

О ПРИМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРОННОГО НИВЕЛИРА, GPS-ПРИЕМНИКОВ И УСТАНОВКИ «ГЕОРАДАР» НА ПОЛОЦКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПРОФИЛЕ

*Товбас С.К.; Шароглазова Г.А., канд. техн. наук, доц.;
Кремнев А.П., канд. техн. наук, доц.; Поляков А.Н.
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматриваются вопросы применения нового оборудования (электронного нивелира DN03, GPS-приемников и установки «Георадар») на Полоцком геодинамическом профиле, приобретенного Полоцким государственным университетом в 2008 году в рамках научных программ.

Геодинамические исследования на Полоцком профиле, расположенном в Полоцко-Курземской зоне тектонических разломов, выполняются с 2004 года [1 – 3] и включают теоретические и практические вопросы определения количественных характеристик современных движений земной коры (СДЗК) с максимально возможной точностью по данным повторных геодезических измерений. Получение этих характеристик направлено на уточнение местоположения тектонических нарушений, пересекаемых Полоцким профилем, и установление их степени активности в настоящее время.

Следует отметить, что при кажущейся простоте метода повторных геодезических измерений нахождение параметров деформаций земной коры с его помощью связано с определенными трудностями, обусловленными прежде всего тем, что сопоставление результатов повторных измерений дает информацию о взаимных смещениях центров геодезических пунктов, вызванных не только СДЗК, но и колебаниями грунта нетектонического происхождения. Кроме того, сами по себе СДЗК являются результатом наложения нескольких видов движений: медленных или вековых движений земной коры с закономерным характером проявления (унаследованной или долгопериодической составляющей) и многочисленными флуктуациями на их фоне, не подчиняющимися строгой закономерности (короткопериодическая составляющая).

Данное обстоятельство затрудняет интерпретацию повторных геодезических измерений и требует комплексного подхода различных наук о Земле к исследованию СДЗК, а также применения различных средств измерений. Подобный подход мы и пытаемся осуществить на практике при выполнении геодинамических исследований на Полоцком профиле, что

следует из таблицы 1, в которой представлены виды проводимых на нем инструментальных исследований.

Таблица 1

Виды инструментальных исследований,
выполненных на Полоцком геодинамическом профиле

№ п/п	Наименование исследования	Номер и год выполнения циклов	Используемое оборудование	Организация, выполнявшая исследование
1.	Производство пяти циклов высокоточного нивелирования	1) 2004 2) 2005 3) 2006 4) 2007 5) 2008	Нивелир Н05 Нивелир Н05 Нивелир Dini 12 Нивелир Dini 12 Нивелир DN03	Полоцкий государственный университет (ПГУ)
2.	Производство двух циклов высокоточных спутниковых измерений	1) 2004 2) 2008	GPS TRIMBLE GPS TRIMBLE	РУП «Белэрокоосмогеодезия» ПГУ
4.	Геофизические исследования (гравиметрические и магнитометрические наблюдения)	1) 2005 2) 2006 3) 2007		Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси
5.	Георадарная съемка на участке профиля длиной 2 км	2008	Установка «Георадар»	ПГУ

Известно, что при выполнении инструментальных геодинамических исследований следует сохранять неизменными методики измерений и приборы от цикла к циклу, что приводит к максимальной компенсации влияний систематических ошибок в разностях результатов измерений, по которым определяются параметры движений земной коры.

В связи с приобретением нового оборудования в 2008 году нам не удалось выполнить это требование. Поэтому при интерпретации результатов сравнения геодезических измерений 2008 года с предыдущими циклами было обращено особое внимание на возможность присутствия в них систематических ошибок, вызванных применением различных приборов. Наиболее актуальным этот вопрос является для вновь приобретенного нивелирного комплекта, так как на Полоцком профиле в 2008 году выполнялся уже 5-й цикл нивелирования.

Исследование результатов нивелирования. При анализе результатов нивелирных измерений были привлечены три цикла наблюдений на Полоцком профиле (2006, 2007 и 2008 гг.), из которых первые два выполнялись одним и тем же комплектом электронного нивелира Dini 12 с соответствующими ему штрихкодowymi рейками, а третий цикл – другим, равноценным ему по точности новым комплектом нивелира DN03 с рейками (рис. 1). Результаты сравнения представлены на рисунке 2.

