

ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.4(476.5)

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ХРИСТОВА К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

*канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА, д-р техн. наук, доц. В.Н. КОРОВКИН,
А.Н. СОЛОВЬЕВ, С.К. ТОВБАС, И.Н. ЩЕРБИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматриваются вопрос математической обработки и интерпретации результатов повторно-го нивелирования, выполняемого на геодинимических полигонах, метод, позволяющий определить долго-периодическую составляющую скоростей современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) из одновременной обработки трех и более циклов нивелирования. Как известно, данная составляющая определяется согласно действующим нормативным документам при выполнении предпроектных исследований на геодинимических полигонах АЭС и является одним из важнейших параметров при выборе площадки под строительство атомной станции, что делает рассматриваемые вопросы актуальными. Представлен теоретический анализ метода Христового и выполнена его апробация на экспериментальном материале. Показано, что привлечение метода Христового к исследованиям СДЗК не должно носить механический характер, а требует выполнения тщательного анализа имеющегося геодезического материала, так как присутствующая в результатах повторных геодезических измерений короткопериодическая составляющая скоростей движений земной коры может существенно исказить основной фон долгопериодической составляющей в исследуемом районе.

Введение. Метод повторных геодезических измерений широко используется при исследованиях современных движений земной коры (СДЗК). Сам по себе этот метод является простым и предполагает сравнение результатов геодезических измерений, проведенных в разные временные циклы в одном и том же геодезическом построении. Методики выполнения геодезических измерений с заданной точностью к настоящему времени достаточно хорошо отработаны, поэтому за изучение СДЗК смело берутся производственные геодезические предприятия, не имеющие достаточного опыта выполнения научных исследований. Однако такой узкоспециализированный и практически механический подход чаще всего не оправдывает себя, приводит к большим материальным затратам и не достигает цели исследований, так как проблема изучения СДЗК является достаточно сложной в научном плане и требует комплексного подхода различных наук о Земле. Дело в том, что геодезические измерения фиксируют состояние земной поверхности в точке расположения геодезического центра в момент выполнения измерений. На это состояние могут влиять различные факторы: глубинные тектонические процессы, ответственные за так называемые медленные СДЗК и вызывающие закономерные всковые колебания тектонических блоков или тектонических структур, сезонные колебания грунта, техногенные влияния, а также некоторые короткопериодические движения, возможно, также тектонического происхождения, но не подчиняющиеся закономерностям и носящие скорее случайный характер. Ввиду того, что геодезия фиксирует результирующее влияние всех перечисленных факторов на состояние земной коры, математическая обработка результатов повторных геодезических измерений и особенно их интерпретация сильно осложняются. Поясним это на примере анализа результатов повторного нивелирования.

По данным повторного нивелирования обычно получают такие параметры деформаций земной коры, как разности отметок реперов и скорости вертикальных движений реперов в единицу времени. В простейшем случае определения параметров предполагают линейный характер изменения скоростей движений как между соседними реперами, так и между хронологически смежными циклами. Скорости вертикальных движений реперов и их средние квадратические ошибки здесь получают по формулам:

$$V_k = \frac{\Delta H_k}{T_2 - T_1} = \frac{\sum (\Delta h_{ik})}{T_2 - T_1}; \quad (1)$$

$$\Delta h_{ik} = \Delta h_{ik}^{T_2} - h_{ik}^{T_1}; \quad (2)$$

$$m_{\Delta h_{ik}} = \sqrt{(\eta_{T_1}^2 + \eta_{T_2}^2) l_{ik}}; \quad (3)$$

$$m_{\Delta H_k} m_{\sum \Delta h_{ik}} = \sqrt{(\eta_{T_1}^2 + \eta_{T_2}^2) \sum l_{ik}}. \quad (4)$$

В формулах (1) – (4): T_1 и T_2 – сравниваемые эпохи (циклы) нивелирования; Δh_{ik} – разности превышений по секции ik между циклами нивелирования; $\sum \Delta h_{ik}$ – накопление разностей превышений между циклами вдоль анализируемой линии относительно начального репера; V_k – скорость вертикального движения репера в период между сравниваемыми нивелировками; ΔH_k – разности отметок реперов между циклами; l_{ik} – длина секции в км; $\sum l_{ik}$ – расстояние в км от начального до текущего репера; η_{T_1} и η_{T_2} – случайные средние квадратические ошибки нивелирования, полученные, соответственно, в эпохи T_1 и T_2 .

