

УДК 528.21

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ БЕЛАРУСИ

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

Представлены результаты анализа влияния вариаций гравитационного поля на характеристики вертикальных движений земной коры, найденные из повторного геометрического нивелирования, для территории Республики Беларусь. Определены величины изменения наклона отвеса при условии равномерности возмущения силы тяжести по каждой из трех осей декартовых координат. Вычислены поправки в результаты геометрического нивелирования, находящегося в местах, экстремальных по изменению наклона отвеса.

Ключевые слова: вариации гравитационного поля, изменения наклона отвеса, повторное геометрическое нивелирование, вертикальные движения земной коры.

При изучении современных деформационных процессов природного и техногенного характера в форме деформаций земной коры методом повторных геодезических измерений на геодинимических полигонах необходимым условием является строгий учет и исключение факторов, искажающих реальную картину деформаций. Поскольку геодезические измерения выполняются в реальном гравитационном поле и зависят от его состояния, к таким факторам следует отнести и вариации гравитационного поля (ВГП) во времени, в результате которых сравниваемые циклы геодезических измерений на геодинимических полигонах (ГДП) окажутся выполненными при различных состояниях этого поля.

Наиболее ощутимо влияние ВГП может проявиться при анализе результатов повторного нивелирования. Известно [1; 2], что при исследовании современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) методом повторного геометрического нивелирования необходимо различать собственно вертикальные перемещения точек земной коры и смещения урвненных поверхностей, вызванные возможными ВГП. Так, изменение направления Θ отвеса относительно земной поверхности в направлении хода геометрического нивелирования может быть ошибочно интерпретировано как δh вертикальное перемещение точек земной поверхности – эффект Фоглера [2]. Представленный эффект Фоглера обусловлен систематическим изменением положения урвненной поверхности, что при работе с нивелиром будет проявляться в перемещении пузырька уровня (направления отвеса) на угол Θ (рисунок 1).

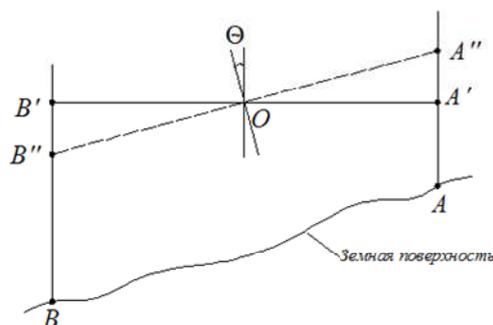


Рисунок 1. – Изменение разности высот на участке $l \approx A'B'$, обусловленное изменением Θ направления отвеса (точка O – положение нивелира)

Из рисунка 1 следует, что изменение разности высот на участке $l \approx A'B'$, обусловленное изменением направления отвеса, выразится формулой:

$$\delta h = l \cdot \operatorname{tg} \Theta, \quad (1)$$

где δh – влияние на превышение на станции изменения положения урвненной поверхности.

При определении разностей высот точек земной поверхности методом геометрического нивелирования непосредственно измеренной величиной является разность потенциалов $W_O - W_M$ [3; 4]:

$$W_O - W_M = \int_{OM} g dh \approx \sum_{OM} g \Delta h, \quad (2)$$

где g – значения силы тяжести в пунктах нивелирного хода; dh – элементарное нивелирное превышение; Δh – превышение между некоторыми промежуточными реперами на пути от точки O к точке M .

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что если между эпохами нивелирования произошло изменение разности потенциалов, тогда из (2) данное изменение может быть представлено как [1]

$$\delta(W_0 - W_M) = \int_{OM} (\delta g \cdot dh + g \cdot \delta dh) \approx \sum_{OM} (\delta g \cdot \Delta h + g \cdot \delta \Delta h), \quad (3)$$

где $\delta(W_0 - W_M)$ – изменение разности потенциалов силы тяжести; δg – изменение ускорения силы тяжести; δdh и $\delta \Delta h$ – изменение соответствующих превышений.

Из (3) следует, что изменение разности потенциалов силы тяжести, наблюдаемое между эпохами нивелирования, может быть вызвано как изменениями ускорения силы тяжести (δg), так и изменениями превышений ($\delta \Delta h$).

