

УДК 528.02

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ВЬЕТНАМА

Чан Тхань Шон

аспирант

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Фам Ван Лок

преподаватель

Центральный региональный колледж природных ресурсов
и окружающей среды, Вьетнам

Аннотация. При начальных этапах строительства основой для проведения разбивочных мероприятий, является создание опорных геодезических сетей. Обеспечение точности создания инженерно-геодезической сети основная задача при выполнении основных измерений в полевых условиях. Таким образом, исследование и разработка современных методов измерений при помощи инновационных технологий для строительства особо важных крупных инженерно-технических объектов, таких как гидроэлектростанции, в стране Вьетнам, является актуальной и важной научной задачей. В этой стране ранее при строительстве гидротехнического объекта проектировались инженерно-геодезические сети с применением метода триангуляции. На сегодняшний день во Вьетнаме особо важной задачей является внедрение ГНСС-технологии с применением спутниковых приемников. Данная технология, как выявлено в других развивающихся странах, является экономически эффективной и может обеспечивать высокую точность измерений. Сравнение и исследование результатов традиционного метода измерения и метода с применением спутниковых технологий даст четкую и комплексную оценку точности и качеству при построении опорной инженерно-геодезической сети для гидротехнического объекта на территории Вьетнама. В научной статье обобщен опыт создания опорных сетей, проводится сравнение традиционного метода и метода с использованием спутниковых технологий, проведен и выполнен анализ результатов точности при создании инженерно-геодезической сети гидроэлектростанций Шон Ла, Вьетнам.

Ключевые слова: ГНСС, инженерно-геодезическая сеть, координаты, точность, приращение, приемники, Вьетнам, гидротехнические сооружения, электронный тахеометр, погрешность, навигация, сравнение.

MODELLING OF SATELLITE MEASUREMENTS AT CREATION OF HYDRAULIC ENGINEERING CONSTRUCTIONS GEODETIC NETWORKS IN THE TERRITORY OF VIETNAM

Tran Thanh Son

postgraduate student

St. Petersburg Mining University, St. Petersburg

Pham Van Loc

teacher

Central regional College of Natural Resources and Environment, Vietnam

Abstract. In the initial stages of construction the basis for the center of the activities is the creation of reference geodetic networks. Ensuring the accuracy of engineering-geodetic network the main task when performing basic measurements in the field. Thus, the research and development of modern measurement techniques with innovative technologies for construction of especially important, large engineering and technical facilities, such as hydroelectric power plants, in the country of Vietnam, is an actual scientific task. In this country earlier in the construction of hydrotechnical object is designed for engineering-geodetic network using the method of triangulation. Today in Vietnam a particularly important goal is the introduction of technology use of satellite receivers. This technology, as identified in other developing countries, is cost effective and can provide high measurement accuracy. Compare and research results of traditional measuring methods and the method with the use of satellite technology will give a clear and comprehensive assessment of the accuracy and quality when building the reference engineering-geodetic network for hydraulic facilities on the territory of Vietnam. The article generalizes the experience of creation of reference networks, comparison of traditional method and the method using satellite technology, conducted and performed results analysis accuracy when creating engineering geodetic network guide-rosettastone Son La, Vietnam.

Keywords: geodetic engineering network, coordinates, precision, increment, receivers, Vietnam, waterworks, electronic total station, accuracy, navigation, comparison.

Вьетнам – это одна из развивающихся экономик мира, в которой особое внимание уделяется развитию промышленного сектора. Одной из приоритетных отраслей промышленного хозяйства является развитие энергетического производства. Статистика показывает, что развитие и открытие новых гидроэлектростанций во Вьетнаме возрастает с каждым годом. По природно-климатическим характеристикам Вьетнам – это страна, в которой преобладает тропический муссонный климат. В связи с этим, страна имеет развитый гидроэнергетический потенциал, оцениваемый экспертами в 84 ТВт/год, (2013 г.) [1]. Одной из самых мощных в Юго-Восточной Азии гидроэлектростанции является ГЭС ХоаБинь, построенная в 1994 году и обеспечивающая электрической энергией ежегодно 35 % всего производства промышленного сектора Вьетнама. На территории государства также действует огромное количество малых гидроэлектростанций, приблизительно 300 проектов малых ГЭС [1]. Правительство Вьетнама планирует на ближайшее будущее проекты других сооружений энергетической отрасли, соответствующие всем мировым стандартам.