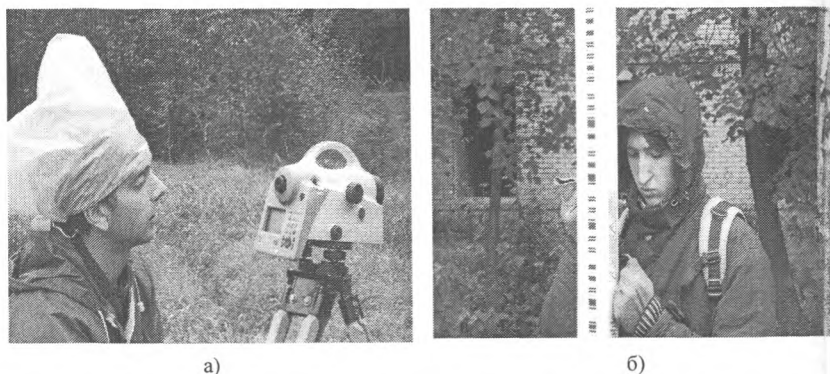


Рис. 1. Комплект высокоточного нивелира DN03 (а) со штрихкодowymi рейками (б)

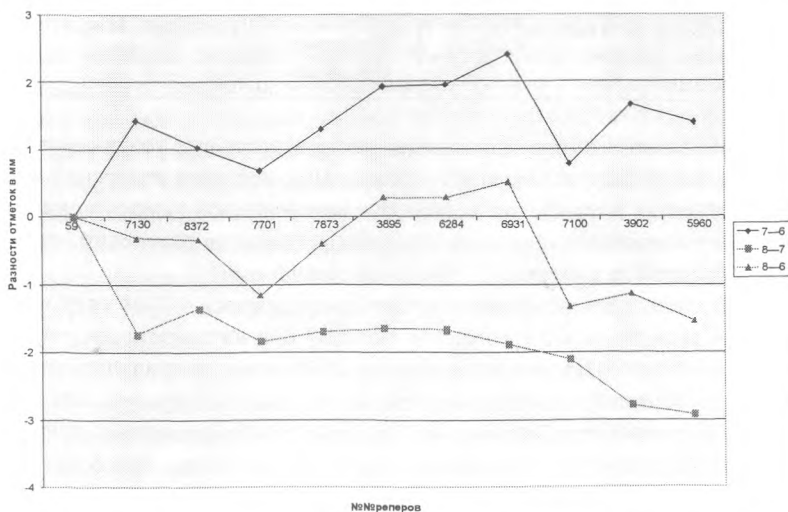


Рис. 2. Графики вертикальных движений нивелирных знаков на Полоцком профиле

В принципе характер графиков на данном профиле может вызвать предположение, что в разностях отметок реперов между 2008 и 2007 годом присутствует некоторая систематика, вызванная тем, что метровые интервалы для штрихкодowych реек комплекта DN03 предположительно отличаются от метровых интервалов аналогичных реек комплекта DINI 12.

Поэтому был выполнен дополнительный анализ разностей превышений по секциям (табл. 2).

Таблица 2

Разности превышений между циклами на Полоцком профиле, полученные при использовании в сравниваемых циклах одинаковых (2007 – 6) и различных (2008 – 7) нивелирных комплектов

Превышение h , м	Длина секции, км	Разности превышений Δh , мм	
		(2007 – 6) одинаковыми нивелирными комплектами	(2008 – 7) разными нивелирными комплектами
0,31174	0,1	0,02	-0,02
1,25484	1,0	-0,40	0,32
1,71326	0,8	0,62	0,14
-1,74212	0,5	0,45	-0,22
1,79182	0,6	0,63	0,05
-2,74991	2,1	0,87	-0,68
5,40475	1,8	1,42	-1,74
7,5964	2,5	-0,34	-0,48
-9,0293	2,3	-1,62	-0,22
12,6788	1,8	-0,30	-0,14

Из таблицы 2 следует, что разности превышений между эпохами не зависят от величины превышения и длины секции, а статистическое распределение разностей при использовании одного и того же нивелирного комплекта (2007 – 6) и различных (2008 – 7) примерно одинаково. Так как присутствие систематики в данном случае должно выразиться прежде всего в зависимости разностей превышений (2008 – 7) от величины превышения, то можно сделать вывод, что в данном (конкретном) случае применение различных комплектов электронных нивелиров не вызвало систематических искажений в параметрах вертикальных деформаций.