Вопрос о влиянии изменения наклона уровенных поверхностей на результаты повторного геометрического нивелирования подробно рассмотрен более века назад в работе Фоглера [5], однако лишь с недавнего времени появилась возможность вычислить изменение наклона Θ и его влияние на результаты геометрического нивелирования на основании производства повторных гравиметрических съемок и появления карт вариаций ускорения силы тяжести.

Оценка влияния изменения наклона уровенных поверхностей на результаты повторного геометрического нивелирования ранее выполнялась различными авторами [1; 6–12]. Так, в работе [1] на основании совместного анализа повторных гравиметрических и нивелирных наблюдений показано, что в равнинных районах при наблюдаемых изменениях нивелирных превышений и силы тяжести преобладающее влияние на изменение потенциалов окажет последний член под знаком суммы в (3). Согласно [1], для равнинных территорий формулу (3) можно упростить и переписать в следующем виде:

$$\delta(W_0 - W_M) \approx \sum_{OM} (g \cdot \Delta h). \quad (4)$$

Согласно (4) для равнинных районов вертикальные перемещения земной коры соответствуют изменению разности потенциалов, выявленному из повторного нивелирования, и в таком случае нет необходимости в производстве повторных измерений силы тяжести.

В практике нивелирных работ предполагается, что вопрос учета приливных поправок в результаты повторного нивелирования на ГДП обычно не возникает ввиду проложения на ГДП нивелирных ходов малой протяженности, в отличие от протяженных линий государственного нивелирования. Однако неприливные ВГП, т.е. обусловленные техногенными перемещениями масс, извержениями вулканов, землетрясениями, миграцией подземных вод и т.д., могут достигать значительных величин и исказить реальную картину деформаций на ГДП [12].

Следует отметить, что изменения превышений при абсолютной неподвижности исследуемых точек могут быть объяснены даже малыми вариациями положения отвеса. В таблице 1 представлены длины L нивелирных ходов, период времени T между нивелировками, изменения превышений Δh и объясняющие эти изменения наклоны отвеса Θ .

Таблица 1. – Изменения превышений, объясняющиеся изменением положения отвеса [13]

Нивелирный ход	L , км	T , лет	Δh , м	Θ , "
Омск – Павлодар	424	20	+0,23	0,11
Новосибирск – Семипалатинск	670	23	+0,24	0,07
Челябинск – Ачинск	2021	35	+0,73	0,07
Курган – Иргиз	1056	12	+0,18	0,04

Применим все вышесказанное к анализу влияния вариаций гравитационного поля на характеристики вертикальных движений земной коры, найденные из повторного геометрического нивелирования, для территории Республики Беларусь.

В качестве общей оценки вариаций гравитационного поля на территории Республики Беларусь выбран Белорусский геодинимический гравиметрический полигон (рисунок 2), линии которого проходят через все крупные тектонические структуры страны. Данный полигон проложен по линии «Лида – Россоны – Борисов – Калинковичи – Лида» и состоит из 29 пунктов (шаг 30...50 км), расположенных как на стабильных блоках земной коры, так и в зонах глубинных разломов.

Вариации гравитационного поля на Белорусском гравиметрическом полигоне определялись на основании результатов гравиметрических измерений, выполненных в 1996 и 1998 годах Институтом геологических наук НАН Беларуси. В 1996 году приращения ускорения силы тяжести между пунктами поли-

гона определены двумя гравиметрами ГНУКС со средней ошибкой $\pm 0,039$ мГал, а в 1998 году – двумя гравиметрами ГНУКС и одним гравиметром ГНУКВ со средней ошибкой $\pm 0,020$ мГал [14].



