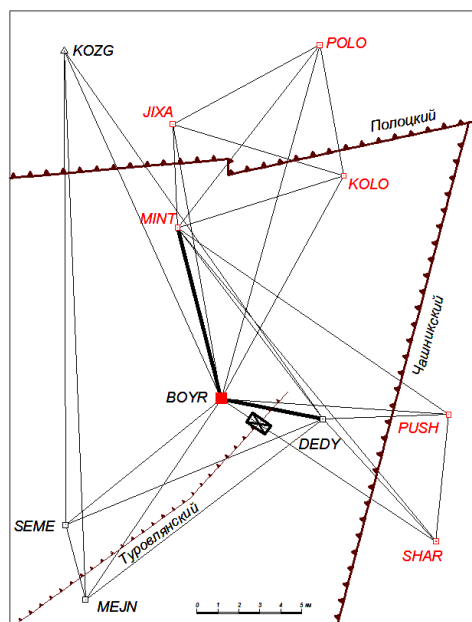


Рисунок 5. – Схема геодезической сети на ГДП «Полоцкая ГЭС»  
(выделены общие линии в соседних расстановках приемников (1 и 2; 2 и 3))

Методика математической обработки результатов ГНСС наблюдений на ГДП, как и методика полевых измерений, принята одинаковой во все эпохи наблюдений с использованием программного продукта Trimble Business Center версия 1.11. Система координат отнесена к пункту *BOYR* (Бояры).

Для обеспечения контроля результатов измерений и обработки уравнивание в каждую эпоху принято выполнять трижды: каждая серия отдельно, а затем обе серии совместно. По результатам раздельной обработки каждой серии выполняется оценка точности по известной формуле разностей двойных измерений:

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

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).

Характеристики точности результатов спутниковых наблюдений на ГДП «Полоцкая ГЭС» представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Характеристики точности результатов спутниковых наблюдений на ГДП «Полоцкая ГЭС»

$m_s$ , мм		$m_h$ , мм	
2014	2015	2014	2015
± 0,9	± 2,9	± 6,7	± 6,0

По результатам выполненных измерений можно получить следующие характеристики горизонтальных деформаций земной коры, широко используемые при математической обработке результатов повторных геодезических измерений на геодинимических полигонах и их интерпретации [7]:

- разности наклонных дальностей;
- векторы горизонтальных смещений;
- компоненты деформации (дилатация; максимальное и минимальное растяжения, их направления; сдвиг; вращение).

Аналогичные геодезические полигоны желательно создать по всему каскаду ГЭС реки Западная Двина. Учитывая принадлежность этого каскада к одной тектонической структуре и современные спутниковые средства измерений, полезно связывать эти полигоны ГНСС наблюдениями с какой-то периодичностью (например, один раз в пять лет), а на локальных ГДП выполнять наблюдения ежегодно, или не реже одного раз в 3 года. В этом проекте, на наш взгляд, будет заинтересована не только Республика Беларусь, но и страны Прибалтики.

Следует отметить и ГДП «Белорусская АЭС», геодезические работы на котором выполняются под руководством Нижегородской инженеринговой компании Атомэнергопроект (ОАО «НИАЭП»). Результаты геодезических исследований на Белорусской АЭС не публикуются. Кафедра геодезии и геоинформационных систем Полоцкого университета выступала экспертом по геодезическим работам на Белорусской АЭС, поэтому мы познакомились с некоторыми отчетами по геодезическим исследованиям. На ГДП «Белорусская АЭС» выполняются высокоточные повторное нивелирование и повторные ГНСС наблюдения. Наши замечания, в основном, следующие:

- пункты спутниковой сети не обеспечены устройствами для принудительного центрирования, и наблюдения выполняются со штативов;

- методика ГНСС наблюдений и их математическая обработка с целью получения характеристик деформаций земной коры в районе сооружений АЭС требует более серьезного исследования.

