

УДК 550.83
DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-5-63-74

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОГЛАСУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ГЕЛЬМЕРТА ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Николай Кириллович Шендрик

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, заведующий лабораторией кафедры космической и физической геодезии, тел. (913)739-55-17, e-mail: snk_aig@mail.ru

Разработана методика определения согласующих параметров Гельмерта для преобразования координат пунктов из общеземной в референцную систему координат. Методика основана на максимальном совмещении поверхностей общеземного и референчного эллипсоидов в пределах некоторой локальной территории и не предполагает знания высот квазигеоида. Радиус локальной территории ограничивается заданной методической погрешностью преобразования координат из общеземной системы в проекцию Гаусса – Крюгера. Для методической погрешности $\pm 2-3$ см радиус локальной территории составляет порядка 200 км. Приведены два варианта определения согласующих параметров Гельмерта для четвертой трехградусной зоны местной системы координат (МСК) Новосибирской области: по реконструированным координатам и высотам спутниковых дифференциальных геодезических станций (СДГС) и по каталожным координатам и высотам пунктов государственной геодезической сети (ГГС), расположенных на этой же территории.

Ключевые слова: методика, согласующие параметры Гельмерта, локальная территория, преобразование координат, общеземная и референцная система координат, сближение поверхностей эллипсоидов, высоты квазигеоида, цифровая модель геоида, геодезическая и нормальная высота, проекция Гаусса – Крюгера, местная система координат, ключ перехода

Введение

Семипараметрическое преобразование пространственных прямоугольных координат по способу Гельмерта является неотъемлемой составной частью алгоритмов обработки спутниковых геодезических измерений, в том числе, для обеспечения связи между общеземными и референчными системами координат [1, 2]. Общая схема преобразования координат из общеземной в референцную систему отображена на рис. 1.

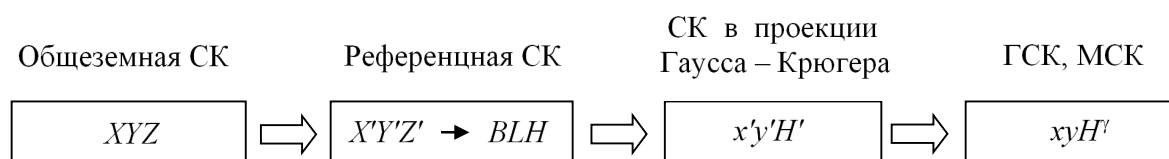


Рис. 1. Общая схема преобразования координат из общеземной системы в референцную

Основными этапами преобразований являются:

- 1) преобразование пространственных прямоугольных координат (XYZ) из общеземной системы в референцную прямоугольную пространственную систему координат ($X'Y'Z'$) по способу Гельмерта с использованием семи параметров ($\Delta X_0, \Delta Y_0,$

$\Delta Z_0, W_x, W_y, W_z, m$), где $\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$ – линейные параметры смещения начал координат для общеземной и референционной систем; W_x, W_y, W_z – углы разворота осей абсцисс, ординат и аппликат; m – разность линейных масштабов;

- 2) преобразование референчных пространственных прямоугольных координат ($X'Y'Z'$)

в геодезические (BLH) координаты для референционного эллипсоида;

3) преобразование референционных геодезических координат (BLH) в прямоугольные плоские координаты ($x'y'$) в проекции Гаусса – Крюгера на референц-эллипсоиде и ортометрические высоты (H');

4) преобразование из плоских прямоугольных координат и высот в проекции Гаусса – Крюгера ($x'y'H'$) в государственную (ГСК) или местную систему координат (МСК).

При «неточных» параметрах Гельмерта преобразование в проекцию Гаусса – Крюгера приводит к несоответствию вычисленных координат ($x'y'H'$) с их каталожными значениями (xuH'). Переход от геодезических высот к нормальным возможен при наличии модели высот квазигеоида относительно референционного эллипсоида. На практике, из-за проблем с наличием модели высот квазигеоида, вычисляют ортометрические высоты с использованием глобальной цифровой модели высот геоида, например, EGM2008, а затем разности каталожных нормальных и вычисленных ортометрических высот аппроксимируются плоскостью, после чего выполняется переход к нормальным высотам [3]. Преобразование от вычисленных в проекции Гаусса – Крюгера плоских координат к каталожным осуществляется путем вычисления ключей перехода к ГСК или МСК.