Рисунок 2. – Схема геодинимического гравиметрического полигона Беларуси

Для обеспечения высокой точности измерений использовался относительный метод с быстрым возвращением на исходный пункт по схеме $A(t'_A) \rightarrow A(t_B) \rightarrow A(t''_A)$. Согласно [14], если $t''_A - t'_A$ менее 3-х часов, лунно-солнечные возмущения и дрейф нуля отечественных гравиметров изменяются линейно на отрезке AB . Постулировалось положение, что приращение поля $g(A, t''_A) - g(A, t'_A)$ за столь малый промежуток времени практически равно нулю (или изменяется линейно). Такая схема наблюдений исключала влияние указанных факторов на измеряемое между пунктами A и B приращение поля силы тяжести, которое можно отнести к моменту времени t'_A . Приращения ускорения силы тяжести на соседних пунктах полигона варьируются в пределах от $+56$ до -67 мГал.

Результаты повторных гравиметрических измерений относительно опорного гравиметрического пункта “Лиды”, расположенного на стабильном Вильнюсском блоке земной коры, представлены в [14].

Визуальная оценка вариаций условного поля силы тяжести относительно опорного гравиметрического пункта “Лиды” для территории Белорусского геодинимического гравиметрического полигона (ГДП) за период 1996–1998 годов отображена на рисунке 3.

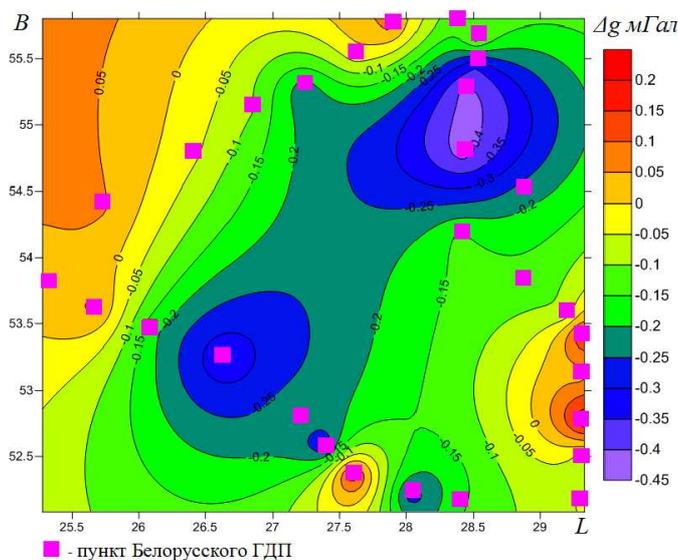


Рисунок 3. – Схема пространственного распределения Δg_i вариаций поля силы тяжести относительно пункта “Лиды” (1996–1998 гг.) на Белорусском геодинимическом гравиметрическом полигоне

Величины изменения наклона Θ для пунктов Белорусского геодинамического гравиметрического полигона за период (Т) 1996–1998 годов получены при условии равновероятности возмущения силы тяжести по каждой из трех осей декартовых координат, что вполне оправданно для равнинной территории Беларуси. Таким образом, можно вычислить псевдовариацию Δg_i силы тяжести по углу Θ [2]:

$$\Delta g_i = g \frac{\theta}{2T}. \quad (5)$$

Связь Δg_i изменения силы тяжести с углом Θ согласно (5) вполне соответствует выводам для равновероятного изменения горизонтальных и вертикальных составляющих силы тяжести: изменениям углов отбеса $0,1'' \dots 0,2''$ соответствуют изменения силы тяжести $0,5 \dots 1$ мГал, приведенные в [13].

Величины Θ для пунктов Белорусского геодинамического гравиметрического полигона за период 1996–1998 годов согласно (5) представлены в таблице 2. Ускорение силы тяжести получено согласно модели поля силы тяжести Земли EGM2008.

Таблица 2. – Величины Θ для пунктов Белорусского геодинамического гравиметрического полигона за период 1996–1998 годов

Название гравиметрических пунктов	Величины изменения Θ , "	Название гравиметрических пунктов	Величины изменения Θ , "
Лида	0	Колбча	0,016
Ошмяны	0,012	Кличев	0,028
Свирь	0,008	Бобруйск	0,005
Поставы	0,019	Паричи	0,039
Шарковщина	0,046	Озаричи	0,015
Миоры	0,007	Калинковичи	0,009
Верхнедвинск	0,012	Петриков	0,031
Россоны	0,031	Морохово	0,055
Янковичи	0,015	Домановичи	0,028
Полоцк	0,068	Старобин	0,059
Ушачи	0,082	Красная Слобода	0,040
Лепель	0,084	Несвиж	0,068
Холопеничи	0,046	Кореличи	0,036
Борисов	0,028	Березовки	0,012
Уша	0,027		

Схема пространственного распределения вариаций направления отбеса Θ относительно земной поверхности согласно данным таблицы 2 для территории Белорусского геодинамического гравиметрического полигона за период 1996–1998 годов представлена на рисунке 4.

