

УДК 528.48:[553.981.2 +553.982]
DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-2-18-29

ГНСС-НАБЛЮДЕНИЯ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ НЕФТЕГАЗОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ: МЕТОДИКА, ОБРАБОТКА ДАННЫХ И ИХ АНАЛИЗ

Николай Сергеевич Косарев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Владимир Абрамович Падве

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных систем, тел. (913)958-12-34, e-mail: evdapav@mail.ru

Для обеспечения геодинамической безопасности маркшейдерские службы нефтегазового комплекса (в пределах действия своих лицензионных участков) создают геодинамические полигоны. При использовании ГНСС-технологий в качестве метода геодинамического мониторинга возникает вопрос выбора технологии координирования нового пункта, вставляемого в опорную геодезическую сеть. Согласно ряду нормативных документов при развитии спутниковых геодезических сетей должен быть использован только сетевой способ, при этом лучевой способ считается неприемлемым. Использование сетевого способа как основного при организации ГНСС-измерений на геодинамических полигонах приводит к увеличению времени наблюдений, которое при лучевом способе заведомо меньше. Авторы, используя в качестве вычислительного средства собственную Excel-программу, демонстрируют, обосновав теоретически, идентичность результатов лучевого и сетевого способов. Пункты опорной геодезической сети исследуемого геодезического построения рассматриваются как безошибочные математические константы, значения которых не подлежат оптимизации (уравниванию). В качестве эксперимента были использованы ГНСС-измерения, выполненные для привязки нового пункта Лангепас, входящего в сеть регионального геодинамического полигона ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», к шести опорным пунктам государственной геодезической сети. Обработка материалов наблюдений реализована с использованием алгоритма синтезированного варианта параметрического способа (СВПС) МНК-оптимизации (МНК – метод наименьших квадратов) геопространственных данных, учитывающего погрешности координат опорных пунктов. Координаты определяемого пункта и их средние квадратические погрешности оказались, естественно, идентичными в обоих решениях: лучевом и сетевом. Это свидетельствует в пользу теоретически обоснованного использования лучевого способа как менее трудоемкого по объему полевых работ. Дополнительно, в рамках того же алгоритма СВПС, ГНСС-измерения на указанном объекте были обработаны как свободная сеть. В последнем случае резко уменьшились средние квадратические погрешности координат нового вставляемого пункта. Обработка тех же данных по синтезированному варианту коррелятного способа с дополнительными параметрами (СВКСДП) вновь подтвердила результаты лучевого способа.

Ключевые слова: геодинамический мониторинг, месторождения углеводородов, МНК-оптимизация, синтезированный вариант МНК-оптимизации геопространственных данных, ГНСС-технологии, лучевой способ, сетевой способ, свободная сеть, коррелятный способ с дополнительными параметрами

Введение

Интенсивное освоение месторождений углеводородов (УВ) Западной Сибири ведется уже более 60 лет. За это время на ее территории было выявлено более 900 месторождений УВ, из которых 396 активно разрабатыва-

ются. Добыто более 12 млрд. т нефти, более 18 трлн. м³ газа, построены десятки крупных городов и городских поселений, таких как Когалым, Лангепас, Покачи и ряд других [1].

Вместе с тем длительный опыт освоения месторождений углеводородов Западной Сибири и урбанизации территорий вблизи них

выявил факт негативного влияния эксплуатации этих территорий не только на экологическое состояние окружающей среды, но и на непоправимые изменения недр упомянутых территорий. Эти изменения проявляются в виде отдельных деформаций земной поверхности и активизации сейсмических явлений, подобных землетрясениям техногенного происхождения [2]. Для обеспечения геодинамической безопасности в пределах действия своих лицензионных участков маркшейдерские службы нефтегазового комплекса создают геодинамические полигоны [3, 4].

В национальном отчете Международной ассоциации геодезии Международного геодезического и геофизического союза 2015–2018 гг. одна из ключевых глав посвящена геодинамике, в том числе геодезическому мониторингу деформационных процессов, возникающих при разработке месторождений углеводородов [5].

Методы наблюдений на геодинамических полигонах месторождений углеводородов

В настоящее время для вычисления горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности на геодинамических полигонах месторождений углеводородов применяются четыре основных метода [6, 7]:

– метод повторного геометрического нивелирования [8, 9];

– метод спутниковых ГНСС-измерений, заключающийся в постоянном (или периодическом) наблюдении на пунктах созданной *наблюдательной сети*, которая разворачивается в пределах действия лицензионных участков маркшейдерских служб нефтегазового комплекса [10];

– комплексный геодезическо-гравиметрический метод, включающий совокупность геодезическо-гравиметрических измерений и ее совместную обработку, а также всесторонний анализ и интерпретацию результатов [11];

– метод спутниковой радарной интерферометрии с синтезированной апертурой базируется на эффекте интерференции электромагнитных волн [12, 13].

Каждый из представленных методов обладает своими достоинствами и недостатками, но наиболее экономичным является метод ГНСС-измерений, поэтому в настоящее время он активно используется для создания как локальных, так и региональных геодинамических полигонов [14].

Постановка проблемы

При использовании ГНСС-технологий в качестве метода геодинамического мониторинга приходится сталкиваться с проблемой, на которую авторы обращают особое внимание и предлагают свой вариант решения. Она заключается в сравнении двух способов координирования пункта, вставляемого в известную геодезическую сеть: лучевого и сетевого способов.

