

УДК 551.24

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-80-87

**ВЫПОЛНЕНИЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ  
НА ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ «ПОЛОЦКАЯ ГЭС»**

канд. техн. наук, доц. **К.И. МАРКОВИЧ**,  
канд. техн. наук, доц. **В.В. ЯЛТЫХОВ**,  
**П.С. ДОЛГИЙ**

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье представлена информация о тектонических разломах и разрывных нарушениях, простирающихся в окрестностях Полоцкой ГЭС. Приведены сведения о предыдущих геодинамических исследованиях на геодинамическом полигоне «Полоцкая ГЭС». Охарактеризованы процесс выполнения и результаты полевых гравиметрических измерений на пунктах геодинамического полигона «Полоцкая ГЭС» в 2024 году. Построена схема площадного распределения поля силы тяжести на территории ГДП «Полоцкая ГЭС».

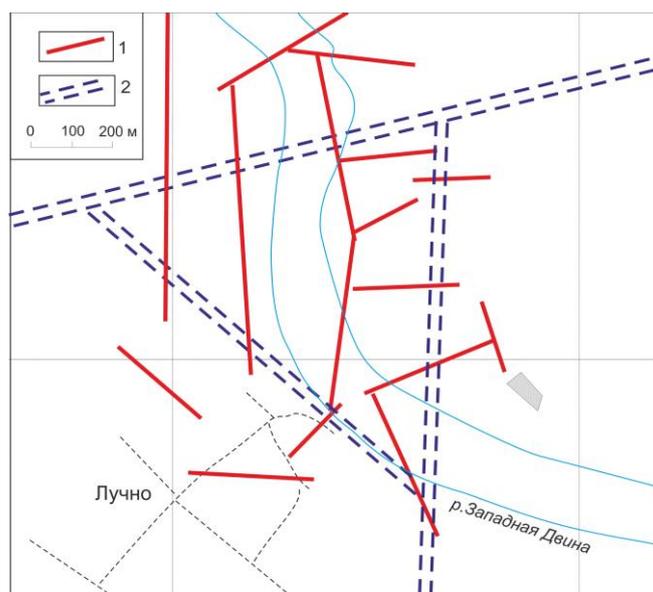
**Ключевые слова:** гравиметрические измерения, геодинамический полигон, гравиметр, вертикальный градиент нормальной силы тяжести, вариации гравитационного поля.

**Введение.** В данной статье представлены результаты полевых гравиметрических измерений, проведенных на пунктах геодинамического полигона «Полоцкая ГЭС» (ГДП). Геодинамический полигон «Полоцкая ГЭС» создан в 2014 году в виде структурной пространственной модели, в целях мониторинга взаимообусловленного влияния тектонических и техногенных факторов в зоне линейных геологических структур в окрестностях Полоцкой ГЭС.

ГДП запроектирован с учетом результатов геодинамических исследований, проведенных Полоцким государственным университетом, Центром геофизического мониторинга Национальной академии наук РБ, Институтом геологических наук в 2006–2013 гг. на сопредельных Полоцкой ГЭС территориях. Краткое изложение основных результатов данных исследований приведено ниже.

В отчете<sup>1</sup> составлена схема расположения линейных элементов и тектонических разломов на территории Полоцкой ГЭС (рисунок 1) и выявлены следующие факты:

- вероятной причиной излучины реки Западная Двина в месте проектируемого расположения плотины гидроузла является фрагмент относительно региональных разломов кристаллического фундамента;
- на площадке строительства присутствует сейсмическая опасность, главным образом от местных, с малой магнитудой, а также сильных землетрясений в других регионах;
- с целью прогноза возможного проявления сейсмичности и активности разломов рекомендовано выполнение постоянного геодинамического мониторинга (геофизического, сейсмологического и геодезического) в районе размещения Полоцкой ГЭС и сопредельных территориях.