Работа с GPS-оборудованием на Полоцком профиле. Комплект испытуемого спутникового оборудования включает две антенны типа R7, одну антенну типа R8 и три двухчастотных приемника. Выполнение спутниковых измерений GPS-приемниками представлено на рисунке 3.



Рис. 3. Выполнение спутниковых измерений GPS-приемниками фирмы TRIMBLE на Полоцком профиле

Ввиду того, что оборудование предполагается использовать в геодезических исследованиях с целью получения параметров СДЗК с наивысшей точностью, то при его проверке был сделан акцент на стабильность поведения фазовых центров антенн и возможность введения поправки в длину измеряемой стороны за смещение этих центров относительно геометрических.

Как пояснение отметим, что антенна спутникового приемника характеризуется двумя центрами: механическим или геометрическим центром положение которого при работе совмещают с центром геодезического пункта, и фазовым или электрическим центром, на который поступают сигналы со спутника и, следовательно, к нему отнесены все измерения. Фазовые центры всех антенн, строго говоря, не совпадают с их геометрическими центрами на некоторую величину, которую можно разложить на две составляющие:

1-я составляющая определяется только электрической схемой или типом антенны, носит закономерный характер, и ее учет при приведении результатов измерений к центрам геодезических знаков можно выполнить

по схеме вычисления поправок за центрировку и редукцию в длины линий при условии единообразной ориентировки антенн на концах линии на север по формуле:

$$\delta l_{ik} = \delta x_i \cos A_{ik} + \delta y_i \sin A_{ik} + \delta x_k \cos A_{ki} + \delta y_k \sin A_{ki} , \quad (1)$$

где δl_{ik} – поправка в горизонтальное проложение линии $i - k$ за влияние 1-й составляющей отклонения фазовых центров антенн, расположенных на концах линии, от геометрических центров этих антенн (центров знаков); $\delta x_i, \delta y_i, \delta x_k, \delta y_k$ – величины отклонений фазовых центров от геометрических по осям x и y на конечных пунктах линии $i - k$; A_{ik}, A_{ki} – прямой и обратный азимут линии $i - k$;

2-я составляющая, колебание которой в процессе измерений может зависеть от ориентации самой антенны, а также направления на спутник и его возвышения. Учет этой составляющей затруднителен, прежде всего, из-за большого числа наблюдений на спутник. Поэтому методика спутниковых измерений предусматривает единообразную ориентировку антенн приемников на север, а фирмы-изготовители стараются обеспечить стабильность положения фазового центра антенны вне зависимости от положения спутников или конфигурации наблюдаемого созвездия.

Исходя из этого мы попытались определить величины смещений по осям координат для формулы (1), т.е. для 1-й составляющей, с тем, чтобы в дальнейшем ввести поправки в измеренные длины линий за отклонения фазовых центров антенн.

Для исследования смещений указанных центров был создан эталонный миниполигон в виде равнобедренного прямоугольного треугольника, один из катетов которого ориентирован строго на север, а второй – на восток (рис. 4). Длины катетов порядка 10 м.

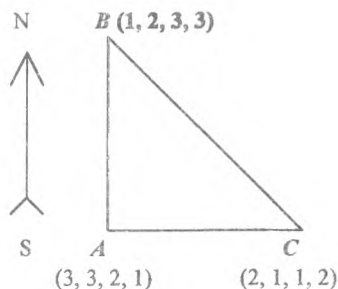


Рис. 4. Схема эталонного GPS-полигона

На рисунке 4 показаны названия пунктов – *A, B, C*, в скобках даны номера расстановок приемных станций (антенна – приемник).

Длины линий *AB, BC, CA* полигона были измерены компарированной рулеткой со средней квадратической погрешностью 0,5 мм. Превышения по этим линиям определены высокоточным нивелиром с невязкой менее 1 мм. Результаты измерений традиционными методами были приняты за эталонные (табл. 3).