В научно-технической литературе приводится информация о том, что развитие спутниковых геодезических сетей должно осуществляться только с помощью сетевого способа, при этом лучевой способ считается неприемлемым. Такие утверждения делались исследователями, использовавшими коммерческие пакеты обработки данных ГНСС-измерений, математическое обеспечение которых не предусматривает вмешательство исполнителя в математическую основу «черного ящика» вычислительного алгоритма.

Авторы в своих экспериментах использовали собственный пакет, реализованный в вычислительной среде Excel и позволяющий использовать суточные данные ГНСС-наблюдений по алгоритму синтезированного варианта параметрического способа [15]. Этот алгоритм включает в себя параметрические уравнения связи (функциональная составляющая математической модели), результаты измерений (числовая составляющая) и ковариационные матрицы измерений и опорных координат (стохастическое расширение модели). В рамках данной работы показано, что точность лучевого и сетевого способов абсолютно идентична, так как координаты опорных пунктов должны полагаться константами, не получающими поправок по материалам уравнивания.

Методы и материалы

Для экспериментальной проверки приведенного выше теоретического обоснования идентичности результатов лучевого и сетевого использовались суточные данные ГНСС-измерений, выполненных при привязке дифференциальной геодезической станции (ДГС) Langeras, входящей в сеть регионального геодезического полигона ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», к пунктам государственной геодезической сети (ГГС) (рис. 1) [16, 17].

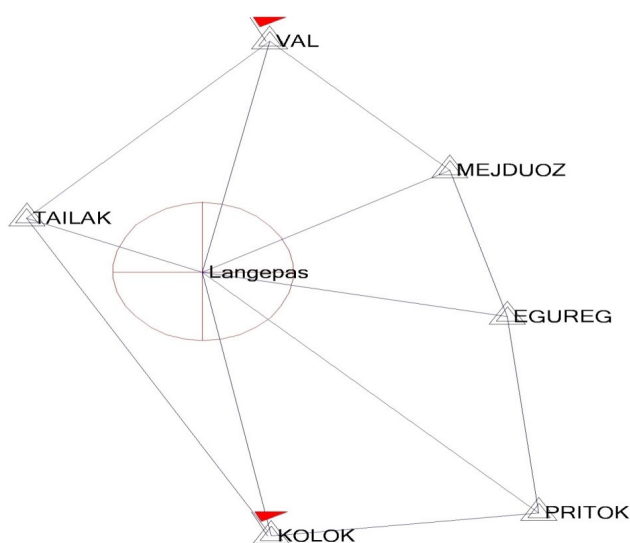


Рис. 1. Схема привязки ДГС Langeras к пунктам ГГС

МНК-оптимизация указанных ГНСС-измерений с помощью алгоритма СВПС использует массивы измеренных приращений пространственных геоцентрических координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, сопровождаемых соответствующими ковариационными матрицами K_{Δ} . По имеющимся файлам измерений выполняется МНК-оптимизация (уравнивание) приближенных значений геоцентрических координат X, Y, Z пункта Langeras и их оценка точности.

Кратко изложим структуру алгоритма СВПС на примере геодезического построения, изображенного на рис. 1. В пространстве $3d$ линейная функциональная модель связей вектора истинных значений D_{n1} разностей измеренных приращений геоцентрических

координат Δ_{n1} , с вектором опорных координат U_{n1} и вектором определяемых координат нового пункта X_{k1} , записывается следующим образом:

$$D_{n1} = U_{n1} - A_{nk} \cdot X_{k1}. \quad (1)$$

Здесь A_{nk} – это матрица плана данного линейного уравнения, состоящая из $n/3$ единичных блоков типа $\pm I_{3,3}$.

Располагая значениями измеренных приращений геоцентрических координат $\Delta^{\text{изм}}$ между пунктами, а также приближенными значениями X^0 координат определяемых пунктов, и добавляя к ним значения U^0 координат опорных точек, взятых из каталога, можно выразить неизвестные истинные значения векторов D, U и X стандартным образом, добавив искомые поправки $\delta\Delta, \delta u$ и δx :

$$D = \Delta^{\text{изм}} + \delta\Delta; \quad (2)$$

$$U = U^0 + \delta u; \quad (3)$$

$$X = X^0 + \delta x. \quad (4)$$

Заменив в линейной функциональной модели (1) истинные величины векторов их приближенными значениями, сопровождаемыми искомыми поправками согласно (2)–(4), получим функциональную модель, преобразованную к неявному виду:

$$-(\delta\Delta)_{n1} + (\delta u)_{n1} - A_{nk} \cdot \delta x_{k1} - L_{n1} = 0_{n1}. \quad (5)$$

Свободный член L_{n1} уравнения (5) – это разность измеренных значений приращений базовых линий $(\Delta^{\text{изм}})_{n1}$ и их приближенных значений $(\Delta^{\text{пр}})_{n1}$, соответствующих приближенным величинам координат определяемого пункта:

$$L_{n1} = (\Delta^{\text{изм}})_{n1} - (\Delta^{\text{пр}})_{n1}, \quad (6)$$

$$\text{где } (\Delta^{\text{пр}})_{n1} = (U^0)_{n1} - A_{nk} \cdot (X^0)_{k1}.$$

Координаты опорных пунктов U , выписанные из каталогов и принимаемые за приближенные значения U^0 , не могут быть изме-

нены и, как следствие, не должны получать поправок δu из уравнивания. Это достигается путем использования ковариационной матрицы опорных координат, регуляризованной по Тихонову: $(K_U)_{nn} = 10^{-8} I_{nn} (\text{м}^2)$. Такой прием делает элементы вектора поправок δU практически незначимыми. Ковариационная матрица приближенных значений координат определяемого пункта также подвергается регуляризации по Тихонову: $K_X = 10^8 \cdot I_{3,3} (\text{м}^2)$.