Данные формулы использовались и при составлении карты современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) СССР [1]. Полученные по ним скорости вертикальных движений реперов по линиям затем уравнивались параметрическим методом по способу наименьших квадратов. Как известно, карты СВДЗК должны нести информацию о медленных движениях земной коры, имеющих закономерный колебательный характер с периодом порядка одного века. Ввиду того, что результаты повторных геодезических измерений фиксируют результирующее влияние различных факторов на состояние земной коры и ее верхней части земной поверхности, то показанные на карте СВДЗК скорости будут неизбежно содержать эти влияния и исказить фон медленных движений земной коры.

Подобная проблема может возникнуть и при анализе результатов повторного нивелирования на различных геодинимических полигонах. Поэтому представилось целесообразным при интерпретации результатов повторных геодезических измерений выделить из СВДЗК две составляющие движения: фоновую (долгопериодическую) часть, характеризующую постоянством скорости в течение достаточно длительного промежутка времени, и переменную (короткопериодическую), представляющую флуктуации относительно этого фона. Согласно привычному разделению современных движений земной коры на медленные, предвестниковые и быстрые, фоновая или долгопериодическая составляющая этих движений, вероятнее всего, будет отвечать за медленные или вековые движения.

Известно, что долгопериодическую составляющую скорости СВДЗК определяют по методу Христовова [6]. Этот метод внедрен в нормативные технические документы России и Беларуси [3, 4] и широко используется при анализе результатов повторного нивелирования на геодинимических полигонах проектируемых атомных электростанций. Однако выполненный нами анализ алгоритмов метода Христовова показал, что данный метод не является панацеей при решении сложной проблемы исследования СДЗК и при механическом его применении долгопериодическая составляющая скорости может существенно исказиться неизменно присутствующими в результатах геодезических наблюдений короткопериодическими влияниями. Покажем это на примере экспериментального материала, состоящего из четырех циклов высокоточного нивелирования на Полоцком геодинимическом профиле [2, 5].

Определение долгопериодической компоненты скоростей на Полоцком профиле. Метод Христовова делает возможным совместную обработку всех имеющихся на район исследований циклов нивелирования и позволяет определить наиболее вероятные величины скоростей. Этот метод предусматривает совместное определение скоростей движения и высот реперов с использованием полиномов в функции времени, т.е. высота каждого репера представляется в виде суммы высоты, отнесенной к произвольно выбираемой начальной эпохе, и полинома некоторого порядка в функции времени. В этом случае коэффициенты полинома имеют определенный физический смысл (скорость, ускорение). Выбор порядка полинома, т.е. степени сложности математической модели, описывающей движение репера, зависит от количества исполненных циклов измерений. Обычно при определении только скоростей движения (полином 1-го порядка) число исполненных циклов не должно быть менее четырех, в крайнем случае трех, а при определении также и ускорений (полином 2-го порядка) оно должно быть не менее шести. На Полоцком геодинимическом профиле выполнено четыре цикла нивелирования (2004, 2005, 2006, 2007 гг.), поэтому при их совместном уравнивании использовался только полином первого порядка и соответственно определялись только скорости движения реперов. В этом случае высота реперов A и B секции AB для i -го цикла нивелирования представлялась в виде:

$$H_A^i = H_A^0 + V_A(T_i - T_0); \quad (5)$$

$$H_B^i = H_B^0 + V_B(T_i - T_0), \quad (6)$$

где T_0 – начальная эпоха, к которой приводятся данные нивелирования (при обработке принято $T_0 = 2003$ г.); T_i – эпоха выполнения i -го цикла измерений; V_A , V_B – скорости вертикальных движений реперов A и B (мм/год), получаемые в результате уравнивания; H_A^0 , H_B^0 , H_A^i , H_B^i – высоты реперов A и B соответственно в эпохи T_0 , T_i .

Уравнения погрешностей для каждого цикла наблюдений имеют следующий вид:

$$v_{AB}^i = -\delta H_A^i + \delta H_B^i - \Delta T_i V_A + \Delta T_i V_B - [(H_B^i - H_A^i) - h_{AB}^i], \quad (7)$$

где v_{AB}^i – поправка в разности скоростей движений реперов A и B ; H_A^i, H_B^i – приближенные высоты реперов в эпоху, принятую за исходную; δH_A^i и δH_B^i – поправки в приближенные высоты, которые необходимы для получения высот H_A^0, H_B^0 на исходную эпоху; h_{AB}^i – превышения между реперами A и B , измеренные в эпохи T_i ; $\Delta T_i = T_i - T_0$; V_A, V_B – величины скоростей вертикальных движений реперов A и B .