1 – локальные разломы осадочного чехла; 2 – фрагменты относительно региональных разломов в кристаллическом фундаменте

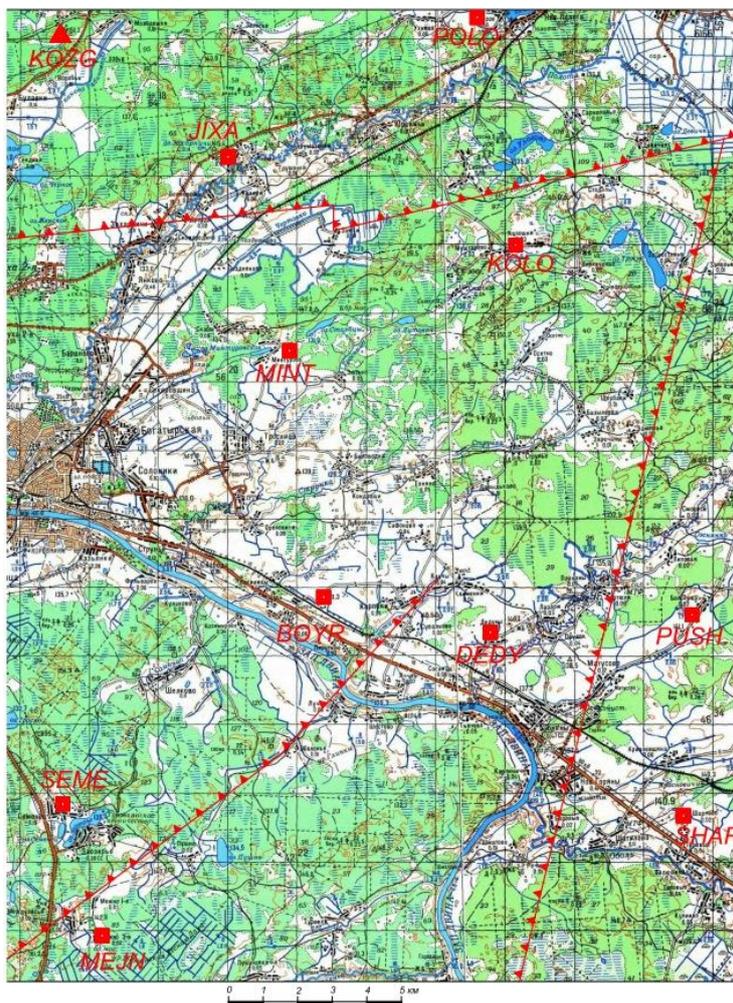
Рисунок 1. – Схема расположения разломов на сопредельных Полоцкой ГЭС территориях

<sup>1</sup> Выполнение предпроектных геодинамических исследований в районе предполагаемого строительства Полоцкой ГЭС: отчет о ХД НИР / Полоц. гос. ун-т.; рук. Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2006. – 64 с. – № ГР 6-1153/26552.

Как показали исследования 2006–2010 гг.<sup>2,3</sup>, фрагменты относительно региональных разломов в кристаллическом фундаменте (см. рисунок 1) имеют свойства развивающихся разломных зон. Такие зоны слабо отражаются в крупномасштабных потенциальных геофизических полях, но при этом могут привести к дестабилизации геодинамической обстановки в их окрестностях. Главные опасения вызывают активные процессы, связанные с зоной динамического влияния Туровлянского разлома, пересекающего р. Западная Двина в месте расположения гидроузла Полоцкой ГЭС.

Подобные геодинамические процессы, происходящие в зонах тектонических нарушений, и вызванные ими знакопеременные деформации и сдвиги несут серьезную опасность для инженерных объектов и сооружений, находящихся в зоне влияния подвижных тектонических структур [1], что, в том числе, актуально для Полоцкой ГЭС.

Расположение пунктов на сопредельных Полоцкой ГЭС территориях при проектировании ГДП в 2014 г. выбиралось исходя из необходимости мониторинга Чашникского, Полоцкого и Туровлянского разломов с учетом конфигурации дорожной сети. В геодезическую сеть, в дополнение к десяти пунктам, представленным на рисунке 2, включен пункт KOZG (возле деревни Козьи горки) с целью связать пункты в районе Полоцкой ГЭС и пункты Полоцкого геодинамического профиля<sup>4,5</sup>, расположенного в Полоцко-Курземской зоне тектонических разломов. Общая схема расположения пунктов геодинамического полигона Полоцкой ГЭС приведена на рисунке 2.



