

УДК 551.54

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ МЕТОДОМ ВЫСОКОТОЧНЫХ ПОВТОРНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ПОЛОЦКОМ РЕГИОНЕ

*канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА;  
С.К. ТОВБАС; К.И. МАРКОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Приведены результаты многолетних высокоточных повторных спутниковых наблюдений на Полоцком геодинамическом микрополигоне, расположенном в Полоцко-Курземском поясе тектонических разломов. Показано, что разработанная нами в рамках научных программ методика повторных спутниковых наблюдений позволяет определить разности наклонных дальностей для линий порядка 1 км с точностью не хуже 1,5 мм. В комплексе с данными геометрического нивелирования спутниковые наблюдения позволили определить изменения высот геоида во времени по реперам микрополигона. Установлены места расположения тектонических разломов.*

По государственным программам научных исследований с 2004 года Полоцкий государственный университет выполняет инструментальные исследования современной геодинамики методом повторных геодезических измерений в Полоцком регионе [2–10]. В рамках программ осуществлялся мониторинг зоны Полоцкого глубинного разлома (рис. 1) с помощью высокоточного повторного нивелирования и высокоточных повторных спутниковых наблюдений. Методика работ, включая и спутниковые измерения, дана в [4; 5].

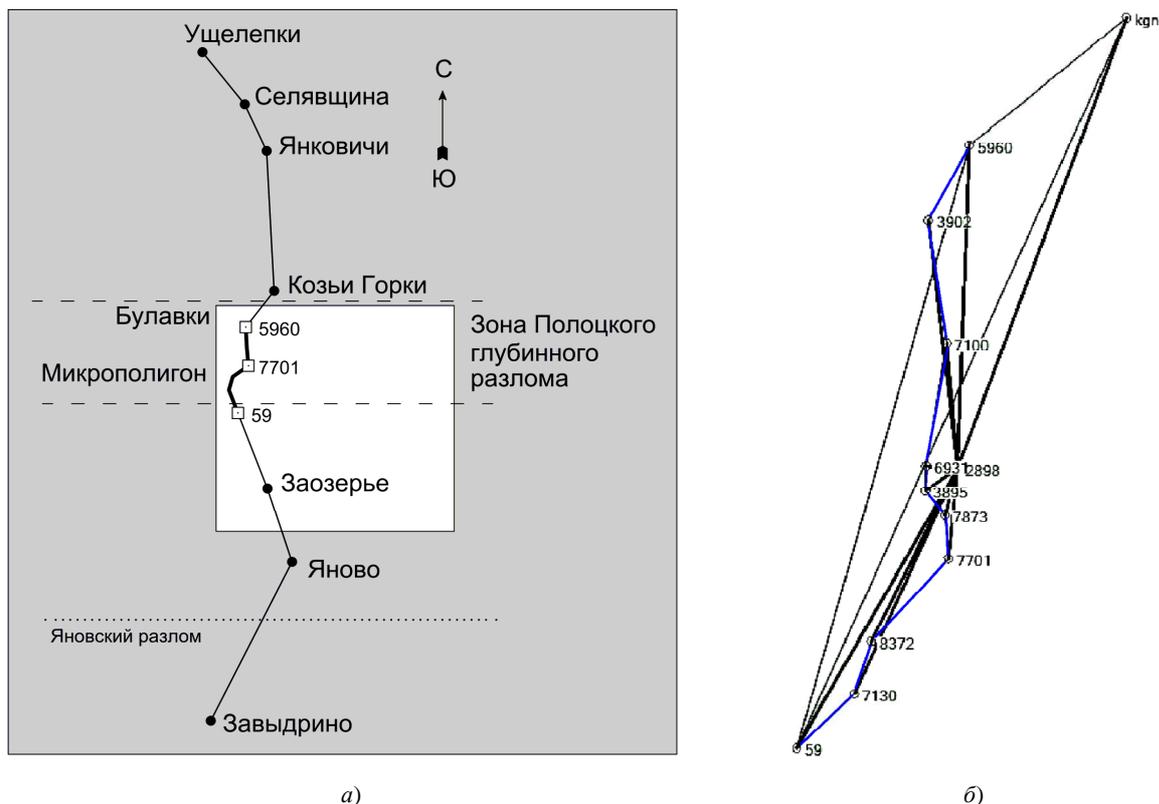


Рис. 1. Схема инструментальных исследований в Полоцко-Курземской зоне тектонических разломов:  
*а* – положение Полоцкого геодинамического микрополигона  
 на Полоцком геофизическом полигоне (грави- и магнитометрические измерения);  
*б* – схема геодезических построений на микрополигоне:  
 59 – 7130 – 8372 – 7701 – 7873 – 3895 – 6931 – 7100 – 3902 – 5960 – 59 – ходовая линия спутниковых наблюдений  
 (без замыкания на 59 – она совпадает с линией высокоточного нивелирования);  