На сегодняшний день все гидроэлектростанции Вьетнама относятся к средней мощности и имеют средние масштабы строительства. До 2000 года во Вьетнаме при осуществлении строительства гидротехнических сооружений геодезические опорные сети создавались классическим методом – методом триангуляции. В настоящее время в данной стране создаются сооружения с применением спутниковых технологий, а также с помощью комбинированного метода, используя электронные тахеометры. Однако, спутниковые технологии медленно внедряются в систему глобального позиционирования данной страны, что, естественно образом, влияет на качество измерений при проведении создания геодезических опорных сетей при строительстве гидроэлектростанций.

Строительство и разработка новых проектов по созданию гидротехнических сооружений требует высокотехнологичного оборудования и современных методов. Применение спутниковых технологий и оборудова-

ния является экономически эффективным для строительства объектов, обеспечивающее высокую точность измерения и вычисления.

Таким образом, применение систем глобального позиционирования является удобным для определения координат при проведении инженерно-геодезических измерений. Технология ГНСС ориентирует инженеров в строительном пространстве, применяя одновременно несколько ГНСС – приёмников. Во время анализа полученных сигналов с ГНСС – приёмников, получают с определенной точностью необходимые размеры строительного объекта или сооружения. Важно отметить, что точность таких измерений варьируется от 3 до 5 мм. Поэтому на современном этапе моделирование инженерных геодезических сетей с использованием спутниковых навигационных систем и технологий является актуальным на территории региона Вьетнама. Кроме того, внедрение передовых глобальных систем навигации при проведении инженерно-геодезических работах на этапе строительства на примере гидроэлектростанций, позволяет:

- 1) создавать триангуляционную сеть IV-го класса на основе технологии ГНСС как главного геодезического обоснования для топографической съёмки масштаба 1:1000;
- 2) создавать нивелирную сеть IV класса и проводить инженерно-техническое нивелирование;
- 3) проводить построения разбивочных сетей, разбивочные мероприятия при выносе проекта в натуру;
- 4) исследовать природно-климатические, геологические, гидрологические условия местности на этапе строительных решений для удовлетворения технических и экономических потребностей района проектирования и сооружения;
- 5) создавать новую и современную инфраструктуру для экономики государства; развитие социально-экономической среды в районе исследования.

Во время строительства важно проектировать высокоточную опорную геодезическую сеть, в которой основные пункты закрепляются стабильными знаками, сохраняющиеся длительное время. Особенностью опорной геодезической сети при строительстве гидроэлектростанций является разбивка коротких сторон (200-1500 м), размещение производится вблизи от основных осей сооружения. Важно отметить, что точность опорной геодезической сети прямо зависит от требований к точности строительства объекта сооружения. В основном, средняя квадратическая погрешность положения пунктов должна быть в пределах 5-10 мм [2-4].

Исследование проводилось по предварительному расчёту точности опорной геодезической сети смоделированной при использовании спутниковых технологий и длительных полевых измерений при строительстве гидротехнического сооружения Шон Ла во Вьетнаме.

Плотина Шон Ла во Вьетнаме – это бетонная гравитационная плотина на Черной реке, в уезде Ит Онг, Муонг Ла, провинция Шон Ла, Вьетнам. Гидротехническое сооружение располагается на средней высоте примерно 150 метров, вырабатываемая мощность электроэнергии составляет 2400 МВт, высота плотины составляет 138 метров, длина – 1017 метров. Согласно обобщенным грациям опорных геодезических сетей при проектировании и строительстве гидроэлектростанций [5-6], рассматриваемое сооружение относится к I классу.