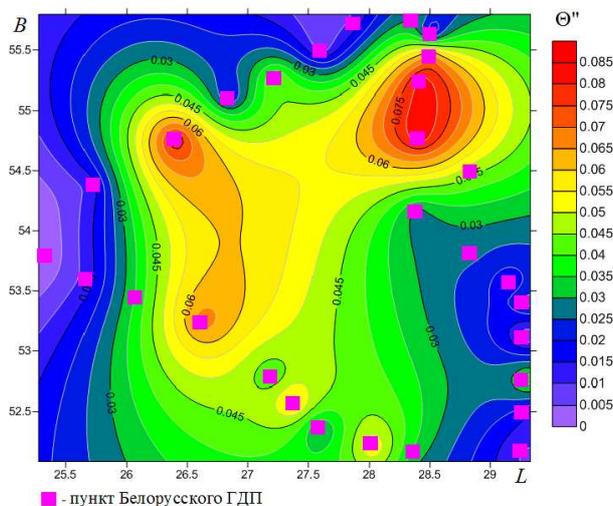


Рисунок 4. – Схема пространственного распределения вариаций направления Θ отбеса для территории Белорусского геодинамического гравиметрического полигона относительно пункта “Лида” (1996–1998)

Согласно таблице 2, максимальные вариации направления отвеса Θ за период 1996–1998 годов наблюдаются в районе Полоцка.

Выполним расчет влияния изменения наклона отвеса Θ за представленный период на результаты геометрического нивелирования, проложенного по линии «Полоцк – Ушачи – Лепель» (таблица 3). Влияние на превышение между точками i и $i + 1$ составит [2]:

$$\Delta h = l \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} \right). \quad (6)$$

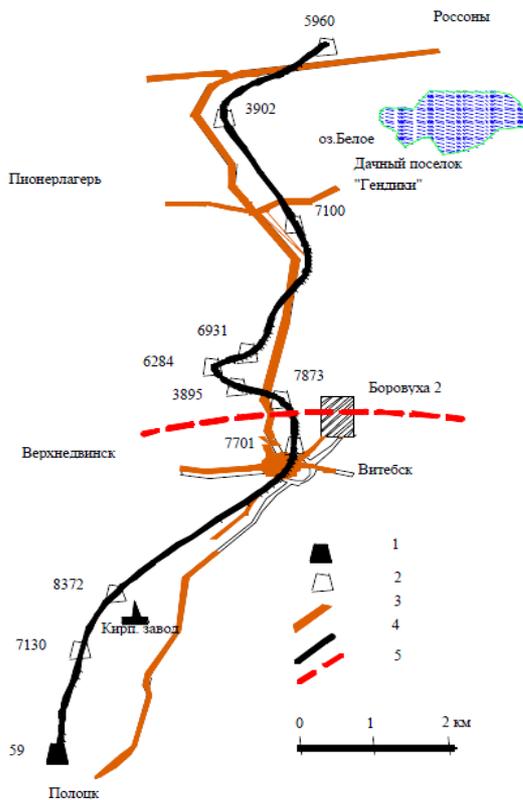
Таблица 3. – Влияние изменения наклона отвеса Θ за период 1996–1998 годов на результаты геометрического нивелирования по линии «Полоцк – Ушачи – Лепель»

Нивелирный ход	L , км	Θ_i , "	Θ_{i+1} , "	Θ_{cp} , "	Δh , мм
Полоцк – Ушачи	45	0,068	0,082	0,075	16,4
Ушачи – Лепель	41	0,082	0,084	0,083	16,5