На ГДП «Белорусская АЭС» спутниковая сеть состоит из 17 пунктов и включает 4 долговременных (на которых выполняются практически месячные серии наблюдений, но со штативов) и 13 рядовых пунктов. Долговременные пункты привязаны к пяти пунктам IGS сети (рисунок 6, показаны только долговременные пункты ГДП).

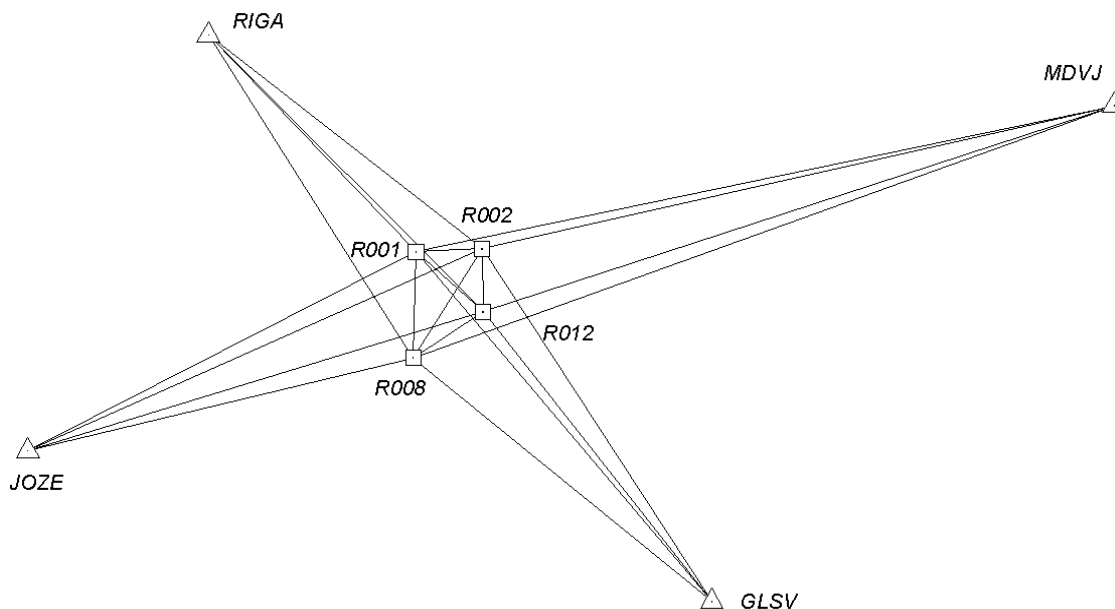


Рисунок 6. – Схема привязки 4-х долговременных пунктов (R001, R002, R008, R012) ГДП «Белорусская АЭС» к пунктам IGS сети (RIGA, MDVJ (Менделеево); JOZE, GLSV (Киев ))

Уравнивание выполняется в 2 этапа:

- 1) определение координат долговременных пунктов в каждую эпоху от пунктов IGS сети (рисунок 6) из уравнивания по программе обработки длинноразмерных спутниковых сетей, например, Bernese [7]. Координаты пунктов получают, соответственно, для каждой эпохи различные;

- 2) уравнивание каждой эпохи измерений всей сети ГДП, принимая координаты на долговременных пунктах за исходные, по программному продукту к используемым спутниковым приемникам, например, Trimble business Centre.

По полученным в результате 2-го этапа уравнивания координатам вычисляют векторы горизонтальных смещений, которые, как правило, оказываются нереально большими. Трансформирование координат по параметрам трансформирования, найденным по координатам двух эпох на долговременных пунктах, практически не улучшает результат.

Изложенный подход к выполнению математической обработки был исследован в [8]. Результаты исследования показали, что он не оправдал себя, так как усложнил методику измерений и математической обработки, в результате которой получились нереально большие векторы смещений, и привел к возникновению большого числа вопросов, включая и проблему ошибок исходных данных. Там же сделан вывод,

что оптимальным подходом к обработке сетей на локальных ГДП является уравнивание в программном продукте используемого высокоточного спутникового оборудования относительно одного центрального пункта сети ГДП, принятого за стабильный, без привязки к IGS пунктам. На наш взгляд, такой подход максимально приближает к уравниванию геодезических сетей ГДП как свободных, без исходных пунктов, что принято при определении параметров горизонтальных деформаций в мировой практике.