Таким образом, измеренному превышению в каждом цикле соответствует одно уравнение погрешностей. Полоцкий профиль состоит из одиннадцати реперов (рис. 1), один из которых при обработке принят за исходный (репер № 59). Число уравнений погрешностей вида (7) для этого случая равно 40.

Вес измерений P_i при уравнивании принят равным $\frac{1}{S_i}$, где S_i – длина секции в км.

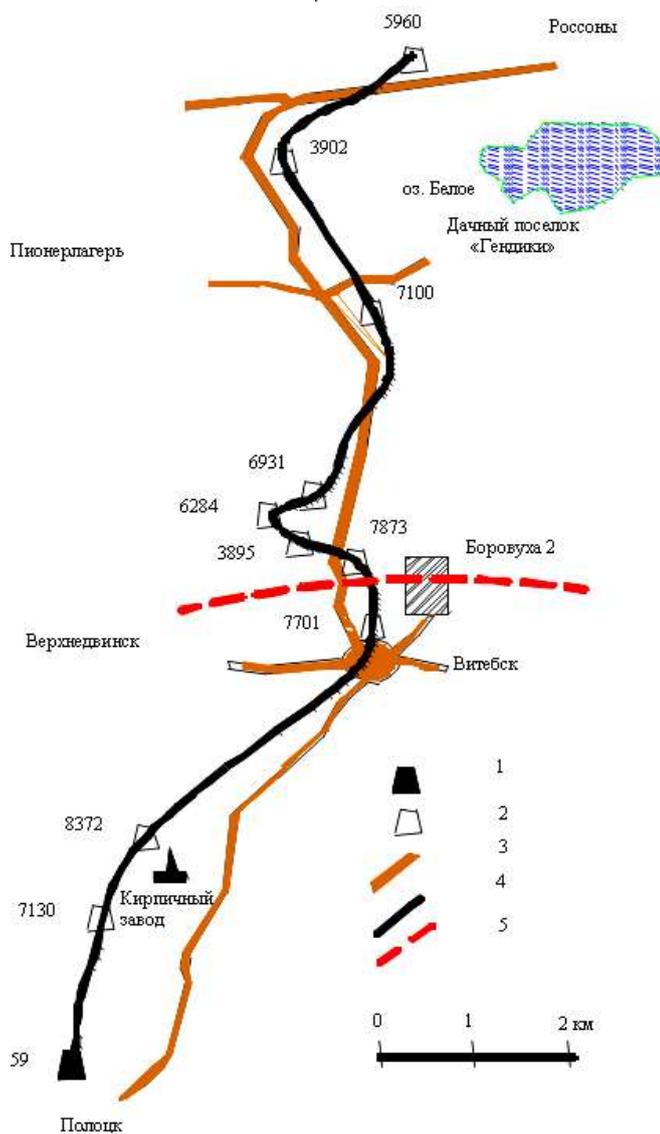


Рис. 1. Схема расположения реперов на Полоцком геодинатическом профиле:
 1 – нивелирный репер государственной сети; 2 – вновь заложенный нивелирный репер;
 3 – дорога; 4 – линия нивелирования; 5 – предполагаемый разлом

Система нормальных уравнений получена по обычной методике и имеет вид:

$$N \cdot \delta X + L = 0 \tag{8}$$

откуда

$$\delta X = -Q \cdot L, \tag{9}$$

где $N = A^T P A$ – матрица коэффициентов нормальных уравнений; A – матрица коэффициентов уравнений погрешностей; $L = A^T P l$ – вектор свободных членов нормальных уравнений; l – вектор свободных членов

уравнений погрешностей; $Q = N^{-1}$ – обратная весовая матрица; δX – вектор-столбец неизвестных (поправки δH в приближенные высоты начальной эпохи и параметры движения, т.е. долгопериодические составляющие скоростей V вертикальных перемещений реперов); P – диагональная матрица весов

Точность полученных неизвестных оценивается по формулам:

$$m_0 = \sqrt{\frac{[Pv v]}{n - k}}; \quad (10)$$

$$m_x = m_0 \sqrt{Q_{xx}}, \quad (11)$$

где n – число уравнений погрешностей; k – число неизвестных; m_0 – средняя квадратическая ошибка единицы веса; Q_{xx} – обратный вес неизвестного, полученный как соответствующий диагональный член обращенной матрицы нормальных уравнений; $[Pv v]$ – взвешенная сумма квадратов поправок, v определяется по формуле (7).