Согласно таблице 3, представленное изменение высот получено при абсолютной неподвижности исследуемых точек. Рассчитанная величина Δh больше ошибок высокоточного нивелирования. При средней квадратической случайной ошибке $\eta = \pm 0,8$ мм и систематической $\sigma = \pm 0,08$ мм на 1 километр нивелирного хода I класса [15] для нивелирных линий в таблице 3 получим:

$$m = \pm \sqrt{0,8^2 L + 0,08^2 L^2} \approx 6,4 \text{ мм} \text{ – для линии Полоцк – Ушачи} \quad (7)$$

$$m = \pm \sqrt{0,8^2 L + 0,08^2 L^2} \approx 6,1 \text{ мм} \text{ – для линии Ушачи – Лепель}$$



- 1 – нивелирный репер государственной сети;
2 – вновь заложенный нивелирный репер; 3 – дорога;
4 – линия нивелирования; 5 – предполагаемый разлом

Рисунок 5. – Схема расположения реперов на Полоцком геодинамическом профиле

Приняв нивелирную секцию длиной $l = 5$ км для представленных в таблице 3 нивелирных ходов, получим следующее влияние изменения отвеса на превышение по секции: $\Delta h = 1,8$ мм – линия «Полоцк – Ушачи»; $\Delta h = 2,0$ мм – линия «Ушачи – Лепель».

С целью более детального изучения влияния вариаций силы тяжести на выводы вертикальных движений земной коры Беларуси из повторного геометрического нивелирования были привлечены результаты геодезических и гравиметрических измерений на Полоцкий геодинамический профиль.

Геодинамические исследования на Полоцком геодинамическом профиле включали теоретические и практические вопросы определения количественных характеристик современных движений земной коры с максимально возможной точностью по данным повторных геодезических, гравиметрических и магнитометрических измерений. Полоцкий геодинамический профиль включает в себя 12 нивелирных реперов, центры которых заложены на глубину 3,0 метра. Одиннадцать реперов, кроме репера № 59, который входит в ранее созданную сеть государственного высокоточного нивелирования, заложены в 2004 году.

Схема расположения реперов на Полоцком геодинамическом профиле представлена на рисунке 5.

Вариации ускорения силы тяжести на Полоцком профиле определялись на основании инструментальных гравиметрических измерений (таблица 4), выполненных Институтом геохимии и геофизики НАН Беларуси в год выполнения нивелирных работ на профиле (месяц/год): 08.2006–09.2006; 08.2007–09.2007; 08.2008; 08.2009).

Таблица 4. – Вариации силы тяжести на пунктах Полоцкого геодинимического профиля относительно начального цикла – 2006 год

Наименования пунктов	Разности приращений, мГал		
	2007–2006 гг.	2008–2006 гг.	2009–2006 гг.
59	0	0	0
7130	-0,032	-0,353	-0,463
8372	0,994	0,782	1,079
7701	-2,817	-1,879	-2,541
7873	2,447	2,8	1,964
3895	-1,807	-1,454	-0,271
6284	-0,913	-0,871	-0,375
6931	-0,276	1,48	0,417
7100	0,1	-0,892	-0,217
3902	0,163	0,273	0,455
5960	-0,219	-1,084	-0,805

Величины изменения наклона отвеса Θ для пунктов Полоцкого геодинимического профиля для циклов измерений 2007–2006 гг., 2008–2006 гг., 2009–2006 гг. получены при условии равновероятности возмущения силы тяжести по каждой из трех осей декартовых координат согласно (5). Влияние изменения наклона отвеса Θ на результаты повторного геометрического нивелирования, выполненного на Полоцком геодинимическом профиле в различные годы относительно начального цикла (2006 г.), показано в таблице 5. В таблице 6 представлены изменения превышений по секциям, полученные по результатам повторного геометрического нивелирования на профиле.

