

УДК: 528.236.4

DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-3-57-67

## Методика преобразования трехмерных положений пунктов между геоцентрическими и референчными системами координат для региональных территорий

Н. К. Шендрик<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: snk\_aig@mail.ru

**Аннотация.** Разработана методика преобразования трехмерных положений пунктов для региональных территорий между геоцентрическими и референчными системами координат (СК) путем согласования параметров Гельмерта с моделью высот геоида для референчной системы координат и трехмерными положениями пунктов в обеих СК. Методика основана на замене модели высот квазигеоида на модель высот геоида EGM2008, преобразованную для референчных систем координат. Для региональных территорий обеспечивается точность определения параметров Гельмерта и точность преобразований координат и высот пунктов на уровне точности положений пунктов в общеземной и референчной системах координат. Приведены примеры вычислений согласованных параметров Гельмерта с преобразованной моделью высот геоида EGM2008 между референчной системой координат СК-95 и WGS-84, СК-42, ГСК-2011 для территории Новосибирской области.

**Ключевые слова:** методика преобразования трехмерных положений пунктов, региональная территория, согласованные параметры Гельмерта, модель высот геоида EGM2008, геоцентрическая и референчная системы координат

### Введение

Использование спутниковых измерений позволяет создавать геодезические сети и определять положение пунктов с высокой точностью, порядка нескольких миллиметров. С 1 января 2021 г. в России официально введена в действие государственная высокоточная геоцентрическая система координат ГСК-2011 [1] и для всех ранее созданных геодезических, картографических, кадастровых и других данных должны быть определены параметры преобразования из референчных систем координат СК-42 и СК-95 в ГСК-2011. В этой связи актуальной задачей является разработка методик и алгоритмов наиболее точных трехмерных преобразований между геоцентрическими и референчными системами координат [2, 3].

Для решения данной задачи выделим два наиболее значимых фактора:

- 1) наличие модели высот квазигеоида (геоида) для референчной системы координат;
- 2) исключение погрешностей в координатах и высотах пунктов, которые присут-

ствуют в существующих каталогах координат на основе СК-42, СК-95 и в нормальных высотах путем калибровки или применения иных способов повышения точности трехмерных положений пунктов [4];

По первому пункту предлагается сделать замену модели высот квазигеоида на высокоточную модель высот геоида, например, EGM2008, и дальнейшие ее преобразования применительно к референчным СК. Наиболее проблемным является реализация второго фактора в части повышения точности значений плоских прямоугольных координат и нормальных высот в существующих каталогах до требуемого уровня, а в контексте данной задачи до точности спутниковых измерений. Для этих целей разработан ряд методов, способов и технологий: модернизация (трансформация) [5], калибровка [6], реконструкция [4, 7]. Проблемой, в данном случае, является не столько техническая реализация, сколько существующая нормативная практика, препятствующая модернизации каталогов координат и высот. В случае использования значений координат и высот пунктов с понижен-

ной точностью, вычисленные параметры Гельмерта будут обеспечивать точность преобразований на уровне фактической точности трехмерных положений пунктов и точности референцной модели высот геоида.

***Методика преобразования трехмерных положений пунктов между геоцентрическими и референциными системами координат***

В основу разработанной методики положено формирование цифровой модели высот геоида EGM2008, преобразованной применительно к референциальным системам координат [8]. Замена модели высот квазигеоида на модель геоида EGM2008 выполнена по трем основаниям: 1) отсутствие доступных моделей высот квазигеоида; 2) свободный доступ в Интернете к высокоточной глобальной модели высот геоида EGM2008 [9]; 3) на равнинных и всхолмленных территориях земной суши, где расположены, в основном, объекты работ, отличия высот геоида и квазигеоида незначительны и находятся в пределах  $\leq 2,5$  см [10]. Использование модели высот геоида для референциальных СК не вызывает сложностей ни при вычислении параметров Гельмерта, ни в процессе последующих координатных преобразований. В значениях параметров Гельмерта автоматически учитываются систематика и наклоны плоскости для разностей нормальных и ортометрических высот. По полученным таким образом параметрам Гельмерта становится возможным осуществлять точный переход (на уровне точности исходных координат и высот в двух системах) от геоцентрических положений пунктов к плоским координатам в проекции Гаусса – Крюгера и нормальным высотам и, соответственно, выполнять обратный переход. Преобразование координат в плане выполняется в соответствии с алгоритмами [11–13], а преобразование высот – по формуле

$$H = H^{\gamma} + \zeta,$$

где  $H^{\gamma}$ ,  $H$  – нормальная и геодезическая высоты в референциальной СК;  $\zeta$  – высота геоида в референциальной СК.