Результаты

Блоки коэффициентов алгоритма СВПС МНК-оптимизации данных для лучевого способа представлены на рис. 2. Там же описана структура каждого блока, входящего в матрицу коэффициентов $(-I_{nn} | I_{nn} | A_{n3})$, вектор

корней системы (2) $(\delta\Delta_{n1}, \delta u_{n1}, \delta x_{k1})$ и вектор ее свободных членов L_{n1} . В примере количество измеряемых приращений координат равно $n = 3 \cdot 6 = 18$, а число определяемых параметров-координат одного пункта равно $k = 3$. Опорных пунктов – шесть.

На рисунке введены обозначения: $(K_{\Delta} \cdot 10^4)^{-1}$ – обратная ковариационная матрица измеренных приращений координат $\Delta_{18,1}$, выраженная в (см^{-2}) ; безразмерная единичная матрица плана опорных координат $C_{18,18} = \{\partial D / \partial U\} = I_{18,18}$; безразмерная матрица плана определяемых координат $A_{18,3} = \{\partial D / \partial X\}$, состоящая из шести единичных блоков $I_{3,3}$; вектор свободных членов $L (\text{см}) = (\Delta^{\text{изм}} (\text{м}) - \Delta^{\text{пр}} (\text{м})) \cdot 100 \text{ см}$.

| | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|---------------|---|------------------------|---|-------------|
| $(K_{\Delta} \cdot 10^4)^{-1}$ 18·18 | 0 18·18 | 0 18·3 | $-I$ 18·18 | × | $\delta\Delta$ 18·1 | = | 0 18·1 |
| 0 18·18 | $(K_U \cdot 10^{-8})^{-1}$ 18·18 | 0 18·3 | $-I$ 18·18 | | δu 18·1 | | 0 18·1 |
| 0 3·18 | 0 3·18 | $(K_x = I \cdot 10^8)^{-1}$ 3·3 | A^T 3·18 | | δx 3·1 | | 0 3·1 |
| $-I$ 18·18 | I 18·18 | A 18·3 | 0 18·18 | | λ 18·1 | | L 18·1 |

Рис. 2. Структура и объем блоков матрицы коэффициентов, вектора корней и вектора свободных членов лучевого способа

Здесь же показан вектор корней, содержащий блок поправок в измеренные приращения $\delta\Delta$ (см), нулевой блок поправок в опорные координаты δu (см), блок поправок в приближенные координаты определяемого пункта δx (см); блок неопределенных множи-

телей Лагранжа λ , используемый при отладке работы алгоритма синтезированной версии параметрического способа.

Результаты решения системы, схематически отображенной на рис. 2, для обработки лучевого способа приведены на рис. 3.

| | | | | | | | |
|------------------------------------|---|-----------------------------------|--|----------------------------|-------------------------|---|-------------|
| $\delta\Delta$ 18·1 | = | $K_{\Delta_{\text{ур}}}$ 18·18 | K_{12} | K_{13} | K_{14} | × | 0 18·1 |
| $\delta u \approx 10^{-8}$ 18·1 | | K_{21} | $(K_U \cdot 10^{-8})_{\text{ур}}$ 18·18 | K_{23} | K_{24} | | 0 18·1 |
| δx 3·1 | | K_{31} | K_{32} | $K_{X_{\text{ур}}}$ 3·3 | K_{34} | | 0 3·1 |
| λ 18·1 | | K_{41} | K_{42} | K_{43} | $-K_{\lambda}$ 18·18 | | L 18·1 |

Рис. 3. Структура и объем блоков вектора корней, обратной матрицы решения и вектора свободных членов лучевого способа

Здесь крайний левый блок – это корни, состоящие из блока поправок $\delta\Delta_{18,1}$ (см) в измеренные приращения координат $\Delta_{18,1}$; блок незначимых поправок в опорные координаты δu (см); блок поправок в координаты определяемого пункта δx (см); блок неопределенных множителей Лагранжа λ .

Средняя группа блоков – это обратная матрица коэффициентов синтезированной системы, содержащая следующие диагональные блоки: $K_{\Delta_{ур}}$ – ковариационная матрица априорных значений дисперсий уравненных приращений $\Delta_{ур}$, выраженная в (см²); $(K_U \cdot 10^{-8})_{ур}$ – ковариационная матрица априорных значений дисперсий уравненных координат опорных пунктов, оставшихся незначимыми ве-

личинами, порядка 10^{-8} (см²); $K_{X_{ур}}$ – ковариационная матрица априорных значений дисперсий уравненных координат определяемого пункта \bar{X} , выраженная в см². Недиагональные блоки K_{ij} – это корреляционные моменты, которые могут быть использованы для дополнительных исследований системы.

Крайний правый блок-множитель состоит из трех нулевых блоков (такова структура алгоритма СВПС) и блока свободных членов L , содержащего информацию о результатах измерений.