Для определения параметров Гельмерта требуется, чтобы для опорных (участвующих в решении задачи) пунктов имелись пространственные прямоугольные координаты в двух системах – общеземной и референционной. Количество опорных пунктов должно быть не менее трех, но для повышения надежности и точности их количество должно быть более представительным. Точность определения параметров Гельмерта в значительной мере зависит от точности исходных координат в двух системах, от конфигурации расположения и числа опорных пунктов. В общеземной системе опорные пункты могут быть определены с максимально возможной точностью от пунктов международной геодинамической сети (МГС). Точность референционных ($X'Y'Z'$) лимитируется точностью плоских прямоугольных координат и нормальных высот в каталогах и точностью используемой модели высот квазигеоида. Решение проблем, связанных с точностью представления координат пунктов

в референционной пространственной системе координат, является важнейшей предпосылкой успешного решения задачи определения параметров Гельмерта. Вариантами решения для систем координат малой точности (СК-42, СК-95) могут быть способы высокоточной реконструкции координат и высот пунктов [4], либо переход на новую высокоточную ГСК-2011 или иной ее аналог. Предполагается, что для ограниченных по площади территорий решение задачи определения параметров Гельмерта будет более простым, чем для территорий, значительных по площади [2].

Цель работы и исходные предпосылки

Целью настоящей работы является рассмотрение методики определения согласующих параметров Гельмерта для локальных территорий, которые могли бы позволить осуществлять цепочку координатных преобразований в проекцию Гаусса – Крюгера потенциально с точностью спутниковых определений или хотя бы с точностью каталожных значений координат и нормальных высот. Для определения параметров Гельмерта важно решить проблему обратного перехода от плоских прямоугольных координат и нормальных высот к пространственным прямоугольным координатам в референционной системе с необходимой точностью. Здесь неопределенным звеном является отсутствие доступной цифровой модели высот квазигеоида относительно референционного эллипсоида. Для эллипсоида Красовского, который до настоящего времени имеет широкое распространение в России, опубликована графическая картосхема высот квазигеоида [5], но она не обладает необходимой детализацией и точностью. В этой связи актуальной задачей может быть создание такой методики определения параметров Гельмерта, в которой не были бы задействованы высоты квазигеоида.

Методика решения задачи определения согласующих параметров Гельмерта

Исключить использование высот квазигеоида для определения согласующих параметров Гельмерта предлагается путем сближения (соприкосновения) поверхностей об-

щеземного и референцного эллипсоидов в пределах некоторой локальной территории. Соприкосновение возможно в двух случаях: в точке при совпадении нормалей эллипсоидов

(рис. 2) и вдоль некоторой замкнутой кривой, близкой к окружности при небольшом частичном «погружении» поверхности одного эллипсоида под другой (рис. 3).



Рис. 2. Принципиальная схема для определения согласующих параметров Гельмерта для локальных территорий без привлечения информации о модели высот квазигеоида при совмещении поверхностей эллипсоидов в точке

Из-за несовпадения формы и размеров эллипсоидов по мере удаления от точки касания (рис. 2) будет нарастать методическая погрешность. В табл. 1 приведен расчет на соответствие методической погрешности и радиуса локальной территории для Новосибирской области. Числовые данные получены с учетом средних радиусов кривизны поверхностей обще-

земного эллипсоида WGS-84 и эллипсоида Красовского, примерно для центра области. Из табл. 1 следует, что в радиусе локальной территории до 200 км теоретически методическая погрешность не превышает ± 26 мм. Очевидно, что чем более близкими будут размеры и формы эллипсоидов, тем в большей мере будет увеличиваться площадь локальной области.

Таблица 1

Соответствие методической погрешности и радиуса локальной территории для Новосибирской области для эллипсоидов WGS-84 и Красовского

Методическая погрешность (мм)	± 2	± 3	± 4	± 5	± 7	± 8	± 10	± 12	± 14	± 16	± 18	± 21	± 24	± 26
Радиус локальной территории (км)	55	66	78	89	100	111	122	133	144	156	167	178	189	200

В реальности, алгоритм сближения поверхностей эллипсоидов осуществляется через приравнивание нулю геодезических высот опорных пунктов в общеземной и референцной системах координат и решения задачи определения параметров Гельмерта в соответствии с критерием метода наименьших квадратов (МНК) [6], как это графически

условно изображено на рис. 3. В этом случае влияние методической ошибки может быть уменьшено примерно вдвое. Максимальные значения методических погрешностей будут распределены в центральной и периферийной зонах, а близкие к нулю — в средней полосе в районе 0,5 радиуса от центра локальной территории.



Рис. 3. Сближение поверхностей общеземного и референчного эллипсоидов по опорным пунктам по методу наименьших квадратов

Благодаря точному заданию геодезических высот пунктов в референционной и общеземной системах координат появляется возможность исключить из цепочки преобразований высоты квазигеоида и, тем самым, максимально повысить точность определения параметров Гельмерта для локальных территорий. Согласующие параметры Гельмерта, позволяют осуществлять переход координат из общеземной системы в референционную в пределах любых трехградусных зон и в широтной полосе порядка 400 км.