На этом этапе происходит замена высот квазигеоида высотами геоида. Эти отличия в дальнейшем автоматически учитываются при вычислении значений параметров Гельмерта и, таким образом, их влияние на точность преобразования из геоцентрической в референциальную систему координат и обратно, в пределах точности модели высот геоида и нормальных высот, взаимно исключается.

После перехода от геодезических координат к пространственным прямоугольным координатам в общеземной и референциальной СК составляется система линейных параметрических уравнений и выполняется решение по методу наименьших квадратов (МНК) с использованием сингулярного разложения матрицы коэффициентов и оценка точности вычисления параметров Гельмерта [13]. Следует отметить, что данную методику можно также применять для установления связей (вычисления параметров Гельмерта) между двумя произвольными СК как общеземными, так и референциальными. Однако используемые специализированные программы (ПО) не всегда могут реализовывать данную возможность. Зачастую такие связи устанавливаются только через систему WGS-84 в два этапа: из начальной СК в WGS-84, а затем из WGS-84 в конечную СК. Для проведения исследований автором разработан пакет «GeoRef», который реализует возможности предлагаемой методики.

***Апробация методики преобразования трехмерных положений пунктов между геоцентрическими и референциальными системами координат***

Апробация методики рассмотрена на примерах вычисления параметров Гельмерта для Новосибирской области (НСО). Модель высот геоида EGM2008 являлась исходной для преобразования ее в референциальные системы координат СК-95 и СК-42. Методика формирования моделей высот геоида для референциальных систем координат рассмотрена в статье [8]. Результаты вычислений параметров Гельмерта представлены в табл. 1 для 7 вариантов связи наиболее используемых систем координат WGS-84, СК-95, СК-42 и ГСК-2011. Вари-

анты 8 и 9 соответствуют принятым стандартным значениям параметров Гельмерта для всей территории России [12, 14]. В таблице, для каждого варианта в первой (информационной) строке в сокращенном виде, отображена информация, между какими системами координат определены параметры Гельмерта; использованная модель высот геоида – оригинальная EGM2008\_WGS84 (вариант 1), или преобразованная в референционную систему координат EGM2008\_CK95, или EGM2008\_CK-42 (варианты 2–7); обо-

значение территории (НСО), для которой выполнен расчет параметров Гельмерта; тип и количество пунктов, по которым выполнялись расчеты; эпоха, на которую даны положения пунктов. Например, в первом варианте вычислены параметры Гельмерта между референционной СК-95 и общеземной системой координат WGS-84; модель высот геоида EGM2008 для эллипсоида WGS-84; расчеты выполнены по 19 пунктам СДГС НСО, исходные координаты которых взяты из каталогов на эпоху 2019 г.

Таблица 1

Параметры Гельмерта между системами координат, согласованные с моделями высот геоида для Новосибирской области