Для сетевого способа структура системы уравнений алгоритма СВПС МНК-оптимизации представлена на рис. 4.

| | | | | | | | | |
|---|---|-------------------------------------|------------------------------------|----------------|---|------------------------------------|---|-------------|
| $(K_{\Delta_1} \cdot 10^4)^{-1}$ 18·18 | 0 18·18 | 0 18·18 | 0 18·3 | $-I$ 36·36 | × | $\delta\Delta_1$ 18·1 | = | 0 18·1 |
| 0 18·18 | $(K_{\Delta_2} \cdot 10^4)^{-1}$ 18·18 | 0 18·18 | 0 18·3 | C^T 18·36 | | $\delta\Delta_2$ 18·1 | | 0 18·1 |
| 0 18·18 | 0 18·18 | $(K_U \cdot 10^{-8})^{-1}$ 18·18 | 0 18·3 | A^T 3·36 | | $\delta u \approx 10^{-8}$ 18·1 | | 0 18·1 |
| 0 3·18 | 0 3·18 | 0 3·18 | $(K_x = I \cdot 10^8)^{-1}$ 3·3 | 0 36·36 | | δx 3·1 | | 0 3·1 |
| $-I$ 36·36 | | C 36·18 | A 36·3 | 0 36·36 | | λ 18·1 | | L 18·1 |

Рис. 4. Структура и объем блоков матрицы коэффициентов, вектора корней и вектора свободных членов сетевого способа

В отличие от лучевого способа, вдвое бóльший вектор измеренных значений приращений координат Δ разбит на два отдельных блока: вектор приращений Δ_1 ($n_1 = 18$) для базовых линий, соединяющих опорные пункты с определяемым (лучевой блок), и вектор приращений Δ_2 ($n_2 = 18$) для взаимно измеренных базовых линий между опорными пунктами (сетевой блок). Обозначения на рис. 4 идентичны обозначениям рис. 2 с учетом того, что приращения координат разбиты на самостоятельные блоки: лучевой (Δ_1) и сетевой (Δ_2).

На рис. 5 представлена блочная структура результатов решения задачи по сетевому способу. Обозначения на данном рисунке идентичны обозначениям на рис. 3.

Результаты вычислений оказались абсолютно идентичными числовым значениям как самих уравненных координат определяемого пункта Langeras, так и для их показателей точности в форме априорных значений средних квадратических погрешностей (СКП) уравненных значений определяемой триады координат (табл. 1).

| | | | | | | | | |
|------------------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|-----------------------|---|-------------|
| $\delta\Delta_1$ 18·1 | = | $K_{\Delta_{1ур}}$ 18·18 | K_{12} | K_{13} | K_{14} | K_{15} | × | 0 18·1 |
| $\delta\Delta_2$ 18·1 | | K_{21} | $K_{\Delta_{2ур}}$ 18·18 | K_{23} | K_{24} | K_{25} | | 0 18·1 |
| $\delta u \approx 10^{-8}$ 18·1 | | K_{31} | K_{32} | $K_{уур}$ 18·18 | K_{34} | K_{35} | | 0 18·1 |
| δx 3·1 | | K_{41} | K_{42} | K_{43} | $K_{хур}$ 3·3 | K_{45} | | 0 3·1 |
| λ 18·1 | | K_{51} | K_{52} | K_{53} | K_{54} | $-K_\lambda$ 18·18 | | L 18·1 |

Рис. 5. Структура и объем блоков вектора корней, обратной матрицы решения и вектора свободных членов сетевого способа

Таблица 1

Вычисленные координаты пункта Langeras и их оценка точности лучевым и сетевым способами

| Лучевой способ | | |
|----------------|---------------|---------|
| Langeras | Координаты, м | СКП, мм |
| X | 779 323,158 | 0,06 |
| Y | 2 952 085,707 | 0,15 |
| Z | 5 581 145,911 | 0,27 |

| Сетевой способ | | |
|----------------|---------------|---------|
| Langeras | Координаты, м | СКП, мм |
| X | 779 323,158 | 0,06 |
| Y | 2 952 085,707 | 0,15 |
| Z | 5 581 145,911 | 0,27 |

Дополнительно, сетевые данные были обработаны в рамках того же синтезированного алгоритма как свободная сеть. Числовые значения полученных результатов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вычисленные координаты пункта Langeras и их СКП по материалам сетевых данных, полученные методом свободного уравнивания

| Свободное уравнивание сети | | |
|----------------------------|---------------|---------|
| Langeras | Координаты, м | СКП, мм |
| X | 779 323,203 | 0,000 5 |
| Y | 2 952 085,711 | 0,001 5 |
| Z | 5 581 145,789 | 0,002 7 |

Резко уменьшившиеся СКП координат вставки можно объяснить тем, что центр тяжести свободного уравнивания как раз близок к положению в пространстве вставляемого пункта. Отличия значений координат свободного уравнивания от значений лучевого и идентичного ему сетевого вариантов составили (для определяемого пункта): по оси абс-

цисс +4,5 мм, по оси ординат +0,5 мм и по оси аппликат -12,2 мм.

Хорошо известен способ условий с дополнительными неизвестными, который в рамках терминологии данной статьи равносителен коррелятивному способу с дополнительными параметрами. Предлагается еще один вариант использования суточных данных, получаемых по технологии сетевого способа (жаль терять выполненные измерения).