Нормальные высоты рекомендуется вычислять с использованием глобальной модели высот геоида EGM2008 по формулам:

$$H^Y = H - \zeta + \Delta H; \quad (1)$$

$$\Delta H = Ax + By + C, \quad (2)$$

где H^Y – нормальная высота в референционной системе координат; H – геодезическая высота в WGS-84; ζ – высота геоида для эллипсоида WGS-84 по модели EGM2008;

ΔH – поправка за систематическое смещение и наклон плоскости для разностей нормальных и ортометрических высот;

A, B, C – коэффициенты для плоскости, аппроксимирующие, соответственно, наклоны (wN, wE) и систематическое смещение разностей нормальных и ортометрических высот (ΔH_o) в пределах локальной территории.

Для решения задачи определения согласующих параметров Гельмерта создан пакет из алгоритмических программ. Исходными данными служат геодезические координаты в системе WGS-84 или в иной общеземной системе координат и плоские прямоугольные координаты в проекции Гаусса – Крюгера и нормальные высоты опорных пунктов. Выходными данными являются согласующие параметры Гельмерта и контрольная таблица разностей вычисленных и каталожных значений для плоских прямоугольных координат и нормальных высот. Для вычисления нормальных высот на этапе преобразования от геодезических высот в общеземной системе координат необходимо, в дополнение к перечисленным исходным данным, иметь цифровую модель высот геоида EGM2008 [7], являющуюся, на данный момент, одной из лучших глобальных моделей [8–12].

Апробация методики определения согласующих параметров Гельмерта

Для апробации методики взята локальная территория в диапазоне 4° по долготе и 2° по широте, в пределах которой располагается восточная часть Новосибирской области, в том числе четвертая зона МСК региона. Для упрощения, координаты в МСК моделировались путем пересчета координат пунктов в СК-95 с осевого меридиана 14-й шестиградусной зоны на осевой меридиан 4-й трехградусной зоны МСК региона.

Для этой территории представлено два варианта вычисления согласующих параметров Гельмерта:

- 1) для 14 пунктов СДГС, имеющих реконструированные (сопоставимые с точностью спутниковых измерений) нормальные высоты и координаты;
- 2) для 20 пунктов ГГС с нереконструированными (каталожными) нормальными высотами и координатами.

Схема расположения пунктов СДГС на территории показана на рис. 4. Пункты ГГС практически повторяют конфигурацию пунктов СДГС.

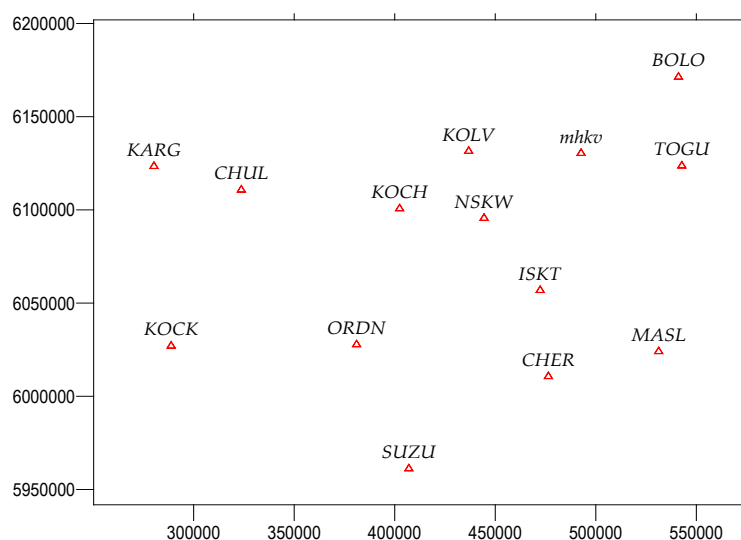


Рис. 4. Схема размещения пунктов СДГС в восточной части Новосибирской области

Координаты СДГС и ГГС в системе WGS-84 определены из геодезической привязки к пунктам МГС с точностью субсантиметра (величины в интервале менее $\pm 1,5$ см). Вычисленные согласующие параметры Гельмерта для обоих вариантов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Согласующие параметры Гельмерта для 4-й зоны МСК Новосибирской области для реконструированных координат СДГС (вариант 1) и каталожных значений для пунктов ГГС (вариант 2)

Обозначение параметра	ΔX (м)	ΔY (м)	ΔZ (м)	m (10^{-6})	W_x (угл. секунд)	W_y (угл. секунд)	W_z (угл. секунд)	СКП ед. веса (м)
Числовое значение (вариант 1)	-9,8518	-75,6208	-112,4879	4,06513	-2,0394	-0,8358	0,6211	$\pm 0,012$
Числовое значение (вариант 2)	-9,6713	-75,8708	-112,9235	4,14064	-2,0490	-0,8945	0,5265	$\pm 0,041$

Отличия в линейных параметрах Гельмерта между вариантами достигают порядка $\pm 0,18$ – $0,44$ м. Такие результаты указывают на существенное влияние ошибок исходных данных за счет увеличенного, для локальной области, значения числа обусловленности

матрицы коэффициентов системы параметрических уравнений, из решения которой по МНК определяются параметры Гельмерта. Опытным путем определено, что для территории Новосибирской области число обусловленности имеет значение примерно на два по-

рядка больше, чем при глобальном расположении опорных пунктов ($\approx 150/1,4$). Но также выявлена важная особенность семипараметрического преобразования Гельмерта. Несмотря на заметный разброс значений отдельных параметров, их совокупное влияние на результат преобразования в значительной мере взаимно компенсируется. Это будет показано ниже, при сравнении точности преоб-

разования для пунктов ГГС по двум вариантам определения согласующих параметров Гельмерта.