Это крупнейшая ГЭС в Юго-Восточной Азии. Проект был начат в 1970-е гг. Было выполнено несколько исследований, в том числе институтом Гидропроект (Москва), Electricity and Power Distribution Company (Япония), Designing Research and Production Shareholding Company (Россия) и SWECO (Швеция).

По рекомендациям [5; 7] для строительства гидротехнического сооружения предварительный расчет точности геодезической сети проводится по строгому алгоритму:

- 1) определение неизвестных значений – координат пунктов;
- 2) компоновка матричной формы коэффициентов уравнения поправок А:

$$A\delta X + L = V \quad (1)$$

где δX – вектор неизвестных;

V – вектор поправок измеренных показателей;

L – столбец свободных членов (не применяется при предварительном расчете);

$$V_{Ski} = \cos\alpha_{ki}^0 dX_i + \sin\alpha_{ki}^0 dY_i - \cos\alpha_{ki}^0 dX_k - \sin\alpha_{ki}^0 dY_k;$$

$$V_{\beta k} = (a_{ki} - a_{kj})dX_k + (b_{ki} - b_{kj})dY_k - a_{ki}dX_i - b_{ki}dY_i + a_{kj}dX_j - b_{kj}dY_j;$$

$$a_{ki} = \frac{\rho'' \sin\alpha_{ki}^0}{S_{ki}^0} = \frac{\rho'' \Delta Y_{ki}}{S_{ki}^{0^2}}; \quad b_{ki} = -\frac{\rho'' \cos\alpha_{ki}^0}{S_{ki}^0} = -\frac{\rho'' \Delta X_{ki}}{S_{ki}^{0^2}}; \quad (2)$$

$$a_{kj} = \frac{\rho'' \sin\alpha_{kj}^0}{S_{kj}^0} = \frac{\rho'' \Delta Y_{kj}}{S_{kj}^{0^2}}; \quad b_{kj} = -\frac{\rho'' \cos\alpha_{kj}^0}{S_{kj}^0} = -\frac{\rho'' \Delta X_{kj}}{S_{kj}^{0^2}};$$

где dX_k, dY_k, dX_i, dY_i – неизвестные переменные;

$S_{ki}^0, \alpha_{ki}^0, S_{kj}^0, \alpha_{kj}^0$ – длины сторон и дирекционные углы;

$\Delta X_{kj}, \Delta X_{ki}, \Delta Y_{ki}, \Delta Y_{kj}$ – разности координат, которые определяются приближенно;

- 3) Создание матрицы коэффициентов R-нормальных уравнений:

$$R = A^T P A \quad (3)$$

где P – матрица весов измеренных показателей;

A^T – транспонированная матрица коэффициентов уравнения поправок;

Определение вес измеренной величины:

$$P_i = \frac{\mu^2}{m_i^2} \quad (4)$$

где μ – средняя квадратическая погрешность единицы веса;

m_i – средние квадратические погрешности измеренных параметров;

- 4) Определение и расчет обратной матрицы:

$$Q = R^{-1} \quad (5)$$

- 5) Предварительный расчет точности построения геодезической сети.

Для проведения и исследования предварительного расчета и определения точности опорной геодезической сети ГЭС Шон Ла была применена программа на основе языка Visual Basic [8].

Для предварительного расчет точности построения инженерной геодезической сети применяют общую формулу:

$$m_F = \mu \sqrt{\frac{1}{P_F}} \quad (6)$$

где $\frac{1}{P_F} = Q_F$ – обратный вес функции оцениваемого элемента, который характеризует качество проекта схемы измерения;

$$1 / P_F = Q_F = f^T Q f. \quad (7)$$

Для оценки и определения смещений по осям координат x и y применяют следующие формулы:

$$m_{x_i} = \mu \sqrt{Q_{x_i}}; \quad m_{y_i} = \mu \sqrt{Q_{y_i}} \quad (8)$$

Как было уже отмечено выше, точность опорных геодезических сетей должна отвечать всем требованиям точности проектируемого инженерного сооружения.