Выполним рассматриваемую вставку нового пункта в центр группы опорных точек с твердыми координатами с использованием алгоритма синтезированного варианта коррелятивного способа с дополнительными параметрами [15]:

$$\Phi_{r1}(D_{1,n}^T; U_{1,q}^T; X_{1,k}^T) = 0_{r1}. \quad (7)$$

Количество условных уравнений r равно числу избыточных измерений, представляющим собой разность между количеством выполненных измерений n и необходимым количеством измерений k , которое равно числу искомых величин. В данном построении (см. рис. 1) по технологии сетевого спо-

соба измеряются $n = 36$ приращений пространственных координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$. Необходимое количество измерений $k = 3$ остается прежним, так как определяется один пункт в пространстве $3d$. Таким образом, число условных уравнений, включающих в свои формулы дополнительные параметры, будет равно $r = n - k = 33 = 36 - 3$. Поскольку измерениями являются приращения триад геоцентрических прямоугольных координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, то фактически мы будем иметь лишь 11 триад условных уравнений с дополнительными параметрами, в качестве которых будут использоваться координаты определяемого пункта Langeras X_L, Y_L, Z_L .

Первые пять триад условных уравнений – это группы пространственных уравнений фигур, общее число которых равно пятнадцати. Первая триада представляет собой пространственный шестигранник, состоящий из измеренных приращений координат между опорными пунктами (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} \varphi_{1-3} = \Delta_{VM} + \Delta_{ME} + \Delta_{EP} + \\ + \Delta_{PK} + \Delta_{KT} + \Delta_{TV} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Данные уравнения связывают между собой одноименные приращения (абсцисс, ординат или аппликат) между пунктами, первые буквы названий которых использованы в качестве нижних индексов.

Выбранный авторами возможный набор четырех пространственных треугольников (из шести имеющихся в наличии) представлен ниже:

$$\varphi_{4-6} = \Delta_{ME} + \Delta_{EL} + \Delta_{ML} = 0; \quad (9)$$

$$\varphi_{7-9} = \Delta_{EP} + \Delta_{PL} + \Delta_{EL} = 0; \quad (10)$$

$$\varphi_{10-12} = \Delta_{KT} + \Delta_{TL} + \Delta_{KL} = 0; \quad (11)$$

$$\varphi_{13-15} = \Delta_{TV} + \Delta_{VL} + \Delta_{TL} = 0. \quad (12)$$

Вторые шесть групп – это триады условных уравнений, моделирующих значение измеренного приращения координат Δ_{ij} некоторой линии (опорная точка минус определяемая) в виде разности координат U_j и U_i ($X_{j,i}$, или $Y_{j,i}$, или $Z_{j,i}$) соответствующих

концов лучей. В качестве нижних индексов использованы первые буквы названий пунктов:

$$\varphi_{16-18} = \Delta_{VL} - U_L + U_V = 0; \quad (13)$$

$$\varphi_{19-21} = \Delta_{ML} - U_L + U_M = 0; \quad (14)$$

$$\varphi_{22-24} = \Delta_{EL} - U_L + U_T = 0; \quad (15)$$

$$\varphi_{25-27} = \Delta_{PL} - U_L + U_P = 0; \quad (16)$$

$$\varphi_{28-30} = \Delta_{KL} - U_L + U_K = 0; \quad (17)$$

$$\varphi_{31-33} = \Delta_{TL} - U_L + U_T = 0. \quad (18)$$

Линеаризованная форма алгоритма (7) имеет вид:

$$B_{rm} \cdot \delta\Delta_{n1} + C_{rq} \cdot \delta u_{q1} + A_{rk} \cdot \delta x_{k1} + W_{r1} = 0_{r1}. \quad (19)$$

Коэффициенты системы (19) – это три матрицы частных производных алгоритма (7). Производные по измеряемым приращениям: $B_{rm} = \{\partial\Phi_{r1} / \partial D_{n1}\}$; производные по координатам опорных пунктов: $C_{rq} = \{\partial\Phi_{r1} / \partial U_{q1}\}$; производные по определяемым координатам: $A_{rk} = \{\partial\Phi_{r1} / \partial X_{k1}\}$. Свободные члены W_{r1} линеаризованной формы (19) – это невязки уравнений (8)–(18), вычисляемые по приближенным значениям аргументов $\Delta^{изм}$, U^0 и X^0 :

$$W_{r1} = \Phi_{r1} \left(\Delta_{1,n}^{измT}; U_{1,q}^{0T}; X_{1,k}^{0T} \right). \quad (20)$$

Фактически вектор свободных членов W_{r1} состоит из двух блоков: невязки фигур $W1_{15,1}$ и невязки лучей $W2_{18,1}$.

Искомые корнями системы (19) являются векторы поправок $\delta\Delta_{n1}$, δu_{q1} , δx_{k1} к выбранному приближенным значениям аргументов.

Матрицы коэффициентов линейной формы (19) B_{rm} , C_{rq} и A_{rk} представляют собой группы единичных блоков типа $\pm I_{3,3}$.