Результаты уравнивания представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты определения долгопериодического компонента скоростей V из уравнивания 4-х циклов нивелирования (2004, 2005, 2006, 2007 гг.) на Полоцком профиле

№ п/п	Название репера	H' , м	δH , мм	H_0 , м	V , мм/год	m_H , мм	m_V , мм
1	59 (исх.)	200,0000		200,0000	0,0		
2	7130	205,4000	0,6	205,4006	1,2	4,8	1,7
3	8372	206,6500	-9,0	206,6410	4,7	6,0	2,2
4	7701	214,2500	4,3	214,2544	0,0	8,2	3,0
5	7873	215,9600	0,9	215,9610	2,1	8,8	3,2
6	3895	214,1700	-1,6	214,1685	2,3	9,2	3,4
7	6284	214,4800	-0,1	214,4799	2,4	9,3	3,4
8	6931	212,7400	-1,5	212,7386	2,2	9,6	3,5
9	7100	203,7100	-0,7	203,7093	1,7	11,0	4,0
10	3902	200,9600	1,2	200,9612	1,5	12,2	4,5
11	5960	213,6400	-3,6	213,6364	2,6	13,1	4,8

Для сравнения в таблице 2 даны результаты уравнивания по методу Христового 3-х циклов нивелирования (2004, 2006, 2007 гг.), анализ которых будет дан в разделе, посвященном интерпретации результатов.

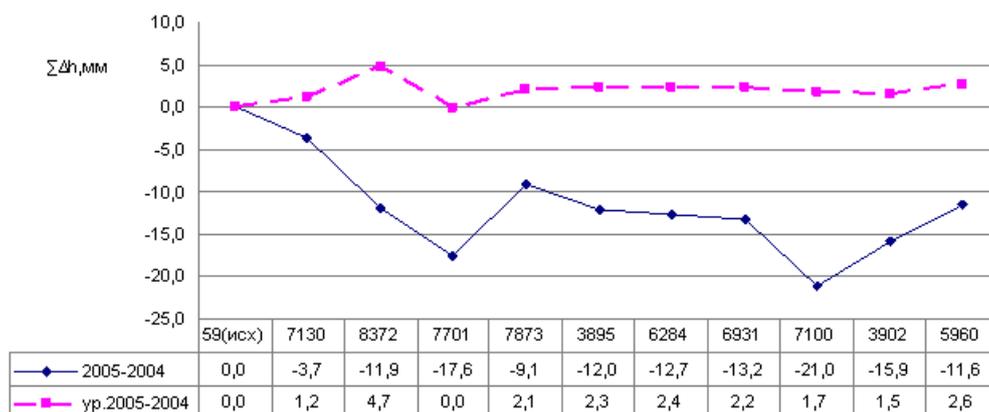
Таблица 2

Результаты определения долгопериодического компонента скоростей V из уравнивания 3-х циклов нивелирования (2004, 2006 и 2007 гг.) на Полоцком профиле