Основными требованиями к точности строительного сооружения является анализ сложности самого объекта, рельефа и климатических условий. Поэтому, если показатели m_{x_i} и m_{y_i} в формуле (8) меньше допустимых погрешностей, то созданная сеть является пригодной для возведения гидротехнического сооружения. В случаях, когда сеть, которую оценивают, характеризуется показателями m_{x_i} и m_{y_i} больше, чем показатели допустимой погрешности, то необходимо увеличить количество измерений в геодезической сети, либо обеспечить качество измерений в полевых условиях.

Схема построения геодезической сети гидротехнического сооружения Шон Ла с применением линейно-угловых измерений представлена на рис. 1. Для исходных данных могут быть применены PV04, PV08 и PV11, остальные пункты TC01-TC11 определяют.

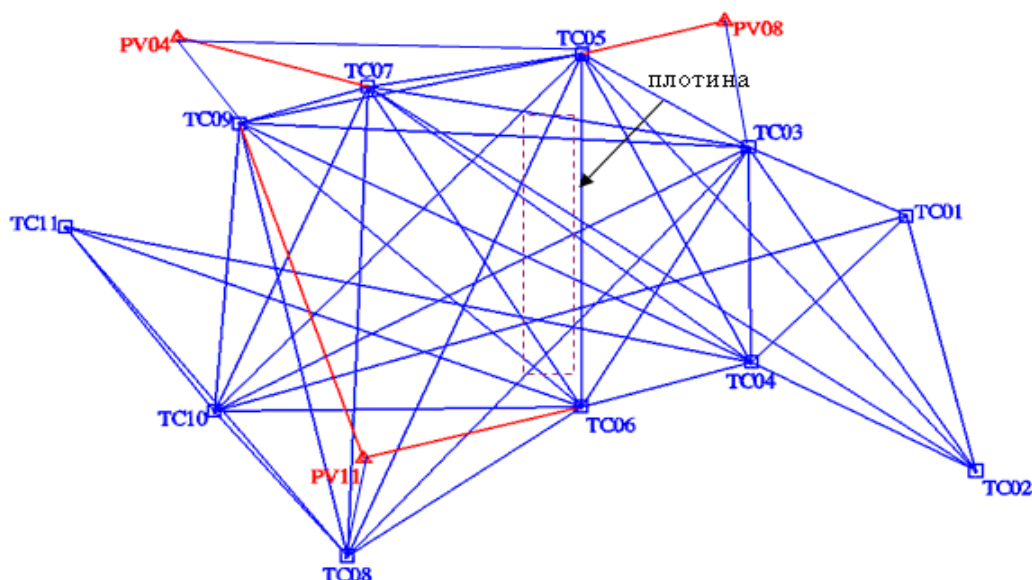


Рис. 1. Опорная геодезическая сеть гидротехнического сооружения Шон Ла при линейно-угловых измерениях

Таблица 1

Технические характеристики проекта сети [10]

№ п/п	Критерии	Значение
1	Число исходных пунктов	3
2	Число новых пунктов	11
3	Число углов (измеренных)	73
4	Число сторон (измеренных)	42
5	Средняя квадратическая ошибка измеренных углов, сек	2,0"
6	Средняя квадратическая ошибка измеренных длин сторон	3 мм+2 ррт

Результаты предварительного расчёта точности сети выполненные по вышеприведенной методике и программе, представлены в таблице 2.

Для применения глобальной спутниковой навигации при построении инженерно-геодезической сети гидротехнического сооружения Шон Ла Вьетнама, необходимо применять ГНСС-приёмники. Точность и качество выполняемых операций для измерения координат зависит от количества спутниковых ГНСС-приемников, которые участвуют в измерениях одновременно. На рис. 2 представлена схема построения инженерно-геодезической сети с применением спутниковых ГНСС-приёмников.