Блочная структура алгоритма СВКСДП на примере построения, изображенного на рис. 1, представлена на рис. 6.

| | | | | | | | | | | |
|---|---|-------------------------------------|------------------------------------|----------------|---|--------------------------|---|-----------|------------------------------------|-------------|
| $(K_{\Delta 1} \cdot 10^4)^{-1}$ 18·18 | 0 18·18 | 0 18·18 | 0 18·3 | B^T 36·33 | × | $\delta\Delta_1$ 18·1 | = | 0 36·1 | | |
| 0 18·18 | $(K_{\Delta 2} \cdot 10^4)^{-1}$ 18·18 | 0 18·18 | 0 18·3 | | | | | | | |
| 0 18·18 | 0 18·18 | $(K_U \cdot 10^{-8})^{-1}$ 18·18 | 0 18·3 | C^T 18·33 | | | | | $\delta u \approx 10^{-8}$ 18·1 | 0 18·1 |
| 0 3·18 | 0 3·18 | 0 3·18 | $(K_x = I \cdot 10^8)^{-1}$ 3·3 | A^T 3·33 | | | | | δx 3·1 | 0 3·1 |
| B 33·36 | | C 33·18 | A 33·3 | 0 33·33 | | | | | λ 33·1 | W 33·1 |

Рис. 6. Структура и объем блоков матрицы коэффициентов, вектора корней и вектора свободных членов для технологии СВКСДП

Основные обозначения на рис. 6 те же, что и в предыдущих случаях. Нижняя строка включает в себя группу из трех крупных блоков $B_{33 \cdot 36}$, $C_{33 \cdot 18}$ и $A_{33 \cdot 3}$. Векторы невязок фигур и невязок лучей образуют общий вектор невязок $W_{33 \cdot 1}$. Здесь же показан вектор корней, содержащий пять блоков: блок поправок в измеренные приращения канвы $\delta\Delta_1$, блок поправок к приращениям лучей $\delta\Delta_2$, практически нулевой блок поправок в опорные координаты δu , блок поправок в приближенные координаты определяемого пункта δx и блок неопределенных множителей Лагранжа λ , который используется при отладке работы алгоритма.

На рис. 7 представлена блочная структура результатов решения задачи по коррелятному способу с дополнительными параметрами.

Обозначения на рисунке идентичны обозначениям рис. 6.

Результаты обработки, полученные по алгоритму СВКСДП, тех же суточных данных, которые были использованы в двух предыдущих случаях, помещены ниже. Они дали абсолютно идентичные числовые значения как для самих уравненных координат определяемого пункта Langeras, так и для априорных значений показателей точности этих уравненных координат (табл. 3).

| | | | | | | | | |
|------------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|---|-------------|
| $\delta\Delta_1$ 18·1 | = | $K_{\Delta 1 \text{ур}}$ 18·18 | K_{12} | K_{13} | K_{14} | K_{15} | × | 0 18·1 |
| $\delta\Delta_2$ 18·1 | | K_{21} | $K_{\Delta 2 \text{ур}}$ 18·18 | K_{23} | K_{24} | K_{25} | | 0 18·1 |
| $\delta u \approx 10^{-8}$ 18·1 | | K_{31} | K_{32} | $K_{U \text{ур}}$ 18·18 | K_{34} | K_{35} | | 0 18·1 |
| δx 3·1 | | K_{41} | $K_{42 \text{м}}$ | K_{43} | $K_{X \text{ур}}$ 3·3 | K_{45} | | 0 3·1 |
| λ 33·1 | | K_{51} | K_{52} | K_{53} | K_{54} | $-K_{\lambda}$ 33·33 | | W 33·1 |

Рис. 7. Структура и объем блоков вектора корней, обратной матрицы решения, вектора свободных членов по технологии СВКСДП

Таблица 3

Вычисленные координаты пункта Langeras и их оценка по сетевым данным по технологии СВКСДП

| Синтезированный вариант коррелятного способа с дополнительными параметрами | | |
|--|---------------|---------|
| Langeras | Координаты, м | СКП, мм |
| X | 779323,158 | 0,06 |
| Y | 2952085,707 | 0,15 |
| Z | 5581145,911 | 0,27 |

Заключение

Общей особенностью рассмотренных выше синтезированных вариантов алгоритмов МНК-оптимизации геопространственных данных является изначальное размещение в нем как блоков функциональной модели геодезического построения, так и блоков ковариационных матриц числовых данных. Практическая нейтрализация блоков ковариационной матрицы координат твердых пунктов (жест-

кой канвы) осуществлялась путем воздействия на эти блоки технологии регуляризации по методу Тихонова [18].

По результатам проведенного численного эксперимента, в котором использовались точные данные ГНСС-измерений, выполненных при привязке станции Langeras, авторами во всех трех вариантах были получены численно идентичные значения как для уравненных координат вставки, так и для СКП этих значений.