 2898 – связующий пункт; п. KGN (Козьи Горки) включен в спутниковую сеть микрополигона в 2012 году

Настоящая работа посвящена результатам спутниковых наблюдений на Полоцком геодинамическом микрополигоне, охватывающем зону Полоцкого глубинного разлома (репер 59 – пункт Козьи Горки) и входящем в Полоцкий геофизический полигон [1; 6]. Высокоточные спутниковые наблюдения в геодезическом построении, приведенном на рисунке 1, б, выполнялись по методике [4; 5] с 2004 года. Исключением является пункт Козьи Горки, который был включен в сеть для связи микрополигона с Полоцким геофизическим полигоном только в 2012 году. Математическая обработка результатов спутниковых наблюдений по каждой эпохе выполнена в программном продукте Trimble Business Center 1.0 для GPS-систем. В результате обработки были получены наклонные дальности между соседними реперами микрополигона и геодезические высоты для всех реперов относительно репера 59.

Характеристики горизонтальных деформаций земной поверхности на исследуемой территории представлены разностями наклонных дальностей между эпохами наблюдений начиная от 2004 года для всех линий микрополигона, от 2012 года – для линии 5960 – kgn, которые отображены в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1

Разности наклонных дальностей на Полоцком геодинамическом микрополигоне

Название линий	Разности наклонных дальностей относительно 2004 (для 5960 – kgn относительно 2012), мм					
	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
59 – 7130	3,6	-2,2	8,2	5,4	3,8	6,8
7130 – 8372	7,2	7,2	3,6	4,2	4,5	3,9
8372 – 7701	-6,5	-0,7	-1,8	0,2	0,5	1,7
7701 – 7873	5,1	-2,3	0,3	-4,1	-2,4	-4,8
7873 – 3895	-7,6	-1,8	-4,4	-1,6	-0,9	1,0
3895 – 6931	1,2	8,1	6,2	8,5	8,6	5,7
6931 – 7100	-5,4	2	-6,3	-8,7	-3,5	-6,8
7100 – 3902	1,5	1,6	1,2	1,4	-3,6	6,6
3902 – 5960	-3,5	-1,4	5	5,2	8,0	2,5
5960 – kgn						-2