Для вычисленных по согласующим параметрам Гельмерта и реконструированным значениям получены разности координат и нормальных высот для выборки из 14 пунктов СДГС, информация о которых представлена в табл. 3.

Таблица 3

Разности, вычисленные по согласующим параметрам Гельмерта (вариант 1) и реконструированным значениям координат и нормальных высот пунктов СДГС в 4-й зоне МСК

Номер п/п	Название Пункта	$\Delta x(\text{мм})$	$\Delta y(\text{мм})$	$\Delta H^y(\text{мм})$	$\Delta xy (\text{мм})$
1	2	3	4	5	6
1	<i>BOLO</i>	-20	17	1	26
2	<i>CHER</i>	14	01	6	14
3	<i>CHUL</i>	-06	-8	-4	10
4	<i>ISKT</i>	4	1	4	4
5	<i>KARG</i>	-13	-13	4	18
6	<i>KOCH</i>	2	9	1	9
7	<i>KOCK</i>	-14	11	4	18
8	<i>KOLV</i>	-3	11	-1	11
9	<i>MASL</i>	7	-13	-1	15
10	<i>mhkv</i>	-9	8	-9	12
11	<i>NSKW</i>	-4	7	-4	8
12	<i>ORDN</i>	1	12	-2	12
13	<i>SUZU</i>	20	15	-5	25
14	<i>TOGU</i>	-19	5	6	20
Минимум		-20	-13	-9	4
Максимум		20	17	6	26
Среднее		-3	5	0	14
СКП		12	10	5	6

В последнем столбце помещены разности в положении пунктов в плане. Наиболее точное преобразование из общеземной WGS-84 в референционную систему получено для нормальных высот. СКП разностей вычисленных и каталожных значений для нормальных высот соответствует ± 5 мм, для плоских прямоугольных координат – порядка ± 6 –12 мм с максимальной амплитудой до ± 20 мм.

На рис. 5 графически показано пространственное распределение разностей геодезических высот в WGS-84 и референционной системе эллипсоида Красовского для данного варианта согласующих параметров Гельмерта. Можно заметить, что распределение разностей геодезических высот соответствует теоретическому распределению методических

погрешностей в пределах локальной территории (см. рис. 3). Максимальные разности геодезических высот распределены по периферии и в центре, а минимальные разности – по замкнутой кривой близкой к окружности в средней полосе локальной области.

По второму варианту разности, вычисленные по согласующим параметрам Гельмерта и каталожным значениям, приведены в табл. 4. СКП разностей имеют порядок величин ± 50 –60 мм, что для каталожных значений координат соответствует точности МСК в Новосибирской области, образованной от СК-95 [13]. Преобразованные по согласующим параметрам Гельмерта координаты и высоты отличаются от каталожных значений, но эти отличия находятся в пределах случайных ошибок каталога.

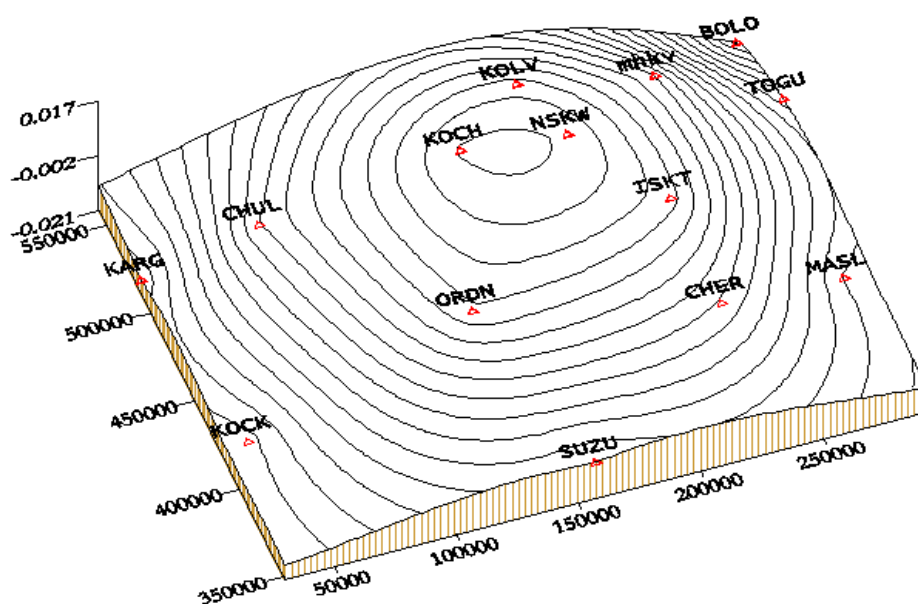


Рис. 5. Пространственное распределение разностей геодезических высот в WGS-84 и референционной системе эллипсоида Красовского для варианта согласующих параметров Гельмерта по пунктам СДГС