Таблица 5. – Влияние изменения наклона отвеса Θ на результаты повторного геометрического нивелирования по секциям

№ секции	L, км	Изменения наклона отвеса Θ_{cp} , "			Изменение превышений из-за Θ , Δh , мм		
		2007–2006	2008–2006	2009–2006	2007–2006	2008–2006	2009–2006
59–7130	1,5	0,003	0,035	0,046	0,02	0,25	0,33
7130–8372	1,1	0,103	0,114	0,154	0,55	0,61	0,82
8372–7701	2,2	0,381	0,266	0,362	4,06	2,84	3,86
7701–7873	0,9	0,526	0,468	0,451	2,29	2,04	1,97
7873–3895	0,7	0,425	0,425	0,224	1,44	1,44	0,76
3895–6284	0,5	0,272	0,233	0,065	0,66	0,56	0,16
6284–6931	0,9	0,119	0,235	0,079	0,52	1,02	0,34
6931–7100	2,5	0,038	0,237	0,063	0,46	2,87	0,76
7100–3902	2,5	0,026	0,117	0,067	0,31	1,42	0,81
3902–5960	1,3	0,038	0,136	0,126	0,24	0,86	0,79

Таблица 6. – Изменения превышений по секциям профиля, полученные по результатам повторного геометрического нивелирования [16]

№ секции	2007–2006, мм	2008–2006, мм	2009–2006, мм
59–7130	1,5	-0,3	0,6
7130–8372	-0,4	0	-1,3
8372–7701	-0,3	-0,8	-0,2
7701–7873	0,7	0,8	1,3
7873–3895	0,8	0,8	0,3
3895–6284	0,1	0	0
6284–6931	0,1	0,1	0,3
6931–7100	-1,7	-1,7	-1,6
7100–3902	0,9	-0,1	0,6
3902–5960	0,1	0,1	-0,9

Анализируя изменение превышений по секциям Полоцкого геодинимического профиля (таблица 6) и влияние изменения наклона отвеса Θ на результаты повторного геометрического нивелирования по секциям (таблица 5), можно отметить:

- присутствие связи между максимальными изменениями превышений по секциям, полученными по результатам повторного нивелирования, и максимальными изменениями наклона отвеса;
- для некоторых секций профиля рассмотренные поправки из таблицы 5 сравнимы с выводимыми вертикальными движениями земной коры;
- практически для всех секций профиля изменение превышений из-за изменения наклона отвеса сопоставимо либо превосходит точность нивелирования I класса.

В заключение проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

1) на равнинной территории Беларуси, являющейся спокойной в геологическом отношении, присутствуют значительные изменения поля силы тяжести во времени. Максимальные вариации силы тяжести, по данным Белорусского геодинимического гравиметрического полигона, присутствуют в районе Полоцка и подтверждаются результатами гравиметрических измерений на Полоцком геодинимическом полигоне;

2) анализ максимального влияния изменения наклона отвеса на результаты повторного нивелирования указывает на необходимость учета изменения наклона отвеса как при проложении линий государственного нивелирования, так и при выполнении повторных нивелирных работ на геодинимических полигонах страны;

3) расчет влияния вариаций гравитационного поля на результаты геометрического нивелирования как для линий Белорусского геодинимического гравиметрического полигона, так и для Полоцкого геодинимического профиля показал, что величины изменения превышений из-за изменения наклона отвеса могут быть достаточно велики, а порой сопоставимы и даже превышать ошибки высокоточного нивелирования;

4) представленный анализ влияния изменения наклона отвеса на результаты повторного геометрического нивелирования на Полоцком геодинимическом профиле свидетельствует о том, что фиксируемые геометрическим нивелированием вертикальные движения земной коры в какой-то степени являются кажущимися в связи с влиянием выявленных вариаций поля силы тяжести.