**DEDY, BOYR, SEME, MEJN – пункты, контролирующие Туровлянский разлом;  
POLO, KOLO, JIXA, MINT – Полоцкий; DEDY, KOLO, PUSH, SHAR – Чашникский**

**Рисунок 2. – Расположение пунктов геодинамического полигона относительно тектонических разломов на сопредельных Полоцкой ГЭС территориях**

<sup>2</sup> 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: отчет о НИР (заключ.) / Ин-т природопользования НАНБ; рук. О.В. Мясников. – Минск, 2010. – 105 с. – № ГР.20093422. – Инв. № 52391.

<sup>3</sup> Инструментальные исследования современной геодинамики в Полоцком регионе: отчет о НИР ГПНИ «Природно-ресурсный потенциал» Задание 5.4.15 «Геологические модели» / Полоц. гос. ун-т.; рук. Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2015. – 85 с. – № ГР 20142987.

<sup>4</sup> См. сноску 2.

<sup>5</sup> Диагностика современных движений земной коры Беларуси по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований: отчет о НИР / Полоц. гос. ун-т.; рук. Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2010. – 165 с. – № ГР 20062107.

Для повышения надежности выбора мест закладки центров пунктов на ГДП «Полоцкая ГЭС» было выполнено структурное дешифрирование материалов дистанционного зондирования Земли с аппарата Landsat-5 и аэрофотосъемок специалистами отдела аэрокосмических исследований государственного предприятия «НПЦ по геологии» НАНБ. В результате было выявлено, что изучаемая территория в структурном отношении имеет разломно-блоковое строение, которое отражает интенсивные глубинные процессы, происходящие в земной коре на современном этапе тектонического развития. Восточнее г. Полоцка на правом берегу р. Западная Двина находится крупный блок земной коры, который испытывает поднятие на фоне общего опускания окружающей территории. Данный блок покрывает основную часть изучаемой территории.

На пунктах ГДП «Полоцкая ГЭС» в период с 2014 г. по 2022 г. сотрудниками кафедры геодезии и геоинформационных систем Полоцкого государственного университета выполнено 5 циклов высокоточных ГНСС-наблюдений с целью получения характеристик деформаций земной поверхности в указанном районе. По результатам математической обработки инструментальных наблюдений получены компоненты деформаций (дилатация, максимальный сдвиг, максимальное и минимальное растяжение), построены схемы векторов смещений пунктов ГДП и схемы разностей длин сторон геодезической сети.

**Основная часть.** Результаты инструментальных геодезических измерений, выполненных на ГДП «Полоцкая ГЭС» в период 2014–2022 гг., подтвердили наличие на исследуемой территории значимых деформаций земной поверхности, что в свою очередь подтверждает данные предпроектных исследований в районе строительства ГЭС<sup>6</sup>. Известно [2–5], что геодинимические процессы, сопровождающиеся деформациями земной поверхности, тесно связаны с изменением геофизических полей. Представленные факторы стали основополагающими для начала выполнения гравиметрических измерений на ГДП «Полоцкая ГЭС».

Работы выполнены в рамках ГБ-0921 «Оценка и моделирование влияния геодинимики и техногенеза на геоэкологические и инженерно-геологические процессы в пределах Беларуси по материалам современных геолого-геофизических и геодезических исследований» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.), НИР «Исследование современной геодинимики территории Республики Беларусь геодезическими методами» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.), ГБ 0524 «Разработка веб-ГИС-проекта “Геодинимика и техногенез Беларуси”» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.).