Таблица 4

Разности, вычисленные по согласующим параметрам Гельмерта (вариант 2) и каталожным значениям координат и нормальных высот пунктов ГГС в 4-й зоне МСК

Номер п/п	Название пункта	Δx (мм)	Δy (мм)	ΔH^y (мм)	$\Delta xy $ (мм)
1	2	3	4	5	6
1	<i>alab</i>	-13	-78	7	79
2	<i>bashins</i>	16	18	101	24
3	<i>borc</i>	-29	16	-13	33
4	<i>bugr</i>	45	52	73	69
5	<i>chilino</i>	-107	64	2	125
6	<i>chuk</i>	-56	70	37	90
7	<i>frm2</i>	-22	-8	-2	23
8	<i>holo</i>	49	4	-50	49
9	<i>isktm</i>	48	12	-103	49
10	<i>jana</i>	-11	-29	17	31
11	<i>kroz</i>	-11	-12	9	16
12	<i>logo</i>	-25	-19	-115	31
13	<i>medy</i>	-55	-80	68	97
14	<i>mstv</i>	25	9	9	27
15	<i>porot</i>	5	51	79	51
16	<i>poselok</i>	85	71	-4	111
17	<i>rtul</i>	40	8	-43	41
18	<i>salamatovo</i>	-35	-15	-3	38
19	<i>vorv</i>	-56	23	-37	61
20	<i>zelklin</i>	50	-80	-29	94
Минимум		-107	-80	-115	16
Максимум		85	71	101	125
Среднее		-3	4	0	57
СКП		48	46	56	32

Для контроля результатов, представленных в табл. 4, выполнена калибровка для тех же исходных данных, что и при определении согласующих параметров Гельмерта для пунктов ГГС (вариант 2), и аналогичным образом получены разности координат и нормальных высот, которые приведены в табл. 5.

Таблица 5

Разности вычисленных координат и нормальных высот пунктов ГГС по результатам калибровки и согласующим параметрам Гельмерта (вариант 2)

Номер п/п	Название пункта	$\Delta x(\text{мм})$	$\Delta y(\text{мм})$	$\Delta N^y(\text{мм})$	$\Delta xy (\text{мм})$
1	2	3	4	5	6
1	<i>alab</i>	-19	2	-13	19
2	<i>bashins</i>	3	-14	19	14
3	<i>borc</i>	-8	1	3	8
4	<i>bugr</i>	9	11	13	14
5	<i>chilino</i>	0	14	-10	14
6	<i>chuk</i>	-2	10	-8	10
7	<i>frm2</i>	-3	4	-10	5
8	<i>holo</i>	3	-5	10	6
9	<i>isktm</i>	3	0	11	3
10	<i>jana</i>	-13	-4	-17	14
11	<i>kroz</i>	-11	19	-10	22
12	<i>logo</i>	-7	15	18	17
13	<i>medy</i>	-6	-18	-28	19
14	<i>mstv</i>	-2	-18	29	18
15	<i>porot</i>	11	21	20	24
16	<i>poselok</i>	19	18	23	26
17	<i>rtul</i>	1	3	6	3
18	<i>salamatovo</i>	-17	-1	9	17
19	<i>vorv</i>	-6	9	-8	11
20	<i>zelklin</i>	-10	12	4	16
Минимум		-19	-18	-28	3
Максимум		19	21	29	26
Среднее		-3	4	3	14
СКП		9	12	15	7

Результаты отражают хорошую согласованность преобразований координат и высот из общеземной системы координат WGS-84 в МСК с СКП порядка $\pm 7-15$ мм двумя независимыми способами. Это может служить реальным подтверждением правильности разработанной методики с использованием согласующих параметров Гельмерта.

Заслуживает внимания заключительный эксперимент по сравнению результатов преобразований координат и высот пунктов ГГС по согласующим параметрам Гельмерта, определенных по первому и второму вариантам. Разности координат показаны в табл. 6. Так как преобразование по нормальным высотам выполнялось по идентичным данным их разности априори равны нулю и по этой причине в таблице не приведены.