Номер варианта	$\Delta X_0$ (м)	$\Delta Y_0$ (м)	$\Delta Z_0$ (м)	$\Delta m$ ( $10^{-6}$ )	$W_x$ (угл. секунды)	$W_y$ (угл. секунды)	$W_z$ (угл. секунды)	СКП (мм)
1	СК95-WGS84_EGM2008_WGS84_НСО_СДГС_19р, эпоха 2019 г.							
	-12,243	-75,094	-112,320	+4,0954	-2,04867	-0,88639	+0,68545	±20,0
2	СК95-WGS84_EGM2008_CK95_НСО_СДГС_19р, эпоха 2019 г.							
	+23,524	-128,846	-78,514	-0,7109	+0,00313	-0,03193	-0,12211	±4,0
3	СК95-WGS84_EGM2008_CK95_НСО_СДГС_31р, эпоха 2019 г.							
	+23,214	-128,558	-78,737	-0,7046	-0,00789	-0,03393	-0,10763	±6,7
4	СК95-WGS84_EGM2008_CK95_НСО_ГГС_40р, эпоха 2019 г.							
	+23,552	-128,191	-80,181	-0,5566	-0,04706	-0,03259	-0,12802	±23,9
5	СК95-ГСК2011_EGM2008_CK95_НСО_СДГС_31р, эпоха 2019 г.							
	+24,792	-128,912	-78,596	-0,7815	+0,00351	+0,00143	-0,13374	±3,8
6	СК42-СК95_EGM2008_CK42_НСО_СДГС_19р, эпоха 2014 г.							
	+0,258	-6,827	1,460	-0,2659	+0,11684	-0,00419	-0,16583	±3,1
7	СК42-СК95_EGM2008_CK95_НСО_СДГС_19р, эпоха 2014 г.							
	+0,847	+0,714	-3,866	+0,4179	-0,18183	+0,02612	-0,15599	±2,3
8	Параметры Гельмерта для СК95-WGS84 Россия ГОСТ 32453-2017							
	+24,47	-130,89	-81,56	-0,22	0,0	0,0	-0,13	-
9	Параметры Гельмерта для СК95-ГСК2011 Россия [Геопрофи 12018]							
	+24,65	-129,14	-83,06	-0,175	-0,067	+0,004	+0,129	-

В первой строке (шапке) таблицы по столбцам введены следующие обозначения: номер варианта, параметры Гельмерта  $\Delta X_0$ ,  $\Delta Y_0$ ,  $\Delta Z_0$ ,  $\Delta t$ ,  $W_x$ ,  $W_y$ ,  $W_z$ , соответственно, смещение центра референционной системы координат относительно общеземной, поправка в линейный масштаб, углы разворота осей прямоугольной системы координат и средняя квадратическая погрешность (СКП) единицы веса оценок параметров Гельмерта из решения параметрической системы уравнений по методу наименьших квадратов [13].

*Анализ вариантов 1–2.* Из сравнения результатов определения параметров Гельмерта в вариантах 1 и 2, где использованы одинаковые исходные координаты и высоты пунктов в обеих системах, но с разными моделями вы-

сот геоида, можно видеть, что параметры Гельмерта для них существенно различаются. Тем не менее, пересчет координат из общеземной системы координат WGS-84 в референционную СК-95 и к нормальным высотам дает сопоставимые результаты с каталожными значениями плоских прямоугольных координат и нормальных высот (табл. 2). Разности, полученные с моделью EGM2008 для эллипсоида WGS-84 (вариант 1), в отличие от модели для референционной СК-95 (вариант 2), грубее примерно в 4–6 раз, но, тем не менее, находятся на уровне первых сантиметров (колонки 3–6). СКП оценок параметров Гельмерта составили, соответственно,  $\pm 20$  и  $\pm 4$  мм, что статистически соответствует значениям СКП разностей в колонках 3–10.

Таблица 2

Разности, вычисленные по согласованным параметрам Гельмерта с моделями высот геоида EGM2008\_WGS84 (вариант 1), EGM2008\_SK95 (вариант 2) и каталожными значениям координат и нормальными высотами пунктов СДГС первой очереди Новосибирской области на эпоху 2019 г.