Относительные гравиметрические измерения на пунктах ГДП выполнены в июле 2024 года сотрудниками кафедры геодезии и геоинформационных систем учреждения образования Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. Измерения выполнены двумя механическими наземными узкодиапазонными гравиметрами с кварцевой чувствительной системой класса В (ГНУКВ № 437 1991 г. и ГНУКВ № 484 1991 г.).

В состав работ вошли:

- проверка уровней гравиметра;
- определение скорости смещения нуль-пункта гравиметра, его линейности и продолжительности полевого рейса;
- выполнение контрольных измерений на эталонном базисе;
- проектирование, проложение и обработка гравиметрических рейсов.

Все исследования выполнены в специализированной лаборатории гравиметрии кафедры геодезии и геоинформационных систем в соответствии с ГОСТ 13017-83 «Гравиметры наземные. Общие технические условия»<sup>7</sup>.

Проверка уровней каждого гравиметра выполнялась на основании условия, что при неверно установленных уровнях в результате измерений войдет погрешность  $\Delta g$ , равная [6]

$$\Delta g = -\frac{g_0 \cdot \beta^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\Delta g$  – погрешность за наклон гравиметра;

$\beta$  – угол наклона гравиметра;

$g_0$  – приблизительное значение ускорения силы тяжести в точке стояния прибора.

Результаты исследований уровней обоих гравиметров ГНУКВ показали исправность уровней. Графики зависимости  $\Delta g$  от  $\beta$  для продольного и поперечного уровней гравиметра ГНУКВ № 437 представлены на рисунке 3.

Скорость смещения нуль-пункта гравиметра, его линейность и продолжительность полевого рейса определялись путем исследования гравиметра на смещение нуль-пункта. Методика исследования строго соответствовала ГОСТ 13017-83. Результаты показали, что смещение нуль-пункта обоих гравиметров ГНУКВ линейно в течение 5 часов и скорость смещения не превышает допустимой величины в 2 мГал/сутки. Процесс исследования гравиметров на смещение нуль-пункта представлен на рисунке 4.

<sup>6</sup> См. сноску 1.

<sup>7</sup> ГОСТ 13017-83. Гравиметры наземные. Общие технические условия. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999 (Переиздание с изменениями).