Результаты предварительного расчёта точности инженерно-геодезической сети [9]

№ п/п	Пункты	Средние квадратические ошибки по осям координат, мм	
		m_x	m_y
1	ТС01	5,7	3,8
2	ТС02	6,5	5,3
3	ТС03	4,1	3,2
4	ТС04	4,0	3,5
5	ТС05	2,9	2,8
6	ТС06	3,1	3,2
7	ТС07	2,8	2,8
8	ТС08	3,5	5,0
9	ТС09	3,2	3,2
10	ТС10	3,9	3,8
11	ТС11	6,0	4,3
Самый слабый пункт сети			ТС02
Относительная ошибка определения длины слабой стороны сети: PV08 – ТС05			1/157100
Самый слабый дирекционный угол сети: ТС05 – PV08			1,42"

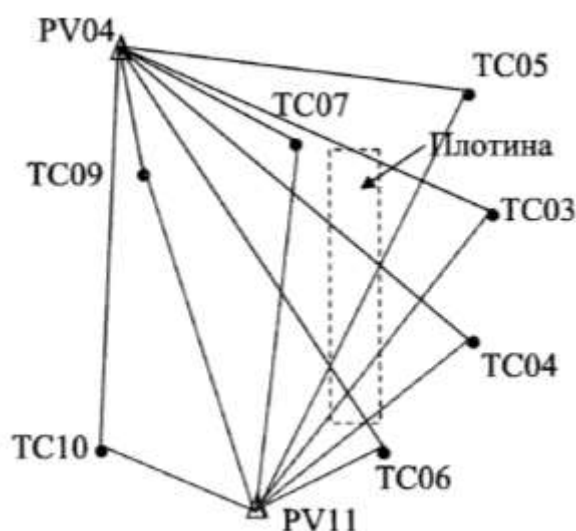


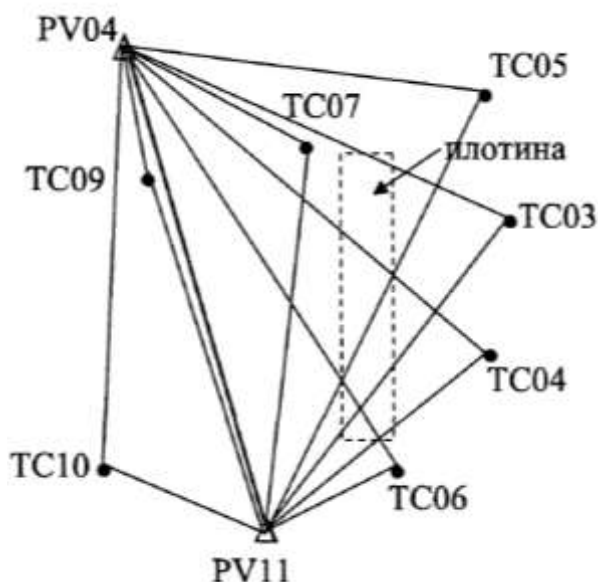
Рис. 2. Схема сети с применением спутниковых приемников

Во время проведения измерений базовым пунктами геодезической сети являются PV04 и PV11, в них располагались постоянно базовые ГНСС-приемники, второй ГНСС-приемник целесообразно было устанавливать в пунктах от ТС03-ТС07, ТС09, ТС10, остальные пункты являлись как вспомогательные. Данная созданная опорная сеть имеет ряд досто-

инств: надежность, возможность проведения тщательного контроля качества полевых измерений, обеспечение высокой точности определения координат пунктов.

Современные спутниковые устройства позволяют вычислять приращения координат с погрешностью, равной не менее $5 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} S$. Во время осуществления измерений в каждом пункте были выполнены двойные измерения величин, таким образом, ошибки определения координат пунктов уменьшились примерно в 1,4 раза, имеющие среднюю квадратическую погрешность около $3 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} S$, что существенно меньше, чем погрешность, полученная при проведении полевых измерений традиционным методом.

Главная особенность получения точности плановой опорной инженерно-геодезической сети для гидротехнического сооружения – это большое количество применение спутниковых ГНСС-приемников, см. рис. 3. Таким образом, данный способ с увеличением ГНСС-приемников для производства измерений величин пунктов, дает возможность определить разность координат пунктов PV04 и PV011.