Полученные в табл. 6 разности координат могут быть объяснены более низкой точностью исходных данных в МСК для второго варианта и, в некоторой мере, отличиями в количестве опорных пунктов ГГС и в геометрии их расположения на территории, по сравнению с пунктами СДГС. Результаты, отраженные в табл. 4–6, подтверждают, что в процессе преобразования координат из общеземной в референционную систему происходит взаимная компенсация «грубых» значений параметров Гельмерта (вариант 2) по сравнению с «эталонными» результатами, полученными в результате калибровки и по согласующим параметрам Гельмерта по варианту 1. Отличия линейных параметров порядка $\pm 0,18-0,44$ м между двумя вариантами согласующих параметров Гельмерта не проявили себя в преобразованных в референционную

систему плоских координат и, соответственно, в их разностях.

С целью анализа расхождений координат, представленных в табл. 6, был образован ключ преобразования для плоских координат в проекции Гаусса – Крюгера [14], вычисленных по варианту 1 и варианту 2. Получены следующие параметры ключа: смещение начала координат по оси абсцисс -0,010 м, ординат -0,016 м, угол

разворота осей -0,1114 угловых секунды и разность линейных масштабных коэффициентов +0,07625 PPM. Разности координат в результате преобразования по ключу не превысили $\pm 1-2$ мм (рис. 6), что указывает на сохранение высокой степени ортогональности и взаимной точности координат пунктов в процессе преобразований по разным вариантам согласующих параметров Гельмерта.

Таблица 6

Разности координат пунктов ГГС в 4-й зоне МСК, вычисленные по согласующим параметрам Гельмерта для двух вариантов

Номер п/п	Название пункта	Δx (мм)	Δy (мм)	$\Delta xy $ (мм)
1	2	3	4	5
1	<i>alab</i>	-85	-22	88
2	<i>bashins</i>	45	19	49
3	<i>borc</i>	45	-29	54
4	<i>bugr</i>	-30	27	40
5	<i>chilino</i>	29	-75	80
6	<i>chuk</i>	23	-65	69
7	<i>frm2</i>	-42	-18	46
8	<i>holo</i>	24	5	25
9	<i>isktm</i>	9	0	9
10	<i>jana</i>	-73	-39	83
11	<i>kroz</i>	56	-72	91
12	<i>logo</i>	-67	11	68
13	<i>medy</i>	-76	-72	105
14	<i>mstv</i>	60	16	62
15	<i>porot</i>	-42	43	60
16	<i>poselok</i>	-30	55	63
17	<i>rtul</i>	-10	-16	19
18	<i>salamatovo</i>	66	-27	71
19	<i>vorv</i>	38	-53	65
20	<i>zelklin</i>	-69	1	69
Минимум		-85	-75	9
Максимум		66	55	105
Среднее		-6	-16	61
СКП		52	39	24

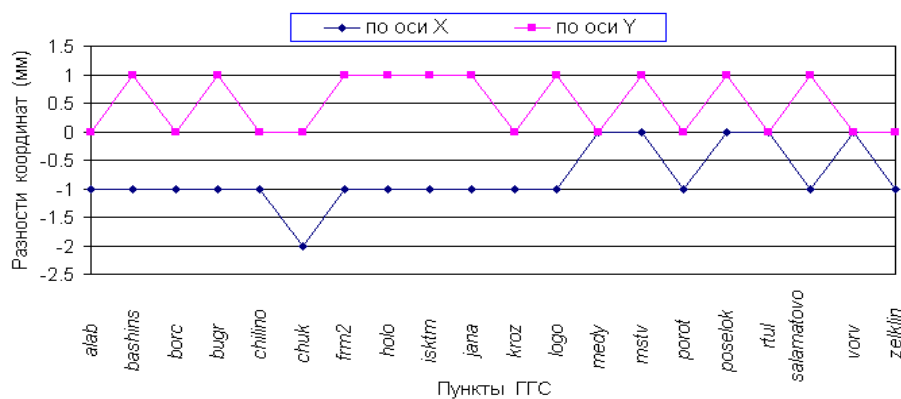


Рис. 6. Разности преобразованных по ключу плоских координат в проекции Гаусса – Крюгера для пунктов ГГС по двум вариантам согласующих параметров Гельмерта

Заключение

Разработана методика определения согласующих параметров Гельмерта между общеземными и референчными системами координат для локальных территорий без привлечения информации о высотах квазигеоида. Данная методика основана на сближении локальных участков поверхностей общеземного и референчного эллипсоидов путем задания нулю геодезических высот опорных пунктов в обеих системах координат и решения задачи определения параметров Гельмерта в соответствии с критерием МНК. Размеры локальной территории зависят от заданных предельных методических погрешностей, присущих данному способу определения параметров Гельмерта. Для предельных значений методических погрешностей порядка $\pm 2-3$ см, радиус локальной территории составляет порядка 200 км от центра территории, что соответствует размерам трехградусных зон МСК и полосе широт до 400 км.