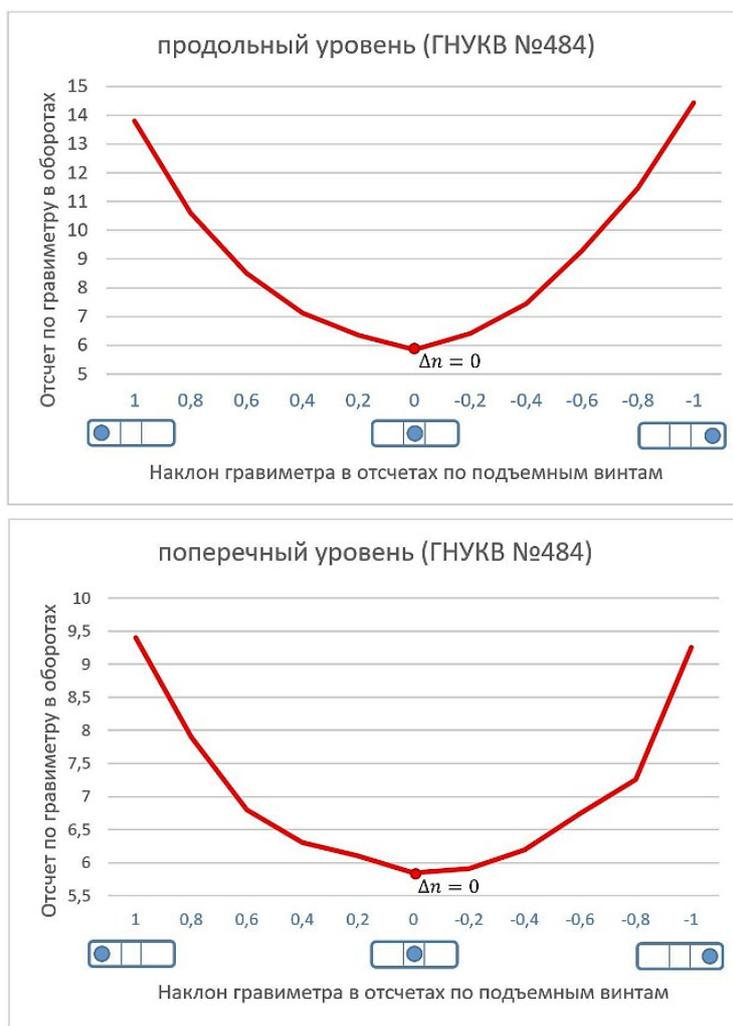


Рисунок 3. – Графики зависимости погрешности  $\Delta n$  от угла наклона плоскости  $\beta$ , проходящей через ось подвеса и нить маятника гравиметра



Рисунок 4. – Исследование гравиметров ГНУКВ на смещение нуля-пункта

Для контроля стабильности постоянных гравиметров и определения пригодности гравиметров к работе выполнялись контрольные измерения на эталонном базисе. В качестве базиса были выбраны два пункта Полоцкого геодинимического профиля (№ 59 и № 5960). Представленные пункты имеют максимальное приращение ускорения силы тяжести. Приращение ускорения силы тяжести на пунктах № 59 и № 5960 было вычислено на основании

гравиметрических измерений, выполненных в июле 2024 года специалистами топографо-геодезического предприятия «Белгеодезия» гравиметром Scintrex CG-6 AutoGrav (рисунок 5). Для обеспечения высокой точности измерений специалистами предприятия «Белгеодезия» использовался относительный метод с быстрым возвращением на первоначальный пункт по схеме  $A(t^*A) \rightarrow A(tB) \rightarrow A(t^*A)$ . Контрольные измерения приращения ускорения силы тяжести базиса № 59 – № 5960 гравиметрами ГНУКВ выполнены трижды. Было установлено, что постоянные гравиметров соответствуют паспортным значениям, точность определения приращения близка к заявленной.



Рисунок 5. – Выполнение гравиметрических измерений гравиметром Scintrex CG-6 AutoGrav на одном из пунктов Полоцкого геодинамического профиля

Проектирование гравиметрических рейсов выполнялось с учетом расположения пунктов на ГДП и возможности подъезда к ним, а также с учетом времени, в течение которого смещение нуля-пункта гравиметра линейно во времени. В результате запроектировано три гравиметрических рейса, замыкающихся на едином для них исходном пункте № 59 (являющимся также начальным пунктом Полоцкого геодинамического профиля). Продолжительность каждого рейса составляла от 2 до 3 часов, что не превышает времени, в течение которого смещение нуля-пункта гравиметров линейно. Также можно отметить, что приращение поля за столь малый период времени равно нулю [7].

Схема запроектированных гравиметрических рейсов по пунктам ГДП «Полоцкая ГЭС» представлена на рисунке 6.