Опорные (базовые пункты) – PV04, PV11; TC03-TC07, TC09, TC10 – определяемые пункты, время длительности сеанса измерения – 60 мин.

Рис. 3. Схема инженерно-геодезической сети с двумя базовыми пунктами и тремя спутниковыми ГНСС-приемниками

По рис. 3 видно, что базовые опорные пункты соединены двойными линиями, потому что эти пары ГНСС-приемников проводили измерения одновременно во время сеанса наблюдения, пока определяемый ГНСС-приемник перемещался по вспомогательным пунктам: TC03-TC07, TC09, TC10, с длительностью сеанса наблюдений – 60 мин. В результате построения схемы опорной инженерно-геодезической сети было выявлено 7 замкнутых полигонов.

Таблица 3

Результаты расчета квадратических погрешностей приращения координат пунктов m_{Δ}

№ п/п	Сторона	Длина стороны, L, м	Средняя квадратическая ошибка приращений координат m_{Δ} , мм	Вес измеренных величин, P_l
1	PV04-TC03	1712	8,4	0,35
2	PV04-TC04	1967	8,9	0,31
3	PV04-TC05	1190	7,4	0,46
4	PV04-TC06	1655	8,3	0,36
5	PV04-TC07	579	6,2	0,66
6	PV04-TC09	325	5,6	0,78
7	PV04-TC10	1172	7,3	0,46
8	PV11-TC03	1492	8,0	0,39
9	PV11-TC04	1179	7,4	0,46
10	PV11-TC05	1418	7,8	0,41
11	PV11-TC06	660	6,3	0,63
12	PV11-TC07	1161	7,3	0,47
13	PV11-TC09	1107	7,2	0,48
14	PV11-TC10	462	5,9	0,71
15	PV04-PV11	1424	2,9	2,97

Для осуществления оценки качества измерений были проведены расчеты средней квадратической погрешности приращений координат, m_{Δ} по следующей формуле:

$$m_{\Delta x} = m_{\Delta y} = m_{\Delta z} = m_{\Delta} = 5\text{мм} + 2 \cdot 10^{-6} S \quad (9)$$

В таблице 3 представлены расчеты весов, которые были проведены по формуле (4) при $\mu = 5$ мм.

При исследовании было выявлено, что можно избежать процесса преобразования координат пунктов, приняв один исходный пункт, как ба-

зовый с произвольными координатами, например, PV04, а пункт PV11 – определяемым. Тогда общая продолжительность работы спутниковых устройств за весь период проведения измерений составит – 660 минут. В данном случае целесообразно разделять весь период наблюдения на несколько часовых циклов и обрабатывать показания отдельно. Для проведения вычислений значения приращения координат принимается средний арифметический показатель. Таким образом, средняя квадратическая погрешность средних величин приращений координат пунктов PV04 и PV11 приблизительно равна:

$$m_{\Delta_{PV04, PV11}} = \frac{\mu}{\sqrt{n}} + 1.10^{-6} S = \frac{5}{\sqrt{11}} + 1.10^{-6} S \approx 2,9 \text{ мм}$$

В результате данного исследования, в опорной инженерно-геодезической сети гидроэлектростанции Шон Ла, при использовании спутникового метода, получается семь избыточных измерений, позволяющие вычислять 21 условие следующего вида:

$$\sum_{i=1}^n \Delta X_i + \omega_X = 0; \sum_{i=1}^n \Delta Y_i + \omega_Y = 0; \sum_{i=1}^n \Delta Z_i + \omega_Z = 0 \quad (10)$$

Данные условия (10) позволяют проводить контроль выполненных измерений, дать объективную оценку о качественных полевых измерениях, а выполненные избыточные измерения дают возможность выполнить уравнивание инженерно-геодезической сети.

Результаты предварительного расчёта точности и полевых измерений величин пунктов геодезической сети с применением спутниковых приемников, согласно рис. 3, представлены в таблице 4.