Использование лучевого способа вместо сетевого для привязки нового пункта спутниковой геодезической сети, когда пункты исходной основы в функциональной модели рассматриваются как величины, значения которых не должны менять своих каталожных значений, позволит сократить временные и человеческие затраты, что приведет к уменьшению экономической нагрузки в процессе спутникового мониторинга, выполняемого на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брехунцов А. М. История открытия и освоения месторождений углеводородов в Западной Сибири // Нефтегазовая вертикаль. – 2016. – № 6. – С. 17–20.
2. Никонов А. И., Лукьянов О. В. Эколого-геодинамическая безопасность и проблемы производственного экологического мониторинга на объектах нефтегазового комплекса // Записки Горного института. – 2010. – Т. 188. – С. 179–182.
3. Кузьмин Ю. О. Научно-методические основы обеспечения геодинамической безопасности объектов нефтегазового комплекса // Записки Горного института. – 2010. – Т. 188. – С. 158–162.
4. Kuzmin Y. O. Recent geodynamics: from crustal movements to monitoring critical objects // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2019. – Т. 55. № 1. – С. 65–86. – DOI: 10.31857/S0002-33372019178-103.
5. M. D. Gerasimenko, V. L. Gorshkov, V. I. Kaftan, N. S. Kosarev, Z. M. Malkin, B. T. Mazurov, S. L. Pasynok, G. G. Pobedinsky, V. V. Popadev, V. P. Savinykh, R. A. Sermyagin, N. V. Shestakov, G. M. Steblov, L. S. Sugaipova, A. V. Ustinov National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018 // Geoinformatics Research Papers. – 2019. – Vol. 7, No. 1, BS7003. – Moscow : GCRAS Publ. – 100 p. DOI: 10.2205/2019IUGG-RU-IAG.
6. Васильев Ю. В., Яковлев С. И., Филатов А. В. Результаты мониторинга деформационных процессов методами высокоточной геодезии, гравиметрии, радарной интерферометрии на Самотлорском геодинамическом полигоне // Маркшейдерский вестник. – 2015. – № 4. – С. 38–44.
7. Мисюрев Д. А., Васильев Ю. В., Иноземцев Д. П. Анализ результатов маркшейдерско-геодезических наблюдений на Пыть-Яхском геодинамическом полигоне // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2020. – № 1. – С. 30–41. – DOI: 10.31660/0445-0108-2020-1-30-41.
8. Каленицкий А. И., Ким Э. Л., Середович В. А. К вопросу создания геодинамических полигонов на месторождениях нефти и газа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 207–213.
9. Кашников Ю. А., Беляев К. В., Богданец Е. С., Согорин А. А. Маркшейдерское обеспечение разработки месторождений нефти и газа. – М. : ООО «Издательский дом Недр», 2018. – 454 с.

10. Пат. № 2704730 Российская Федерация. Способ геодинамического мониторинга за смещениями блоков верхней части земной коры и деформационного состояния земной поверхности с применением технологии высокоточного спутникового позиционирования глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС / GPS / А. П. Карпик, Э. Л. Ким, Г. Н. Ткачева, М. Н. Масальский ; опубл. 30.10.2019, Бюл. № 31.

11. Каленицкий А. И., Ким Э. Л. О необходимости комплексного применения гравиметрии и геодезических методов при мониторинге природной и техногенной геодинамики на месторождениях углеводородов // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 15–23.

12. Одабаи-Фард В. В., Пономаренко М. Р. Геодинамический мониторинг земной поверхности и объектов горнодобывающей промышленности при помощи метода радарной интерферометрии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 11. – С. 59–67.

13. Ketelaar V. B. H. Satellite radar Interferometry. Subsidence monitoring Techniques. – Netherlands : Delft University of technology, 2009. – 244 с.

14. Кузьмин Ю. О. Актуальные вопросы использования геодезических измерений при геодинамическом мониторинге объектов нефтегазового комплекса // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 1. – С. 43–54. – DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-1-43-54.

15. Падве В. А. Математическая обработка и анализ результатов геодезических измерений: монография. Ч. 2: Синтезированные и комбинированные алгоритмы точностной МНК-оптимизации и анализа результатов измерений. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 135 с.

16. Падве В. А., Косарев Н. С. К вопросу об уравнивании спутниковых геодезических сетей в общеземной координатной системе отсчета // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Национальная науч. конф. с междунар. участием «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 1. – С. 120–128.

17. Косарев Н. С., Падве В. А., Сергеев С. А., Дударев В. И. Использование синтезированного варианта алгоритма параметрической версии МНК-оптимизации результатов ГНСС-измерений для их сравнительного анализа // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23. № 3. – С. 30–45.

18. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – М. : Наука, 1986. – 288 с.

Получено 14.08.2021

© Н. С. Косарев, В. А. Падве, 2022

EXPERIENCE IN ORGANIZING GNSS-OBSERVATIONS AT THE GEODYNAMIC POLYGON OF AN OIL AND GAS FIELD: METHODOLOGY, DATA PROCESSING AND ANALYSIS

Nikolay S. Kosarev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (913)706-91-95, e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Vladimir A. Padve

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Applied Information Science and Systems, phone: (913)958-12-34, e-mail: evdapav@mail.ru

To ensure geodynamic safety within the scope of their license areas, surveying services of the oil and gas complex create geodynamic polygons. When using GNSS technologies as a method of geodynamic monitoring, the question arises of choosing a coordination technology for a new point inserted into the reference geodetic network. According to a number of regulatory documents, in the development of satellite geodetic networks, only the "network" method should be used, while the "radiant" method is considered unacceptable. The use of the "network" method, as the main one in the organization of GNSS measurements at geodynamic polygons, leads to an increase in the observation time, which is obviously less in the "radiant" method. The authors, using its own Excel-program as a computing tool, they show that the accuracy of the "radiant" and

"network" methods is identical. Theoretically, the points of the reference geodetic network of the geodetic construction under study are considered as mathematical constants whose values are not subject to LS-optimization. As an experiment, GNSS measurements were used to bind the new Langepas point, which is part of the network of the regional geodynamic polygon of LLC LUKOIL-Western Siberia, to six reference points of the state geodetic network. Processing of observational materials was implemented using the algorithm of the synthesized version of the parametric method (SVPM) of LS-optimization of geospatial data, taking into account the errors of the coordinates of reference points. The coordinates of the defined point and their average quadratic errors turned out to be, of course, identical in both solutions: "radiant" and "network". This testifies in favor of the theoretically justified use of the "radiant" method, as less laborious in terms of the volume of field work. Additionally, within the framework of the same SVPS algorithm, the GNSS measurements on the specified object were treated as a "free" network. In the latter case, the average quadratic errors of the coordinates of the new inserted item sharply decreased. Processing of the same data on the synthesized variant of the correlate method with additional parameters (SVCMAP) again confirmed the results of the "radiation" method.