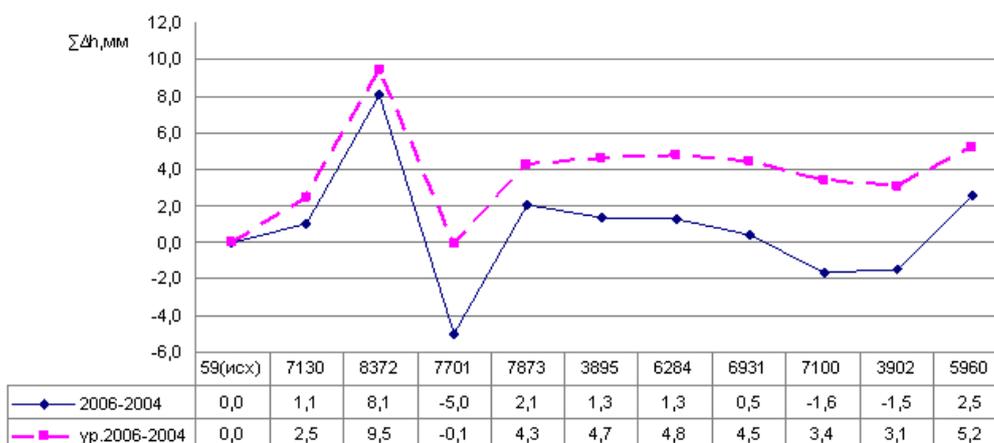
№ п/п	Название репера	H' , м	δH , мм	H_0 , м	V , мм/год	m_H , мм	m_V , мм
1	59 (исх.)	200,0000		200,0000	0,0		
2	7130	205,4028	2,8	205,4056	0,8	2,2	0,7
3	8372	206,6488	-1,2	206,6475	3,2	2,7	0,9
4	7701	214,2621	12,1	214,2743	-1,6	3,7	1,3
5	7873	215,9660	6,0	215,9721	1,1	4,0	1,3
6	3895	214,1749	4,9	214,1798	1,0	4,2	1,4
7	6284	214,4867	6,7	214,4933	1,0	4,2	1,4
8	6931	212,7454	5,4	212,7509	0,9	4,3	1,5
9	7100	203,7195	9,5	203,7290	-0,3	5,0	1,7
10	3902	200,9690	9,0	200,9779	0,0	5,5	1,9
11	5960	213,6429	2,9	213,6457	1,3	5,9	2,0

Интерпретация результатов экспериментальных исследований на Полоцком геодинамическом профиле. Практическое использование метода Христова в настоящее время нацелено на выделение фоновой (долгопериодической) составляющей движений земной коры, характеризуемой постоянством скорости на длительном временном интервале, и фактически не затрагивает вопроса оценки переменной (короткопериодической) части, представляющей собой флуктуации относительно этого фона. Однако короткопериодическая составляющая СДЗК реально существует, и она может присутствовать либо во всех обрабатываемых циклах наблюдений, либо доминировать только в некоторых из них. При этом вопрос о влиянии переменной составляющей на долгопериодический компонент скорости, определяемый по методу Христова, часто остается открытым. Чтобы ответить на него, проанализируем данные таблиц 1 и 2, полученные по методу Христова для Полоцкого геодинамического профиля, а также результаты прежних исследований [2, 5]. В указанных работах в качестве основного параметра вертикальных движений взяты разности отметок реперов между циклами, найденные согласно формулам (1) – (4) относительно нивелирования 2004 года, а также хронологически смежными циклами (измеренные годовые скорости вертикальных движений реперов). Их анализ свидетельствует, что на Полоцком профиле наблюдается короткопериодическая составляющая скоростей движений земной коры, наиболее сильно проявившаяся в результатах нивелирования 2005 года.

Теперь сравним разности отметок реперов между всеми циклами относительно 2004 года, вычисленные как накопление разностей измеренных превышений (формулы (1) – (4)), с аналогичными разностями отметок, полученных по формулам (5) – (6), в которых H_0 и V найдены по методу Христова (см. табл. 1, 2). Результаты сравнения представлены на рисунках 2, 3.



а)

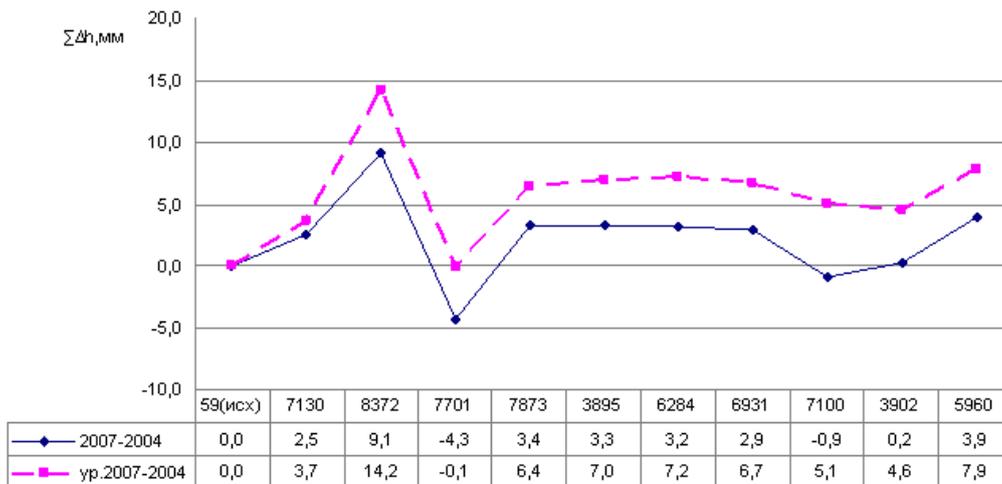


б)