Таким образом, вывод о существовании вертикальных движений, если он основан только на результатах измерений, можно сделать лишь на основании совместной обработки результатов повторного нивелирования и данных по изучению вариаций поля силы тяжести во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юркина, М.И. О совместном определении изменений гравитационного поля и вертикальных движений по повторным гравиметрическим и нивелирным наблюдениям / М.И. Юркина, // Современные движения земной коры. – Новосибирск : Наука, 1976. – С. 154–158.
2. Фотиади Э.Э. Современные движения земной коры (исследования на геодинимических полигонах) / Э.Э. Фотиади : сб. докл. V Межведомственного совещания по изучению современных движений земной коры на геодинимических полигонах. – Новосибирск : Изд-во «Наука», 1978. – 220 с.
3. Огородова, Л.В. Высшая геодезия / Л.В. Огородова. – Москва : Геодэскартиздат, 2006. – 384 с.
4. Закатов, П.С. Курс высшей геодезии / П.С. Закатов. – М. : Недра, 1976. – 510 с.
5. Volger Chr. August. Uber Zeile und Hulfsmittel geometrischer Pracisions-Nivellements / Volger Chr. August. – Munchen : Literarisch-artistische Austalt (Th. Riedel) vormals der Cotta'schen Buch-handlung, 1873.
6. Файтельсон, А.Ш. Влияние вековых изменений силы тяжести на результаты повторного нивелирования / А.Ш. Файтельсон, М.И. Юркина // ДАН СССР. – 1973. – Т. 213, № 6. – С. 1274–1275.
7. Файтельсон, А.Ш. О вековых изменениях силы тяжести и современных вертикальных движениях земной коры / А.Ш. Файтельсон, М.И. Юркина // Геодезия и картография. – 1974. – № 7. – С. 13–19.
8. Буланже, Ю.Д. Неприливные изменения силы тяжести / Ю.Д. Буланже // Повторные гравиметрические наблюдения. Вопросы, теория и результаты : сб. науч. тр. – М., 1980. – С. 44–21.
9. Файтельсон, А.Ш. Вековые изменения силы тяжести и современные вертикальные движения земной коры / А.Ш. Файтельсон, М.И. Юркина // Прикладная геофизика / М-во геологии СССР. Всесоюзный НИИ геофизических методов разведки. – М. : Недра, 1974. – С. 125–129.
10. Юркина, М.И. Определение изменений гравитационного поля и вертикальных движений земной коры по повторным гравиметрическим и нивелирным наблюдениям / М.И. Юркина // Повторные гравиметрические наблюдения : сб. тр. по исследованию неприливных изменений силы тяжести и со-

- путствующих разработок в области аппаратуры и методики работ. – М. : Межведомственный геофизический комитет при Президиуме АН СССР, 1978. – С. 4–9.
11. Файтельсон, А.Ш. Медленные изменения гравитационного поля Земли и современные движения земной коры / А.Ш. Файтельсон, Н.Т. Миронов, М.И. Юркина // Современные движения земной коры (исследования на геодинамических полигонах). – Новосибирск : Наука (Сиб.е отд-ние), 1978. – С. 154–162. – Русский текст доклада 1975 г.
 12. Шароглазова, Г.А. Применение геодезических методов в геодинамике / Г.А. Шароглазова. – Новополюк : ПГУ, 2006. – 196 с.
 13. Еремеев, В.Ф. Теория высот в гравитационном поле Земли / В.Ф. Еремеев, М.И. Юркина // Труды ЦНИИГАиК. – М. : Недра, 1972. – Вып. 191.
 14. Структура мониторинговой геофизической сети и неприливные вариации во времени поля силы тяжести / А. Сас-Ухрыновски [и др.] // Литасфера. – 2001. – № 1. – С. 120–130.
 15. Государственная нивелирная сеть Республики Беларусь. Порядок создания : ТКП 166-2008 (03150) / Госкомимущество. – Минск, 2008.

Поступила 04.06.2018

**EVALUATION OF INFLUENCE OF NON-FOREIGN VARIATIONS OF THE
GRAVITATIONAL FIELD ON PARAMETERS OF VERTICAL DEFORMATIONS
OF THE EARTH CRUST OF BELARUS**

G. SHAROGLAZOVA, K. MARKOVICH

The paper presents an analysis of the influence of variations of the gravitational field on the characteristics of vertical movements of the earth's crust, obtained from repeated geometric leveling, for the territory of the Republic of Belarus. The sizes of change of inclination of plumb are certain on condition of equiprobability of indignation of gravity on each of three axes of cartesian coordinates. The corrections to the results of geometrical leveling, located in places with an extreme change in the slope of the plumb, are calculated.

Keywords: *variations of the gravitational field, changes in the slope of the plumb, repeated geometric leveling, vertical movements of the earth's crust.*