Keywords: geodynamic monitoring, oil and gas fields, least-squares method, synthesized parametric version of the least-squares method, GNSS technology, radial method, network method, free network, correlate method with additional parameters

REFERENCES

1. Brekhuntsov, A. M. (2016). The history of the discovery and development of hydrocarbon fields in Western Siberia. *Neftegazovaya Vertikal' [Oil and Gas Vertical]*, 6, 17–20 [in Russian].
2. Nikonov, A. I., & Luk'yanov, O. V. (2010). Ecological and geodynamic safety and problems in industrial ecological monitoring at objects of an oil-gas complex. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 188, 179–182 [in Russian].
3. Kuzmin Yu. O. (2010) Scientific-methodological foundation for geodynamic safety of oil and gas objects. *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 188, 158–162 [in Russian].
4. Kuzmin, Yu. O. (2019). Recent geodynamics: from crustal movements to monitoring critical objects. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 55(1), 65–86. doi: 10.31857/S0002-33372019178-103.
5. Gerasimenko, M. D., Gorshkov, V. L., Kaftan, V. I., Kosarev, N. S., Malkin, Z. M., Mazurov, B. T., Pasyok, S. L., Pobedinsky, G. G., Popadev, V. V., Savinykh, V. P., Sermiyagin, R. A., Shestakov, N. V., Steblov, G. M., Sugaipova, L. S., & Ustinov, A. V. (2019). National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018. *Geoinformatics Research Papers*, 7(1), BS7003. Moscow: GCRAS Publ., 100 p. doi: 10.2205/2019IUGG-RU-IAG.
6. Vasil'ev, Iu. V., Iakovlev, S. I., & Filatov, A. V. (2015). The results of monitoring deformation processes by methods of high accuracy geodesy, gravimetry and radar interferometry in the Samotlor geodynamic testing ground. *Marksheiderskii vestnik [Mine Surveying Bulletin]*, 4, 38–44 [in Russian].
7. Misyurev, D. A., Vasilev, Yu. V., & Inozemtsev, D. P. (2020). Analysis of the results of the surveying and geodetic observations at the Pyt-Yakh geodynamic site. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz [Oil and Gas Studies]*, 1, 30–41. doi: 10.31660/0445-0108-2020-1-30-41 [in Russian].
8. Kalenitsky, A. I., Kim, E. L., & Seredovich, V. A. (2014). Establishment of geodynamic testing areas on oil-and-gas fields. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 207–213). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
9. Kashnikov, Yu. A., Belyaev, K. V., Bogdanets, E. S., & Sogorin, A. A. (2018). *Marksheyderskoe obespechenie razrabotki mestorozhdeniy nefti i gaza [Mine surveying support for the development of oil and gas fields]*. Moscow: Nedra Publ, 454 p. [in Russian].
10. Karpik, A. P., Kim, E. L., Tkacheva, G. N., & Masal'sky, M. N. (2019). A method for geodynamic monitoring of displacements of blocks in the upper part of the earth's crust and the deformation state of the earth's surface using the technology of high-precision satellite positioning of the global navigation satellite system (GNSS). Patent RF No. 2704730.
11. Kalenitsky, A. I., & Kim, E. L. (2015). On the need for an integrated application of gravimetry and geodesic methods for monitoring natural and man-made geodynamics in hydrocarbon fields. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(29), 15–23 [in Russian].

12. Odabai-Fard, V. V., & Ponomarenko, M. R. (2017). Geodynamic monitoring of the ground surface and mining industry infrastructure using radar interferometry. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' [Mining Informational and Analytical Bulletin]*, 11, 59–67 [in Russian].
13. Ketelaar, V. B. H. (2009). Satellite radar Interferometry. Subsidence monitoring Techniques. Netherlands: Delft University of technology, 244 p.
14. Kuzmin, Yu. O. (2020). Topical issues of use of geodesic measurements at geodynamic monitoring of objects of oil and gas complex. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(1), 43–54 [in Russian].
15. Padve, V. A. (2018). *Matematicheskaya obrabotka i analiz rezul'tatov geodezicheskikh izmereniy: Ch. 2, Sintezirovannye i kombinirovannye algoritmy tochnostnoy MNK-optimizatsii i analiza rezul'tatov izmereniy [Mathematical processing and interpretation of the results of geodetic measurements: Part 2, Synthesized and combined algorithms for precision OLS optimization and analysis of measurement results]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 134 p. [in Russian].
16. Padve, V. A., & Kosarev, N. S. (2020). The issue of LS-optimization satellite geodetic networks in the terrestrial coordinate system. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2020: Natsional'noy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2020: National Scientific Conference with International Participation: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 120–128). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
17. Kosarev, N. S., Padve, V. A., Sergeev, S. A., & Dudarev, V. I. (2018). The use of a synthesized algorithm variant of the parametric version of LSM-optimization of the results of GNSS measurements for their comparative analysis. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(3), 30–45 [in Russian].
18. Tikhonov, A. N., & Arsenin, V. Ya. (1986). *Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods of solving incorrect problems]*. Moscow: Nauka Publ., 288 p. [in Russian].

Received 14.08.2021

© N. S. Kosarev, V. A. Padve, 2022