Таблица 3

Результаты измерений длин линий и превышений классическими методами и испытываемой спутниковой аппаратурой

Номер расстановки	Номера антенн	Направл. линии (азимут)	Измер. линия, м	Эталон. линия, м	$S_{изм} - S_{эт.}$, мм	Измер. превыш., м	Эталон. превыш., м	$h_{изм} - h_{эт.}$, мм
1	3 – 1	A – B (0)	9,999	10,0030	–4,0	–0,006	–0,0120	6,0
	2 – 1	C – B (315)	14,146	14,1460	0,0	0,076	0,0775	1,5
	2 – 3	C – A (270)	10,006	10,0105	–4,5	0,083	0,0895	–6,5
2	3 – 2	A – B(0)	9,999	10,0030	–4,0	–0,006	–0,0120	6,0
	1 – 2	C – B(315)	14,147	14,1460	1,0	0,079	0,0775	1,5
	1 – 3	C – A(270)	10,007	10,0105	–3,5	0,083	0,0895	–6,5
3	2 – 3	A – B(0)	10,006	10,0030	3,0	–0,017	–0,0120	–5,0
	1 – 3	C – B(315)	14,146	14,1460	0,0	0,071	0,0775	–6,5
	1 – 2	C – A(270)	10,010	10,0105	–0,5	0,088	0,0895	–1,5
4	1 – 3	A – B(0)	10,006	10,0030	3,0	–0,015	–0,0120	–3,0
	2 – 3	C – B(315)	14,147	14,1460	1,0	0,076	0,0775	–1,5
	2 – 1	C – A(270)	10,009	10,0105	–1,5	0,091	0,0895	1,5

Измерения линий эталонного полигона испытываемым спутниковым оборудованием были произведены четырьмя сеансами при четырех расстановках приемных станций ((антенна + приемник), обозначенных 1, 2, 3) на пунктах полигона (см. рис. 4). В каждой расстановке антенны ориентированы единообразно относительно направления юг – север. В каждой из расстановок они синхронно работают по 20 минут.

Результаты спутниковых измерений элементов полигона представлены в таблице 3 как измеренные.

Полученные разности между измеренными и эталонными значениями далее обрабатывались по СНК относительно антенны 1.

Найденные величины смещений фазовых центров антенн относительно их геометрических центров по осям координат даны в таблице 4.

Таблица 4

Смещения фазовых центров антенн относительно их геометрических центров

Составляющие смещений по осям координат	Смещения фазовых центров антенн относительно геометрических		
	номера антенн		
	1	2	3
δx	0	+0,1	-3,8
δy	0	+0,5	-3,5

Оценка определения смещений $m = 0,37$ мм.

Все измеренные длины линий в таблице 2 были исправлены поправками, вычисленными по формуле (1).

Далее по отклонениям исправленных длин линий от эталонных была выполнена оценка точности прибора в плане согласно формуле (2):

$$M = \sqrt{\frac{\delta^2}{n}}, \quad (2)$$

где δ – полученные отклонения исправленных длин линий от эталонных; n – количество измерений; M – приборная точность в плане (M получили равной 0,63 мм).

Аналогичные действия были произведены для высотной составляющей. Оценка точности по отклонению исправленных превышений от эталонных дала оценку в 1,6 мм.

Из приведенных оценок следует, что результаты выполненных исследований GPS-оборудования позволяют сделать вывод о возможности его применения в геодинимических исследованиях не только на обширных территориях, но и на локальных полигонах.

Применение георадара на Полоцком геодинимическом профиле. Георадар – это прибор, позволяющий просвечивать горные породы с помощью радиоволн. Он производит излучение импульсов электромагнитных волн в зондируемую среду, а затем регистрирует сигналы, отраженные от границ раздела слоев этой среды, имеющих различие по диэлектрической проницаемости.

При помощи георадаров различных типов решается широкий спектр задач, в том числе и геологических, с целью поиска и исследования тектонических разломов. Частотный диапазон зондирующих сигналов довольно широк и обычно лежит в пределах 25 – 2400 МГц.

Использование зондирующих импульсов низкой частоты позволяет получать информацию с больших глубин, но с низкой разрешающей способностью (порядка метра). При повышении частоты зондирования разрешающая способность возрастает, но при этом уменьшается глубина зондирования.

Результатом георадиолокационного зондирования является радарограмма – массив амплитуд отражённых сигналов с дополнительной информацией по каждому шагу зондирования, записанный в файл.

Полоцким государственным университетом в 2007 году был приобретён георадар ProEx производства фирмы Mala GeoScience AB (Швеция) с комплектом экранированных (100, 250, 500, 800, 1200, 1600, 2300 МГц) и неэкранированных антенн (25, 50, 100, 200 МГц).