Выполнена апробация методики для локальной территории в восточной части Новосибирской области размерами 4° по долготе и 2° по широте для 4-й трехградусной зоны МСК региона. Вычислены два варианта согласующих параметров – для 14 пунктов СДГС с реконструированными плоскими координатами и нормальными высотами и для 20 пунктов ГГС с не реконструированными (каталожными) координатами и нормальными высотами. Отличие линейных параметров Гельмерта между двумя вариантами составили $\pm 0,18-0,44$ м. Отмечена компенсационная особенность семипараметрического преобразования координат по совокупному влиянию «грубых» значений параметров Гельмерта на окончательный результат в референчной системе.

Для контроля преобразованных координат и нормальных высот по согласующим параметрам Гельмерта для варианта с пунктами ГГС применен способ калибровки. СКП для разностей, полученных двумя независимыми способами, составили $\pm 7-15$ мм, что является

подтверждением правильности разработанной методики.

Для сравнения результатов преобразования для пунктов ГГС по двум вариантам согласующих параметров Гельмерта был создан ключ перехода в проекции Гаусса – Крюгера. Точность преобразования по ключу для плоских координат составила $\pm 1-2$ мм. Таким образом, применение согласующих параметров Гельмерта позволяет получать из высокоточных общеземных систем координат варианты реконструированных референчных плоских координат, которые будут иметь высокую степень точности взаимных положений пунктов и могут быть с высокой точностью преобразованы между собой в проекции Гаусса – Крюгера с помощью ключа перехода. Благодаря этому возможно с минимальными издержками преобразовывать «прежние, неточные» МСК в их точные аналоги, для которых «легко» устанавливать связи с любыми другими точными общеземными или референчными системами координат, например, между WGS-84 и ГСК2011, WGS-84 (ГСК2011) и МСК на основе СК-42 или СК-95.

Методически более наглядным становится вычисление нормальных высот благодаря замене высот квазигеоида высотами геоида, хотя фактически алгоритм преобразования высот не изменился.

Следует также отметить, что использование согласующих параметров Гельмерта значительно упрощает создание калибровочных участков, где необходимыми параметрами должны быть параметры проекции пользователя, согласующие параметры Гельмерта, модель высот геоида относительно общеземного эллипсоида и параметры калибровки по высоте. Параметры калибровки в плане вычислять нет необходимости.

Автор выражает искреннюю благодарность за сотрудничество в обсуждении вопросов по тематике статьи главному технологу АО «ПО Инжгеодезия» П. К. Шитикову, доцентам СГУГиТ В. И. Обиденко и А. В. Елагину

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М. : Изд-во стандартов, 2008.
2. Горобец В. П. Определение связи между геоцентрической системой координат и СК-95 // Научно-технический сборник «Физическая геодезия». – М. : Научный мир, 2013. – С. 95–101.
3. Topcon Tools. Руководство оператора. Номер по каталогу 7010-0612. Редакция «G». – Topcon Positioning Systems, Inc. Май, 2006. – С. 27–34.

4. Шендрик Н. К. Способ итераций для высокоточной реконструкции координат пунктов локальных геодезических сетей // Геопрофи. – 2014. – № 5. – С. 44–48.
5. ГКИНП (ГНТА)-06-278–04. Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95). – Москва : ЦНИИГАиК, 2004. – 138 с.
6. Сурнин Ю. В., Ащеулов В. А., Кужелев С. В., Михайлович Е. В., Шендрик Н. К. Совершенствование и практическая реализация динамического метода космической геодезии : монография / под общей редакцией Ю. В. Сурнина. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – С. 147–149.
7. Шендрик Н. К. Формирование локальной цифровой модели высот геоида на территорию Новосибирской области // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып.4 (36). – С. 66–73.
8. Баранов В. Н., Королевич В. В. Пример оценки точности модели EGM 2008 по астрономо-геодезическим данным // Науки о Земле. – 2011. – № 2. – С. 39–43.
9. Голдобин Д. Н., Мазурова Е. М., Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Косарев Н. С., Косарева А. М. Одномерное сферическое преобразование Фурье и его реализация для расчета глобальной модели квазигеоида в нулевом приближении теории Молоденского // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 45–52.
10. Обиденко В. И., Опритова О. А., Решетов А. П. Разработка методики получения нормальных высот на территорию Новосибирской области с использованием глобальной модели геоида EGM2008 // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 14–25.
11. Ганагина И. Г., Челнокова Д. С., Голдобин Д. Н. Создание модели квазигеоида на локальном участке средствами ГИС // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (31). – С. 14–25.
12. Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н., Мазурова Е. М., Косарев Н. С., Косарева А. М. Современные глобальные модели квазигеоида: точностные характеристики и разрешающая способность // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 30–49.
13. Шендрик Н. К. Исследование точности геодезической сети активных базовых станций Новосибирской области в государственной системе координат и высот // Геодезия и картография. – 2014. – № 1. – С. 2–7.
14. Шендрик Н.К. Методика выноса проектных точек на местность в WGS-84 // Геопрофи. – 2016 – № 5. – С. 40–42.