Рис. 2. Разности отметок реперов на Полоцком профиле, полученных из обработки 4-х циклов нивелирования – 2004, 2005, 2006 и 2007 гг.:

а – ($H_{2005} - H_{2004}$); б – ($H_{2006} - H_{2004}$); в – ($H_{2007} - H_{2004}$);

—◆— – по измеренным превышениям; —■— – по методу Христова (см. также с. 104)



в)

Рис. 2. Окончание



а)



б)

Рис. 3. Разности отметок реперов на Полоцком профиле, полученных из обработки 3-х циклов нивелирования – 2004, 2006 и 2007 гг.: а – ($H_{2006} - H_{2004}$); б – ($H_{2007} - H_{2004}$)

—◆— – по измеренным превышениям; —■— – по методу Христова

Рисунок 2 иллюстрирует результаты математической обработки четырех циклов нивелирования, т.е. с включением эпохи 2005 года, в которой проявляются значительные переменные короткопериодические движения земной коры, наблюдается существенная несогласованность сравниваемых графиков. При этом максимальная рассогласованность графиков наблюдается на рисунке 2, а, содержащем данные 2005 года, где кривая разностей отметок, полученных по методу Христова, в среднем на 15 – 20 мм находится выше кривой разностей отметок, найденных по разностям измеренных превышений. Факт наличия на исследуемом профиле короткопериодической составляющей движений отразился на графиках, представленных на рисунке 2, б ($H_{2006} - H_{2004}$) и рисунке 2, в ($H_{2007} - H_{2004}$), на которых кривая (метод Христова) расположена выше кривой по измеренным превышениям примерно на 5 мм. Эти 5 мм можно расценивать как влияние короткопериодической составляющей СДЗК, выявленной на Полоцком геодинамическом профиле в 2005 году.

На рисунках 3, иллюстрирующих результаты математической обработки трех циклов нивелирования (эпоха 2005 года исключена), картина противоположна предыдущей, так как кривые графиков, изображенные на рисунке 3, а и рисунке 3, б хорошо согласуются между собой, что можно расценивать как надежность определения долгопериодической составляющей движений по методу Христова в этом случае.

Заключение. Выполненный анализ применения метода Христова на Полоцком геодинамическом профиле показал, что короткопериодическая составляющая скоростей движений земной коры, максимально проявившаяся в результатах нивелирования 2005 года, существенно искажает основной фон долгопериодической составляющей скоростей в этом районе. Поэтому применение метода Христова при изучении СДЗК не должно носить механический характер, а требует выполнения тщательного анализа имеющегося геодезического материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карта современных вертикальных движений земной коры СССР. – М.: ГУГК СССР, 1988.
2. Каратаев, Г.И. Оценка тектонического состояния земной коры в районе каскада ГЭС на реке Западная Двина по данным инструментальных исследований / Г.И. Каратаев, С.К. Товбас, Г.А. Шароглазова // Геодезия и кадастры. Прошлое, настоящее и будущее: труды междунар. науч. конф. – Новополоцк: ПГУ, 2006. – С. 28 – 42.
3. Остац, О.М. Методическое руководство по геодезическим работам на геодинамических полигонах / О.М. Остац, В.Н. Дмитроченков. – М.: ЦНИИГАиК, 1984.
4. Руководящий технический материал по изучению деформаций земной поверхности геодезическими методами на полигонах атомных электростанций: ГКИНП-10-186-84. – М.: ЦНИИГАиК, 1984.
5. Результаты инструментальных исследований 2004 – 2007 годов на Полоцком геодинамическом профиле / Г.А. Шароглазова [и др.] // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – СПб., 2008. – № 3.
6. Hristov, W.K. Gemeinsame Ausgleichung von Hohen und Vertikalgeschwindigkeiten eines Nivellierungsnetzes / W.K. Hristov. – Acta Geodaet., Geophys. Et Montanist., Acad. Sci. Hung. – 1974. – Т. 9(1 – 2), S. 147 – 151.

Поступила 01.09.2008