Номер п/п	Название пункта	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta  xy $	$\Delta H'$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta  xy $	$\Delta H'$	$\Delta H'$
		(мм)	(мм)	(мм)	(мм)	(мм)	(мм)	(мм)	(мм)	(м)
		Вариант 1 (EGM2008_WGS84)				Вариант 2 (EGM2008_SK95)				(EGM2008_WGS-84)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	BARA	-12	-36	38	42	-7	-3	8	8	-28,735
2	BOLO	-30	22	37	37	-5	4	6	3	-31,019
3	CHER	17	-11	20	11	4	1	4	4	-32,141
4	CHUL	11	-02	11	-36	1	-5	5	-6	-30,248
5	DOVO	-03	06	07	-08	1	2	2	-2	-30,241
6	ISKT	06	-04	07	-03	3	0	3	4	-31,691
7	KARG	09	-05	10	-20	0	-3	3	-2	-29,831
8	KOCH	11	10	15	-28	4	4	6	-2	-30,848
9	KOCK	10	08	13	-17	5	-2	5	-2	-30,792
10	KOLV	00	15	15	-27	-3	5	6	-4	-30,779
11	KRAS	-12	20	23	32	3	1	3	5	-30,528
12	MASL	04	-25	25	26	3	-3	4	2	-32,355
13	mhkv	-12	10	16	-06	-3	3	4	-8	-31,133
14	NSKW	01	07	07	-23	-2	3	4	1	-31,164
15	ORDN	15	06	16	-27	2	1	2	-4	-31,395
16	SUZU	33	00	33	-02	7	-3	8	-4	-32,168
17	TOGU	-27	04	27	34	-5	2	5	7	-31,482
18	UBIN	04	-13	14	-08	-3	-3	4	-2	-29,432
19	ZDVI	-20	-12	23	23	-2	-3	4	2	-29,548
Минимум		-30	-36	07	-36	-7	-5	2	-8	-32,355
Максимум		33	22	38	42	7	5	8	8	-28,735
Среднее		00	00	19	00	0	0	5	0	-30,817
СКП		$\pm 16$	$\pm 15$	$\pm 10$	$\pm 25$	$\pm 4$	$\pm 3$	$\pm 2$	$\pm 4$	$\pm 0,981$

Если при пересчете из общеземной в референционную систему координат в варианте 2 заменить модель высот геоида для референционной СК-95 на модель для эллипсоида WGS-84, а параметры Гельмерта оставить прежними, то нормальные высоты получают погрешность, близкую к разности высот геоида в пунктах СДГС для этих моделей. В табл. 2 это подтверждается сравнением значений разностей нормальных высот в варианте 2 (колонки 10 и 11). В плановом положении результаты не изменились. Данный вывод важен при использовании согласованных параметров Гельмерта для ПО, в которых нет возможностей подключать модели высот геоида для референционных СК, а решаемые задачи не требуют знания высотной составляющей в положениях пунктов.

*Анализ вариантов 2–4, 8.* Сравнение вариантов 2 и 3 показательны с точки зрения изменений в значениях оценок параметров Гельмерта при увеличении числа используемых пунктов, в данном случае, с 19 до 31. Соответственно изменились площадь и геометрия расположения пунктов СДГС: 19 пунктов расположены в восточной части территории НСО, а остальные 12 пунктов – в западной. Следует отметить, что точность положений всех пунктов СДГС НСО, получивших свои каталожные значения в процессе модернизации в 2019 г., практически идентична во всех представленных системах координат (WGS-84, СК-95, ГСК-2011, МСК НСО) и по внутренней оценке точности из уравнивания спутниковой сети пунктов СДГС НСО соответствует точности на уровне сантиметра. Поэтому расхождения оценок параметров Гельмерта в вариантах 2 и 3 могут быть объяснены преимущественно за счет отличий в размерах используемых территорий, количестве и геометрии расположения пунктов. Наибольшие значения расхождений между этими вариантами наблюдаются в параметрах  $\Delta X_0$ ,  $\Delta Y_0$  и  $\Delta Z_0$ , которые достигают 3 дециметров. В совокупности с расхождениями в других четырех параметрах Гельмерта, этот факт может указывать на заметную «чувствительность» получаемых оценок параметров Гельмерта от условий задания исходных данных. Как пра-

вило, такая «чувствительность» оценок параметров, получаемых в процессе решения системы уравнений по МНК, свойственна плохой обусловленности матрицы коэффициентов, в данном случае, из-за планетарно ограниченной территории расположения пунктов. Возможно влияние точности исходной модели высот геоида EGM2008 и иных факторов, что требует проведения дополнительных исследований. Тем не менее, пересчет положений пунктов из WGS-84 в СК-95 для обоих вариантов дает вполне приемлемые результаты (рис. 1, 2). На рис. 1 и 2 слева – направо по горизонтальной оси вначале расположены 19 пунктов, относящиеся к первой, следующие 12 пунктов – ко второй очереди СДГС НСО. Из сравнения рисунков можно сделать вывод, что величины разностей для варианта 3 (см. рис. 1) по всем 31 пунктам, в целом, имеют амплитуду колебаний разностей примерно в 1,5 раза больше, чем по 19 пунктам (см. рис. 2, вариант 2). На рис. 2 совмещены два подварианта: 2.1) результаты пересчета положений пунктов и расчета разностей с вычисленными параметрами Гельмерта по 19 пунктам СДГС НСО первой очереди; 2.2) результаты по экстраполяции с полученными параметрами Гельмерта из подварианта 2.1 на 12 пунктов СДГС второй очереди. Как видно из рис. 2, разности для координат и высот заметно отличаются для пунктов, находящихся в зоне экстраполяции, то есть за пределами территории определения параметров Гельмерта. В этой зоне величины разностей в 2–4 раза превышают уровень для «внутренней» зоны определения параметров Гельмерта. Тем не менее, такие разности в пределах  $\pm 3$ –4 см все еще могут быть приемлемыми в ряде прикладных задач.