После проведенных расчетов и выполнения уравнивания результатов полевого измерения, производится вычисление координат опорных пунктов инженерно-геодезической сети в заданной системе координат. Данный этап может выполняться как с применением спутниковых технологий, так и с использованием электронного тахеометра.

**Результаты предварительного расчета точности
опорной геодезической сети**

№ п/п	Пункты	Средние квадратические ошибки по осям координат $m_{\Delta x} = m_{\Delta y} = m_{\Delta z}$, мм
1	ТС03	5,9
2	ТС04	5,9
3	ТС05	5,5
4	ТС06	5,2
5	ТС07	4,8
6	ТС09	4,5
7	ТС10	4,8
8	PV11	2,3
Самый слабый пункт сети		ТС03, ТС04

В результате проведенных расчетов, согласно таблице 4, точность полученных значений приращений координат, не уступает значениям, полученные при проведении линейно-угловым методом (табл. 2), однако по трудозатратам является экономически эффективнее.

Необходимо отметить, что в данном исследовании и сравнении, проводился анализ характеристик спутниковых ГНСС-приемников не высшего уровня. При осуществлении и применении спутниковых навигационных устройств, таких фирм как «JAVAD», «Leica», результат получения средних квадратических погрешностей определения координат пунктов могут быть в 1,5-2 раза меньше, чем полученные результаты в данном исследовании (см. табл. 4).

В первой части научной статьи были проведены вычисления геодезической сети гидротехнического сооружения Шон Ла с помощью специализированной программы, разработанной в Visual Basic [8]. В результате полученных значений, оказалось, что данная сеть обладает хорошей точностью, но достижение таких результатов связано с применением электронных приборов-тахеометров высокого уровня точности и за счет достаточно длительного проведения полевых измерений. Например, чтобы обеспечивать среднюю квадратическую погрешность измерений углов $m_{\beta} = 2''$ при помощи электронного тахеометра, модели Sokkia Net-

1200 в полевых условиях Вьетнама, необходимо провести шесть полных приемов измерений. Кроме того, чтобы снизить вероятность возникновения погрешности центрирования и влияния на точность проводимых угловых измерений, важно и необходимо производить перецентрирование электронного тахеометра и визирных точек через каждые три приема с поворотом оптического центра на 180 градусов. Таким образом, проведение линейных и угловых наблюдений и измерений на одном опорном пункте занимает от двух до трех часов. В случае, если применить спутниковую технологию для измерения расстояний и угловых измерений, достаточная точность обеспечивается при длительности работ в течении около 40-60 минут.

Список использованных источников

1. Вьетнамское энергетическое агентство [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ievn.com.vn>
2. Государственный строительный комитет, Строительные нормы и правила. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. СНиП 2.06.01-86. М., 1987.
3. Государственный строительный комитет, СП 23.13330.2011. Основания гидротехнических сооружений (взамен СНиП 2.02.02-85).
4. Государственный строительный комитет, СНиП 3.01.03-84. Геодезические работы в строительстве. М., 1985.
5. Динь Тхи Ле Ха. Особенности создания плановых опорных сетей для строительства крупных инженерных объектов с использованием спутниковых технологий // Доклад на 68-й научн.-техн. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК. 2013.
6. Dang Hung Vo, Tran Bach Giang va nnk., Tong suc dia chinh, Bao cao khoa hoc: Xay dung he quy chieu va he thong diem toa do quoc gia, Ha noi 1999, 250 tr.
7. Dang Nam Chinh, Bao cao ky thuat do dac, tinh toan mang luoi ГНСС kiem tra tuyen nang luong thuy dien A Vuong – Quang Nam, Truong DH Mo – Dia chat, Ha noi, 2005.
8. Dang Nam Chinh, Huong dan su dung phan mem ГНССurvey 2.35, Truong Dai hoc Mo – Dia chat. Ha noi, 2001.
9. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.skonline.ru/dgest/4359.html?page=1>
10. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://geodesy.ru/books/book/1/part/87#p_325_tab_info