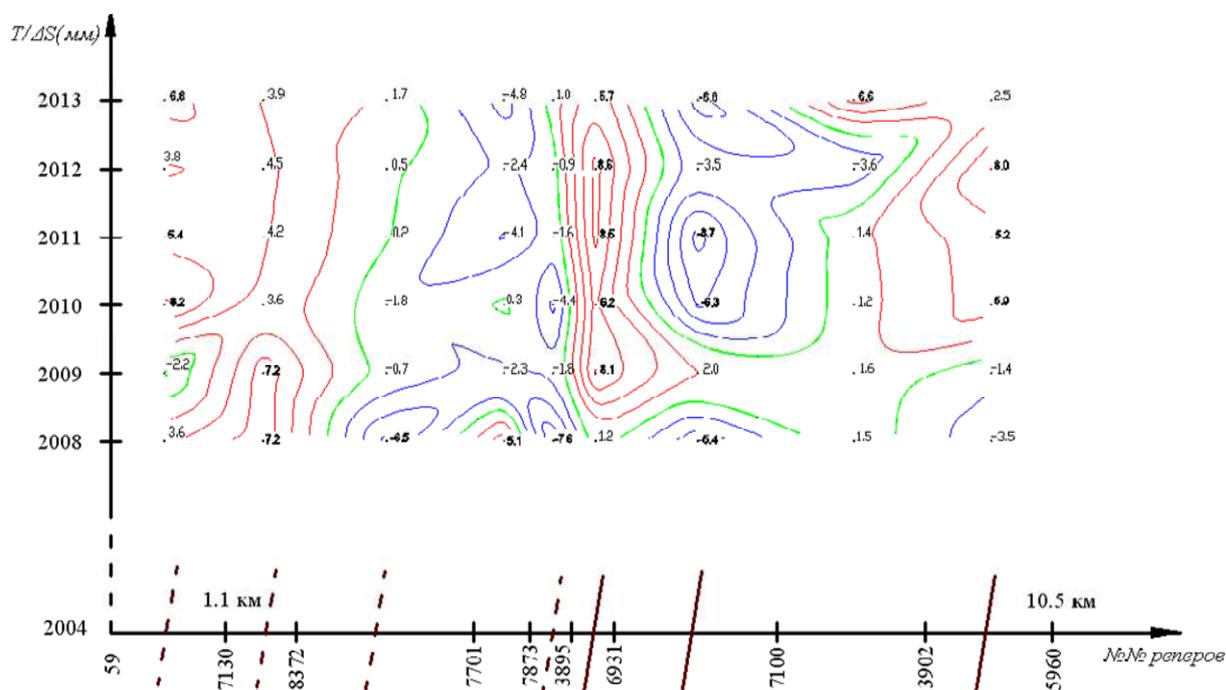


Рис. 2. Графики разностей наклонных дальностей в пространственно-временной области на Полоцком микрополигоне

*Примечания:* 1. Разности наклонных дальностей для каждой линии (59 – 7130, 7130 – 8372, ..., 3902 – 5960) даны относительно 2004 года. 2. Изолинии для  $\Delta S$  проведены через 2 мм: красный цвет – положительные разности; синий – отрицательные; зеленый – нулевые. 3. Значимые с вероятностью 0,95 разности наклонных дальностей выделены жирным шрифтом. 4. На горизонтальной оси графика наклонными линиями показаны тектонические разломы, выявленные по разностям наклонных дальностей: пунктиром – с меньшей степенью вероятности, сплошной – с большей степенью вероятности.

Представленные на рисунке 2 разности наклонных дальностей определены по результатам спутниковых GPS/GNSS наблюдений с точностью  $\pm 1,55$  мм. Следовательно, значимыми разностями наклонных дальностей с вероятностью 0,95 можно считать разности, превышающие по величине 3,1 мм. Такие разности наблюдаются по следующим линиям Полоцкого микрополигона:

- 59 – 7130 (растяжение);
- 7130 – 8372 (сжатие);
- 7701 – 7873 (сжатие);
- 7873 – 3895 (сильное сжатие);
- 3895 – 6931 (сильное растяжение);
- 6931 – 7100 (сжатие);
- 3902 – 5960 (растяжение).

Следует отметить, что из анализа исключены результаты спутниковых наблюдений 2008 года, так как они были выполнены по упрощенной методике (одна серия наблюдений в течение 2-х часов). Тектонические разломы, установленные по разностям наклонных дальностей, показаны на рисунке 3.

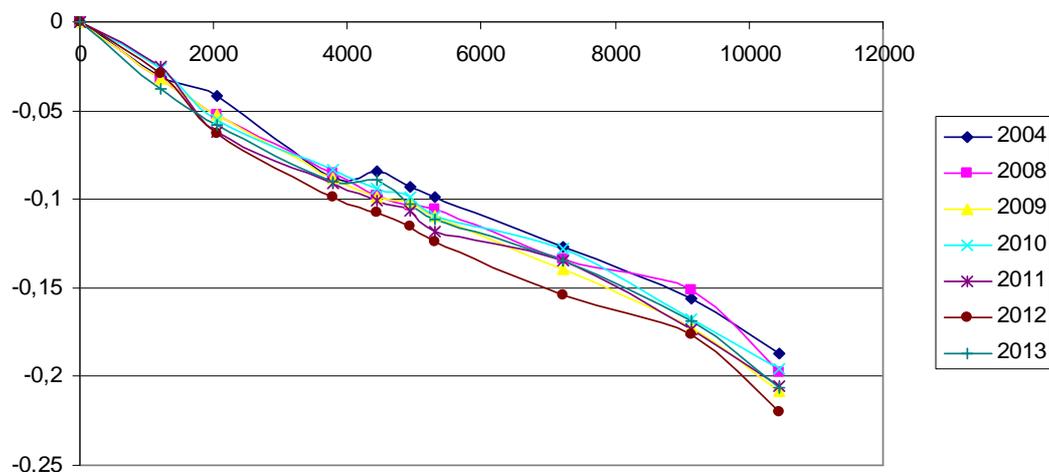


Рис. 3. Графики высот геоида относительно репера 59: по горизонтали – расстояние в метрах от начального репера; по вертикали – высоты геоида в метрах

Кроме разностей наклонных дальностей по результатам спутниковых наблюдений в исследуемом районе нами получены изменения превышений геоида между эпохами относительно репера 59, что оказалось возможным, так как спутниковые наблюдения здесь выполнялись в комплексе с геометрическим нивелированием. Остановимся более подробно на этом вопросе.