В варианте 4 параметры Гельмерта получены между СК-95 и WGS-84 с моделью высот геоида EGM2008\_СК95\_НСО для выборки из 40 пунктов ГГС с каталожными координатами и нормальными высотами. В табл. 3 показаны статистические характеристики для рядов разностей координат в плане и по нормальным высотам, вычисленные по согласованным параметрам Гельмерта и каталожным значениям.

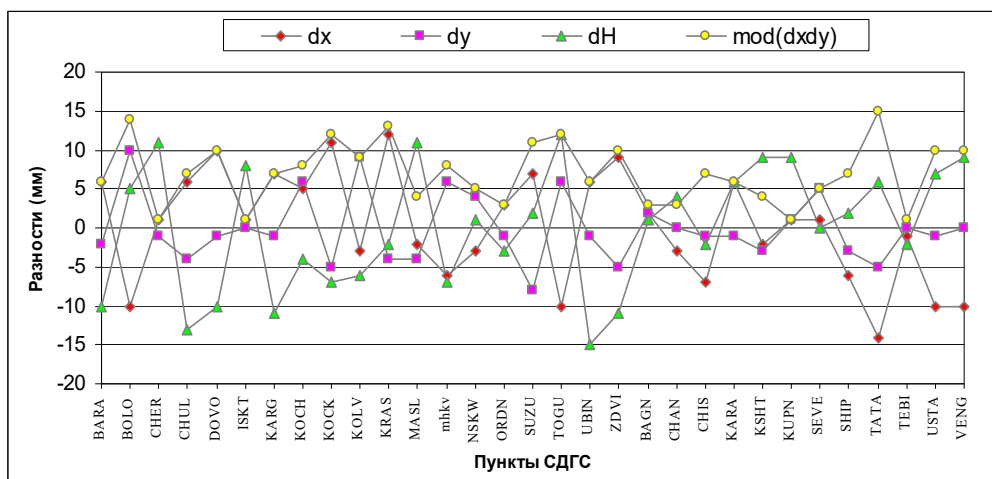


Рис. 1. Разности координат и высот, вычисленные по согласованным параметрам Гельмерта (вариант 3) с моделью высот геоида EGM2008 для СК-95 по 31 пункту СДГС НСО, и каталожными значениями

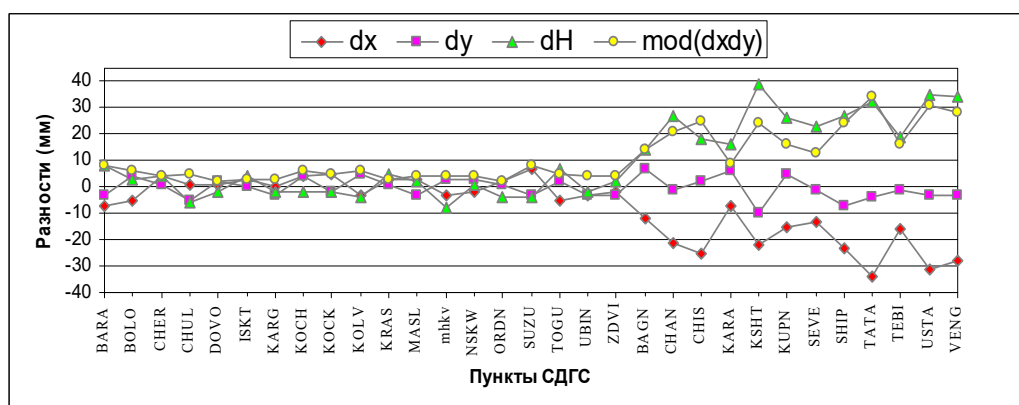


Рис. 2. Разности координат и высот, вычисленные по согласованным параметрам Гельмерта (вариант 2) с моделью высот геоида EGM2008 для СК-95 по 19 пунктам СДГС НСО первой очереди и с экстраполяцией на 12 пунктов СДГС второй очереди, и каталожными значениями