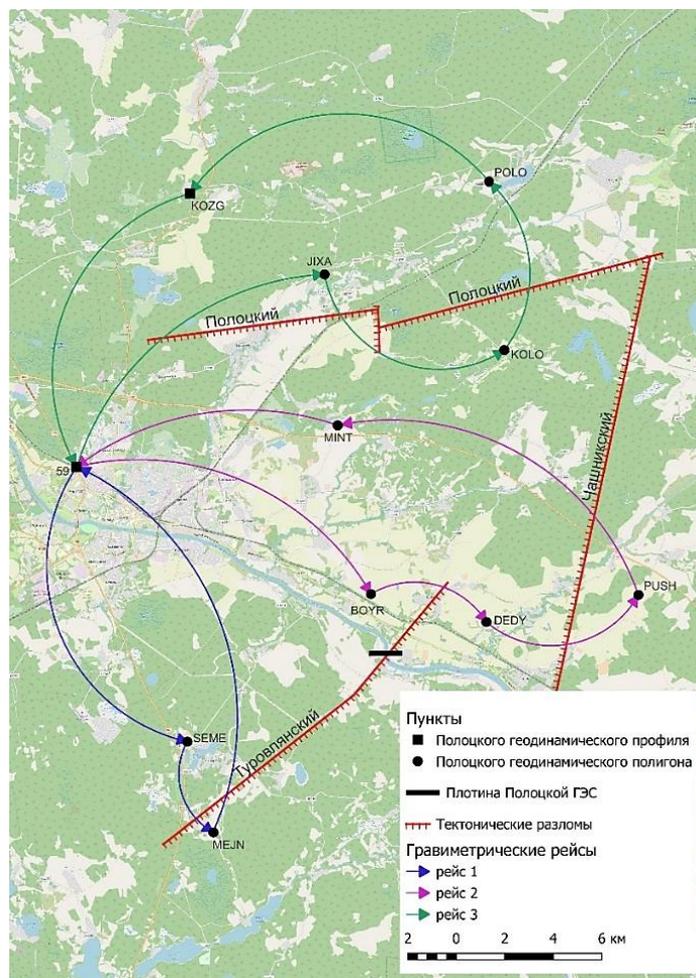


Рисунок 6. – Схема проложения гравиметрических рейсов по пунктам ГДП «Полоцкая ГЭС»

Выполнение измерений на ГДП выполнялось в ясную погоду. В связи с конструктивной невозможностью установки гравиметра непосредственно на пункты ГДП гравиметр устанавливался рядом с пунктами на специальную отгоризонтированную подставку. Для приведения результатов измерений к центру каждого пункта ГДП определялось превышение между подставкой и пунктами. Приведение выполнялось с использованием значения вертикального градиента нормальной силы тяжести ( $-0,3086$  мГал/м). После установки и приведения гравиметра в рабочее положение на каждом пункте бралось по три отсчета по отсчетному устройству гравиметров. Процесс работы на пункте SEME (д. Семенец) представлен на рисунке 7.



**Рисунок 7. – Выполнение гравиметрических измерений на пункте SEME**

Обработка результатов полевых измерений включала введение поправки за смещение нуль-пункта в каждый из рейсов, расчет приращений ускорения силы тяжести относительно опорного пункта. Введение данной поправки позволяет привести все отсчеты в гравиметрическом рейсе к моменту времени взятия отсчета на опорном пункте (в нашем случае пункт № 59). Поправка за смещение нуль-пункта распределялась пропорционально времени продолжения рейсов. Осредненные результаты гравиметрических измерений относительно опорного гравиметрического пункта № 59 представлены в таблице 1. Схема площадного распределения поля силы тяжести относительно пункта № 59 представлена на рисунке 8.

**Таблица 1. – Результаты гравиметрических измерений, выполненных на ГДП «Полоцкая ГЭС» в 2024 году**

№ п/п	Название гравиметрических пунктов	Приращение поля (относительно пункта 59), мГал
1	59	0
2	SEME	-19,09
3	MEJN	-23,96
4	BOYR	-13,66
5	DEDY	-14,54
6	PUSH	-10,59
7	MINT	-2,59
8	JIXA	-6,34
9	KOLO	-8,95
10	POLO	-11,17
11	KOZG	-7,26