#### Определение превышений геоида и их изменений между эпохами

Превышения между точками геодинамического профиля (см. рис. 1, б), полученные из геометрического нивелирования, являются разностями ортометрических высот, зависящих от состояния гравитационного поля и отсчитываемых от уровневой поверхности геоида. В свою очередь, превышения между этими же точками, определенные из спутникового нивелирования, являются разностями геодезических высот, отсчитываемых от поверхности земного эллипсоида. Поэтому сопоставление результатов геометрического нивелирования с высотами пунктов, найденными из спутникового нивелирования, делает возможным определение высот геоида над эллипсоидом или аномалий высот, являющихся важнейшими характеристиками аномального гравитационного поля. Последнее легко прослеживается из формулы Брунса (1), связывающей возмущающий потенциал с аномалией высоты, и формул (2)–(3) – формул связи возмущающего потенциала с аномалиями силы тяжести и составляющими уклонения отвесной линии

$$\zeta \approx \frac{T}{\gamma} ; \quad (1)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial H} \right)_M - \frac{1}{\gamma_m} \left( \frac{\partial \gamma}{\partial H} \right)_N \cdot T_M = -(g_M - \gamma_N) - \frac{1}{\gamma_m} \left( \frac{\partial \gamma}{\partial H} \right)_N \cdot (W_0 - U_0), \quad (2)$$

где  $\zeta$  – аномалия высоты;  $\gamma$  – нормальная сила тяжести;  $T$  – возмущающий потенциал;  $(g_M - \gamma_N)$  – смешанная аномалия силы тяжести в точке  $M$  местности;  $(W_0 - U_0)$  – разность действительного и нормального потенциалов силы тяжести в исходном пункте нивелирной системы.

$$\left. \begin{aligned} \xi_{sp.} &= -\frac{1}{\gamma_m(R+H)} \cdot \frac{\partial T}{\partial B}, \\ \eta_{sp.} &= -\frac{1}{\gamma_m(R+H)\cos B} \cdot \frac{\partial T}{\partial L}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $B$ ,  $L$  – широта и долгота;  $R$  – радиус кривизны нормального сечения в точке  $M$  (часто используют средний радиус Земли);  $H$  – высота точки наблюдения (геодезическая или нормальная);  $\xi_{sp.}, \eta_{sp.}$  – гравиметрические составляющие уклонения отвеса в меридиане и первом вертикале.

Можно предположить, что если на участке Полоцкого профиля высоты геоида окажутся одинаковыми, то это будет свидетельствовать об отсутствии каких-либо возмущающих масс и, наоборот, изменения высот геоида по профилю укажут на два момента:

- на наклон поверхности геоида в исследуемом районе, обусловленный достаточно большим объемом возмущающих масс, скорее всего, глубинных;
- на местные изменения поверхности геоида, связанные с локальными неоднородностями земной коры, например, в местах пересечения тектонических разломов.

Для проверки этого предположения значения превышений на Полоцком геодинамическом микрополигоне, найденные из спутникового нивелирования (превышения в геодезической системе высот), сравнивались, со значениями превышений, определенными методом геометрического нивелирования (превышения в ортометрической системе высот). Полученные таким образом высоты геоида относительно репера 59 по всем имеющимся эпохам отображены в виде графиков на рисунке 3, а их разности относительно 2004 года представлены в таблице 2.