Получено 29.06.2021

© Н. К. Шендрик, 2021

METHODOLOGY FOR DETERMINING HELMERT'S CONSISTENT PARAMETERS FOR LOCAL TERRITORIES

Nikolay K. Shendrik

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Head of the Laboratory, Department of Space and Physical Geodesy, phone: (913)739-55-17, e-mail: snk_aig@mail.ru

A method for determining the Helmert matching parameters for converting the coordinates of points from the common terrestrial to the reference coordinate system has developed. The technique is based on the maximum alignment of the surfaces of the common terrestrial and reference ellipsoids within a certain local territory and does not imply knowledge of the heights of the quasigeoid. The radius of the local area is limited by a given methodological error in the transformation of coordinates from general terrestrial system to Gauss-Kruger projection. For a methodical error of $\pm 2-3$ cm, the radius of the local area is about 200 km. Two options for determining the Helmert matching parameters for the fourth three-degree zone of the MSC of the Novosibirsk region are given: according to the reconstructed coordinates and heights of the SDGN, and according to the catalog coordinates and heights of the SGN points located in the same territory.

Keywords: technique, Helmert matching parameters, local territory, coordinate transformation, general terrestrial and reference coordinate system, convergence of ellipsoid surfaces, quasigeoid heights, digital geoid model, geodetic and normal height, Gauss-Kruger projection, local coordinate system, transition key

REFERENCES

1. Standards Russian Federation. (2008). GOST R 51794-2008. Global navigation satellite systems. Coordinate systems. Methods for transforming coordinates determined points. Moscow: Standards Publ. [in Russian].
2. Gorobets, V. P. (2013). Determination of the relationship between the geocentric coordinate system and the SK-95. In *Nauchno-tehnicheskij sbornik "Fizicheskaja geodezija»Scientific" [Science and Technical Collection "Physical Geodesy"]* (pp. 95–101). Moscow: Nauchnyj mir Publ. [in Russian].
3. *Topcon Tools. Operator's manual.* (2006). Catalog number 7010-0612. Revision "G" (p. 27–34). Topcon Positioning Systems, Inc. [in Russian].
4. Shendrik, N. K. (2014). Method of iterations for high-precision reconstruction of coordinates of points of local geodetic networks. *Geoprofi*, 5, 44–48 [in Russian].
5. Geodetic, Cartographic Instructions, Norms and Regulations. (2004). User's manual for work in the coordinate system of 1995 (SK-95). GKINP (GNTA) – 06-278-04. Moscow: TsNIIGAiK Publ., 138 p. [in Russian].
6. Surnin, Yu. V., Ashcheulov, V. A., Kuzhelev, S. V., Mikhailovich, E. V., & Shendrick, N. K. (2015). *Sovershenstvovanie i prakticheskaja realizacija dinamičeskogo metoda kosmičeskogo geodezii [Improvement and practical implementation of the dynamic method of space geodesy]* (p. 147–149). Yu. V. Surnin (Ed.). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
7. Shendrik, N. K. (2016). Formation of a local digital model of geoid heights to the territory of the Novosibirsk region. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 66–73 [in Russian].
8. Baranov, V. N., & Korolevich, V. V. (2011). An example of estimating the accuracy of the EGM model 2008 on astronomical and geodetic data. *Nauki o Zemle [Earth Sciences]*, 2, 39–43 [in Russian].
9. Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Kosarev, N. S., & Kosareva A. M. (2015). One-dimensional spherical Fourier transform and its implementation for calculating the global quasigeoid model in the zero approximation of the theory Molodensky. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(31), 45–52 [in Russian].
10. Obidenko, V. I., Opritova, O. A., & Reshetov, A. P. (2016). Method development obtaining normal heights to the territory of the Novosibirsk region from using the global geoid model EGM2008. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 14–25 [in Russian].
11. Ganagina, I. G., Chelnokova, D. S., & Goldobin, D. N. (2016). Model creation quasigeoid on a local site by means of GIS. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(31), 14–25 [in Russian].
12. Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., Kosarev, N. S., & Kosareva, A. M. (2017). Modern global quasigeoid models: accuracy characteristics and resolution. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(1), 30–49 [in Russian].
13. Shendrik, N. K. (2014). Investigation of the accuracy of the geodetic network of active base stations of the Novosibirsk region in the state system of coordinates and heights. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 1, 2–7 [in Russian].
14. Shendrik, N. K. (2016). Methodology for setting out design points on the ground in WGS-84. *Geoprofi*, 5, 40–42 [in Russian].

Received 29.06.2021

© N. K. Shendrick, 2021