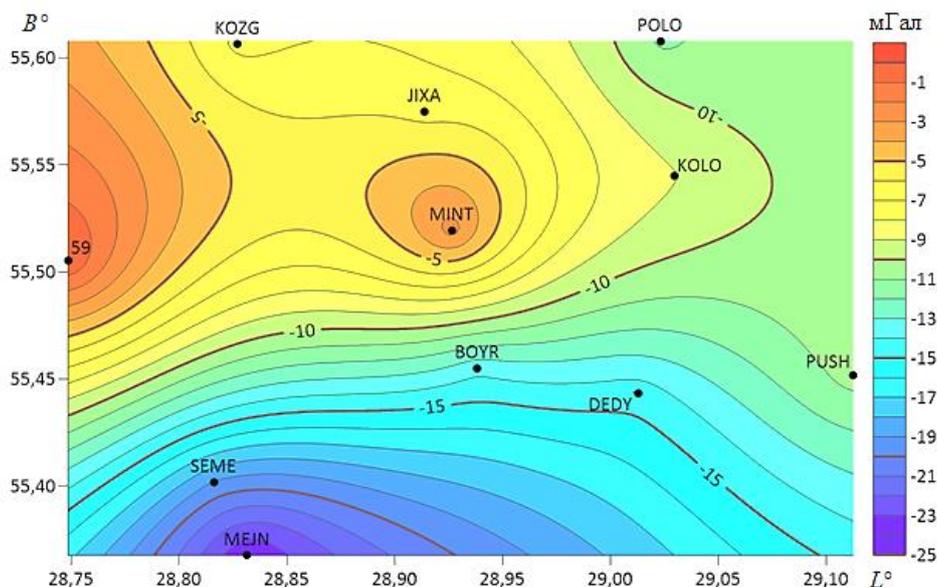


Рисунок 8. – Схема площадного распределения поля силы тяжести на исследуемой территории относительно пункта № 59

**Заключение.** Результаты измерений показали, что приращения ускорения силы тяжести на пунктах ГДП «Полоцкая ГЭС» варьируются в пределах от 0 до -23,96 мГал. Пункт ГДП № 59 имеет наибольшее значение ускорения силы тяжести. Максимальное приращение поля силы тяжести отмечается у пунктов MEJN и SEME, расположенных в южной части ГДП. Поле силы тяжести неоднородное, с резкими изменениями количественных значений в субмеридиональном направлении.

Так как цикл гравиметрических измерений, выполненных в 2024 году, является на данный момент единственным, то возможность вычислить вариации гравитационного поля на территории ГДП «Полоцкая ГЭС» отсутствует. В 2025 году в рамках ГБ-0921 «Оценка и моделирование влияния геодинамики и техногенеза на геоэкологические и инженерно-геологические процессы в пределах Беларуси по материалам современных геолого-геофизических и геодезических исследований» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.), НИР «Исследование современной геодинамики территории Республики Беларусь геодезическими методами» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.), ГБ 0524 «Разработка веб-ГИС-проекта «Геодинамика и техногенез Беларуси»» (гос. рег. № 20221263 от 26.07.2022 г.) запланировано выполнение повторного цикла гравиметрических измерений, несущего в себе информацию о краткосрочных вариациях поля силы тяжести.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сашурин А.Д., Кашкаров А.А., Копырин В.В. Геофизические исследования земной коры при оценке аварийности Краснотурьинского участка многониточного газопровода // Горная геофизика: междунар. конф. / Санкт-Петербург (22–25 июня 1998 г.). – СПб.: ВНИМИ, 1998. – С. 329–333.
2. Колмогорова П.П., Каратаев Г.И. Прогнозирование скоростей современных вертикальных движений земной коры с помощью корреляционной модели по статическим геолого-геофизическим данным // Методические вопросы исследования современных движений земной коры. – Новосибирск, 1975. – С. 182–203.
3. Вопросы теории и постановка наблюдений временных возмущений гравитационного и магнитного полей и движений земной поверхности в аспекте современных глубинных процессов / Э.Э. Фотиади, Г.И. Каратаев, В.Г. Коломогоров и др. // Проблемы современных движений земной коры. – 1969. – С. 527–536.
4. К вопросу о соотношениях между скоростями современных вертикальных движений земной коры, геофизическими полями и геоструктурными элементами / А.Т. Донабедев, В.А. Сидоров, К.В. Тимарев и др. // Докл. АН СССР. – 1960. – Т. 132. – № 4. – С. 810–813.
5. Кузнецова В.Г. Использование геофизических данных для составления карты современных вертикальных движений Земной коры западной части Украины // Современные движения Земной коры. – 1973. – № 5. – С. 94–100.
6. Огородова Л.В., Шимбирев Б.П., Юзефович А.П. Гравиметрия. – М.: Недра, 1978. – 325 с.
7. Отражение современных глубинных тектонофизических процессов в динамике гравитационного и магнитного полей Беларуси. Статья 1. Структура мониторинговой геофизической сети и непривлинные вариации во времени поля силы тяжести / А. Сас-Ухрыновски, С. Мрочек, Г.И. Каратаев и др. // Литосфера. – 2001. – № 1(14). – С. 120–130.