Таблица 2

Изменения высот геоида относительно 2004 года на Полоцком микрополигоне

Название репера	Разности относительных высот геоида $\Delta\zeta$ , мм						$m_{\Delta\zeta}$ , мм
	2008–2004	2009–2004	2010–2004	2011–2004	2012–2004	2013–2004	
1	2	3	4	5	6	7	8
59	0	0	0	0	0	0	0
7130	-1	-1	5	6	2	-6	4,3
8372	-10	-10	<b>-14*</b>	<b>-20</b>	<b>-21</b>	<b>-16</b>	6,0
7701	3	0	5	-3	-11	-2	7,4
7873	-14	-15	-10	-17	-23	-6	8,5
3895	-11	-9	-5	-14	<b>-22</b>	-10	9,6
6931	-7	-11	-11	-19	<b>-25</b>	-13	10,5
7100	-7	-13	-1	-8	<b>-27</b>	-8	11,3
3902	4	-17	-12	-18	-20	-13	12,1
5960	-10	-21	-9	-18	<b>-33</b>	-20	12,8

\* – выделены значимые разности с вероятностью 0,95.

Приведенные на рисунке 3 графики свидетельствуют о наклоне геоида на профиле. Данные таблицы 2 указывают на наличие аномальной зоны в районе репера 8372, характеризующейся, вероятнее всего, двумя тектоническими разломами, расположенными между реперами 7130 – 8372 и 8372 – 7701.

**Заключение.** Выполненные по методике [4; 5] спутниковые наблюдения на Полоцком геодинамическом профиле свидетельствуют о высокой точности результатов измерений, которые позволяют надежно определять положение тектонических разломов и оценивать их активность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полоцко-Курземский пояс разломов / Р.Г. Гарецкий [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2002. – Т. 46, № 6. – С. 85–89.
2. Коровкин, В.Н. Математическое моделирование геодинамических процессов / В.Н. Коровкин, А.Н. Соловьев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 16. – С. 120–125.

3. Соловьев, А.Н. Моделирование геодинамических процессов по результатам повторного нивелирования / А.Н. Соловьев // Наука – образованию, производству, экономике. Геодезия и картография – инновационные технологии: тез. к докл. на 10-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, БНТУ, 1–2 июня 2012 г. – Минск, 2012.
4. Шароглазова, Г.А. Опыт выполнения геодинамических исследований на локальных вытянутых зеленых участках земной поверхности / Г.А. Шароглазова, С.К. Товбас, А.Н. Соловьев // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 38–42.
5. Шароглазова Г.А. Методика выполнения высокоточных повторных геодезических измерений на Полоцком геодинамическом микрополигоне // Г.А. Шароглазова, С.К. Товбас, А.Н. Соловьев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 114–118.
6. Геодинамический мониторинг территории Полоцкого микрополигона: результаты инструментальных исследований и интерпретации / Г.А. Шароглазова [и др.] // Тезисы к докл. на междунар. геодезическую конференцию, Минск, 1–2 июня 2011 г. – Минск: БНТУ, 2011.
7. Шароглазова, Г.А. Проектирование геодинамических исследований в районах взаимообусловленного влияния тектонических и техногенных факторов на состояние земной коры / Г.А. Шароглазова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 8. – С. 166–171.
8. Применение метода Христова к исследованию вертикальных движений земной коры / Г.А. Шароглазова [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2008. – № 12. – С. 99–105.
9. Шароглазова, Г.А. Моделирование геодинамических процессов на участке Полоцко-Курземской зоны тектонических разломов по данным инструментальных исследований / Г.А. Шароглазова, В.Н. Коровкин, А.Н. Соловьев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – № 12. – 2010. – 123–125.
10. Результаты инструментальных исследований 2004–2007 годов на Полоцком геодинамическом профиле / Г.А. Шароглазова [и др.] // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – СПб., 2008. – № 3. – С. 57–61.

Поступила 28.10.2014

**RESULTS OF RESEARCH OF DEFORMATIONS OF EARTH CRUST  
A METHOD OF HIGH-PRECISION REPEATED SATELLITE MEASUREMENTS  
IN POLOTSK REGION**

**G. SHAROGLAZOVA, S. TOVBAS, K. MARKOVICH**

*In article results of long-term high-precision repeated satellite supervision on Polotsk the geodynamic micropoligon located in the Polotsk-Kurzemsky belt of tectonic breaks are resulted. It is shown that developed by us within the limits of scientific programs the technique of repeated satellite supervision allows to define differences of inclined ranges for lines of an order of 1 km with accuracy not worse 1,5 mm. In a complex with the data of geometrical levelling satellite supervision have allowed to define changes of the Geoid heights in time on micropoligon reference points. The locations of tectonic breaks are established.*