На основании проведенного исследования сделаны следующие **выводы**:

1. Организовать ГДП по всему каскаду ГЭС на реке Западная Двина с применением комплексной методики геодинимических исследований, использованной на ГДП «Полоцкая ГЭС».
2. Продолжить работу по выявлению геологически опасных участков земной коры, пересекаемых магистральными трубопроводами.
3. Усовершенствовать организацию работ на ГДП «Белорусская АЭС».
4. Геодезические работы на геодинимических полигонах рассматривать как научно-исследовательские. Их проектирование, методика наблюдений, математическая обработка и интерпретация должны выполняться в соответствии с научным обоснованием, научным руководством и обязательным полевым контролем. Математическая обработка должна быть грамотной и учитывать уже наработанные подходы к определению параметров деформаций земной коры из повторных геодезических измерений.
5. Оптимальным подходом для выполнения геодинимических исследований может явиться совместная работа научно-образовательных и производственных организаций. Совместную работу следует начать с создания четкой нормативной базы для выполнения геодинимических исследований методом высокоточных повторных геодезических измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Геолого-тектонические условия возникновения аварийности на магистральных нефтепроводах Белоруссии / Г.А. Шароглазова [и др.] // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – СПб., 2008. – № 1. – С. 58–60.
2. Полоцко-Курземский пояс разломов / Р.Г. Гарецкий [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2002. – Т. 46. – № 6. – С. 85–89.
3. Выполнение предпроектных геодинимических исследований в районе предполагаемого строительства Полоцкой ГЭС : отчет НИР / рук. Г.А. Шароглазова ; исполн. Г.И. Каратаев [и др.]. – Новополоцк, 2006. – 64 с. – № ГР 6-1153/26552.
4. Диагностика современных движений земной коры по результатам высокоточных геодезических измерений и данным геолого-геофизических исследований : Проект НИ-ТЕСН Полоц. гос. ун-та : выставка-ярмарка, Санкт-Петербург, 24–26.03.2013.
5. Организация геодинимического полигона «Полоцкая ГЭС» / Г.А. Шароглазова [и др.] // Геодезия, картография, кадастр, ГИС – проблемы и перспективы развития : материалы междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 9–10 июня 2016 г. – Новополоцк : ПГУ. – Ч. 1. – С. 90–103.
6. Шароглазова, Г.А. Опыт выполнения геодинимических исследований на локальных вытянутых зеленых участках земной поверхности / Г.А. Шароглазова, С.К. Товбас, А.Н. Соловьев // Геодезия и картография. – М., 2013. – № 6. – С. 38–42.
7. Шароглазова, Г.А. Применение геодезических методов в геодинимике : учеб. пособие / Г.А. Шароглазова. – Новополоцк : ПГУ, 2002. – 192 с.
8. Шароглазова, Г.А. Анализ методики обработки повторных ГНСС наблюдений на геодинимических полигонах АЭС / Г.А. Шароглазова, В.В. Ялтыхов, К.И. Маркович // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 114–117.
9. Bernese GNSS Software, Version 5.2 Tutorial.

Поступила 01.12.2017

#### THE MODERN MOVEMENTS OF THE EARTH'S CRUST IN AREAS OF ENERGY FACILITIES

G. SHAROGLAZOVA

*The analysis of the implementation of studies of modern movements of the earth's crust by geodetic methods in the areas of energy facilities of the Republic of Belarussia is presented. The conclusion is made about the need: continuation of works on identification of dangerous geological sections of main pipelines on its territory; organization of geodynamic polygons throughout the cascade of hydroelectric power stations on the Western Dvina River; modernization of geodetic surveys at the Belarussian NPP; creating a normative base for the implementation of geodynamic studies in geodetic methods in the Republic of Belarus and their classification as research.*

**Keywords:** modern movements of the earth's crust, repeated geodetic measurements, power structures.