#### REFERENCES

1. Sashurin, A.D., Kashkarov, A.A. & Kopyrin, V.V. (1998). Geofizicheskie issledovaniya zemnoi kory pri otsenke aviariiynosti Krasnotur'inskogo uchastka mnogonitochnogo gazoprovoda. *Gornaya geofizika: mezhdunar. konf. / Sankt-Peterburg (22–25 iyunya 1998 g.)* (329–333). Saint-Petersburg: VNIIMI. (In Russ.).

2. Kolmogorova, P.P. & Karataev, G.I. (1975). Prognozirovaniye skorostei sovremennykh vertikal'nykh dvizhenii zemnoi kory s pomoshch'yu korrelyatsionnoi modeli po staticheskim geologo-geofizicheskim dannym. *Metodicheskie voprosy issledovaniya sovremennykh dvizhenii zemnoi kory* (182–203). Novosibirsk. (In Russ.).
3. Fotiadi, E.E., Karataev, G.I., Kolmogorov, V.G., Cheremisin, V.G. & Shcheglov, V.I. (1969). Voprosy teorii i postanovka nablyudenii vremennykh vozmushchenii gravitatsionnogo i magnitnogo polei i dvizhenii zemnoi poverkhnosti v aspekte sovremennykh glubinykh protsessov. *Problemy sovremennykh dvizhenii zemnoi kory* (527–536). (In Russ.).
4. Donabedov, A.T., Sidorov, V.A., Timarev, K.V. & Torkhovskaya, L.N. (1960). K voprosu o sootnosheniyakh mezhdru skorostyami sovremennykh vertikal'nykh dvizhenii zemnoi kory, geofizicheskimi polyami i geostrukturnymi elementami. *Dokl. AN SSSR*, 132(4), 810–813. (In Russ.).
5. Kuznetsova, V.G. (1973). Ispol'zovanie geofizicheskikh dannykh dlya sostavleniya karty sovremennykh vertikal'nykh dvizhenii Zemnoi kory zapadnoi chasti Ukrainy. *Sovremennye dvizheniya Zemnoi kory*, (5), 94–100. (In Russ.).
6. Ogorodova, L.V., Shimbirev, B.P. & Yuzefovich, A.P. (1978). *Gravimetriya*. Moscow: Nedra. (In Russ.).
7. Sas-Ukhrynovski, A., Mrochek, S., Karataev, G.I., Belov, Yu.V. & Karagodina, O.I. (2001). Otrazhenie sovremennykh glubinykh tektonofizicheskikh protsessov v dinamike gravitatsionnogo i magnitnogo polei Belarusi. Stat'ya 1. Struktura monitoringovoi geofizicheskoi seti i neprilivnye variatsii vo vremeni polya sily tyazhesti. *Litosfera*, 1(14), 120–130. (In Russ.).

Поступила 19.11.2024

## IMPLEMENTATION OF GRAVIMETRIC MEASUREMENTS AT THE GEODYNAMIC SITE "POLOTSKAYA HYDROELECTRIC POWER STATION"

**K. MARKOVICH, V. YALTYHOV, P. DOLHI**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*The article presents information on tectonic faults and faults located in the area of the Polotsk hydroelectric power plant. Information is given on previously performed geodynamic studies on the territory of the geodynamic polygon "Polotsk hydroelectric power station". The process of implementation is described and the results of field gravimetric measurements in 2024 at the points of the geodynamic polygon are presented. A diagram of the areal distribution of the gravity field on the territory of the geodynamic polygon "Polotsk hydroelectric power station" is constructed.*

**Keywords:** *gravimetric measurements, geodynamic testing ground, gravimeter, vertical gradient of normal gravity, variations in the gravitational field.*