Неэкранированные антенны предназначены для работы на больших глубинах. В конструкции экранированных антенн для минимизации помех применён поглощающий экран, что позволяет работать в условиях городской застройки.

Поскольку данная модель георадара представляет собой модульную систему, то её конфигурация подбирается в зависимости от поставленной задачи с любой комбинацией антенных блоков. Примером может служить георадарная съёмка на участке Полоцкого геодинамического профиля, выполненная с целью оценки возможности использования данного оборудования при решении геодинамических задач (рис. 5).



Рис. 5. Выполнение георадарной съёмки на участке Полоцкого профиля

Ввиду того, что при изучении тектонических разломов необходимо обеспечить максимальную глубину просвечивания, использовались незранированная антенна на 25 МГц и экранированная на 250 МГц.

Трасса георадарной съемки и полученная радарограмма показаны на рисунках 6 и 7 соответственно.

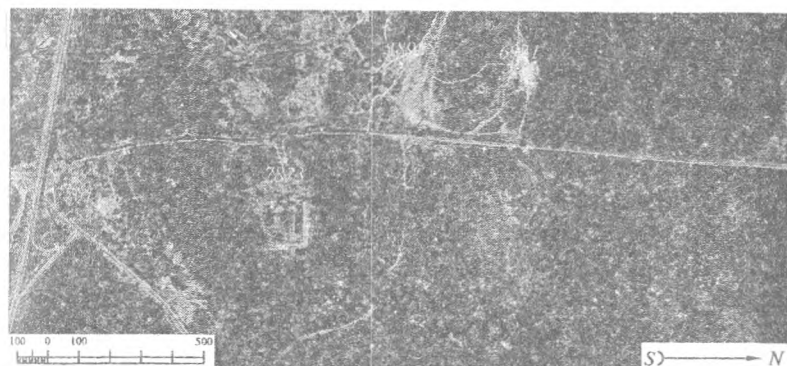


Рис. 6. Трасса георадарной съемки между нивелирными пунктами профиля

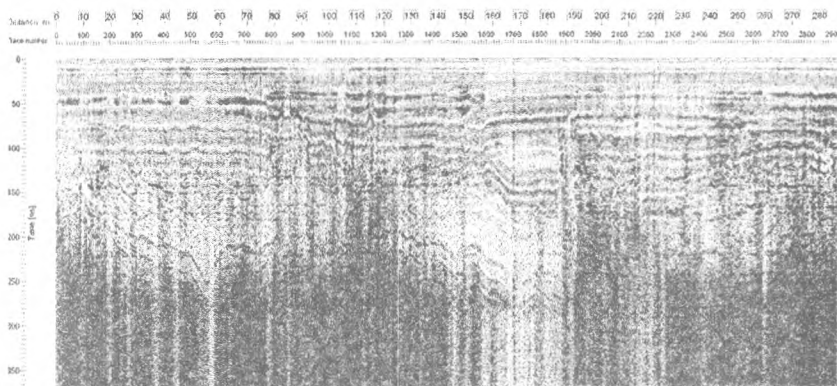


Рис. 7. Радарограмма участка Полоцкого профиля от нив. реп. 7701

На данном этапе исследования был сделан предварительный анализ радарограммы с сопоставлением результатов геометрического нивелирования на этом профиле, на основании которого было сделано пред-

положение, что участок радарограммы 1100 – 1200 м показывает тектоническое нарушение.

Заключение. Испытание нового оборудования на Полоцком профиле в 2008 году дало положительные результаты. Применение высокоточных электронного нивелира и GPS-приемников позволило не только повысить точность определения вертикальной и горизонтальной деформаций земной коры, но и расширить спектр геодинамических параметров.

Так, из сопоставления результатов геометрического и спутникового нивелирования оказалось возможным найти изменения высот геоида над эллипсоидом по профилю, а затем сравнить их с данными наземных гравиметрических измерений.

Исследования возможностей в получении информации о положении тектонических нарушений с помощью георадарной установки необходимо продолжить.

В целом использование перечисленного современного оборудования предполагает существенно повысить уровень выполняемых геодинамических исследований и степень достоверности интерпретации комплексной информации о сложных геодинамических явлениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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: тр. междунар. науч. конф. – Новополоцк, 2006. – С. 28 – 42.
2. 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.
3. Применение метода Христова к исследованию вертикальных движений земной коры / Г.А. Шароглазова [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2008. – № 12. – С. 99 – 105.