Таблица 3

Статистические характеристики для рядов разностей координат в плане и нормальных высот, вычисленные по согласованным параметрам Гельмерта (вариант 4) и каталожным значениям для 40 пунктов ГГС

Вид разностей	$\Delta x$ (мм)	$\Delta y$ (мм)	$\Delta xy $ (мм)	$\Delta H'$ (мм)
Минимум	-72	-67	2	-75
Максимум	112	114	135	52
Среднее	0	0	22	00
СКП	$\pm 27$	$\pm 24$	$\pm 28$	$\pm 18$

Из табл. 3 видно, что каталожные координаты в СК-95 и нормальные высоты для данной выборки из 40 пунктов ГГС на территории НСО характеризуются СКП менее  $\pm 3$  см с амплитудой разностей  $-75+135$ мм. Полу-

ченные результаты вполне согласуются с оценкой точности *a posteriori* для локальных областей [5, с. 62].

Вариант 8. Сравнение параметров Гельмерта для вариантов 2–4 (НСО) и варианта 8

(Россия [11]) подтверждают вывод о существенной зависимости оценок параметров Гельмерта от условий их определения, в том числе от точности координат и высот исходных пунктов, адекватности модели высот геоида (квазигеоида), размеров территории.

*Анализ варианта 5.* Данный вариант имеет смысл сравнить с вариантом 9, где представлены значения параметров Гельмерта между СК-95 и ГСК-2011 в целом для территории России [14]. Из сравнения можно видеть, что параметры Гельмерта для России и полученные автором имеют отличия, которые, в первую очередь, могут быть обусловлены региональными деформациями системы координат СК-95, а также разными моделями высот геоида (квазигеоида). Положения пунктов ФАГС в ГСК-2011 на территории России и полученные от них положения пунктов СДГС на территории Новосибирской области, можно принять практически безошибочными. В табл. 4 приведены

разности, вычисленные по параметрам Гельмерта в целом для территории России с моделью высот геоида EGM2008\_СК95\_НСО и каталожными значениями координат и нормальных высот для 19 пунктов СДГС НСО на эпоху 2019 г. Из сравнения видно, что использование параметров Гельмерта, полученных в целом для территории России, при пересчете положений из ГСК-2011 в СК-95, на примере 19 пунктов СДГС Новосибирской области, дают систематические погрешности координат в плане порядка от -4,0 до -4,5 м (по модулю 5,9–6,2 метра) и СКП ± 8–14 см. Преобразование к нормальным высотам с моделью высот геоида EGM2008\_СК95\_НСО получено с максимальными разностями порядка 1 дм и СКП ±2,2 см. На рис. 3 приведены результаты, полученные с применением параметров Гельмерта в соответствии с вариантом 5. Здесь амплитуда разностей составляет менее ±15мм и СКП менее ±5мм.

Таблица 4

Разности, вычисленные по параметрам Гельмерта в целом для территории России (вариант 9) с моделью высот геоида EGM2008\_СК95\_НСО и каталожными значениям координат и нормальных высот для 19 пунктов СДГС на эпоху 2019 г.

Номер п/п	Название пункта	$\Delta x$ (м)	$\Delta y$ (м)	$\Delta  xy $ (м)	$\Delta H'$ (м)
1	2	3	4	5	6
1	<i>BARA</i>	-4,085	-4,310	5,938	0,043
2	<i>BOLO</i>	-4,487	-4,030	6,031	0,032
3	<i>CHER</i>	-4,504	-4,253	6,195	0,088
4	<i>CHUL</i>	-4,280	-4,241	6,025	0,054
5	<i>DOVO</i>	-4,228	-4,358	6,072	0,079
6	<i>ISKT</i>	-4,474	-4,205	6,140	0,074
7	<i>KARG</i>	-4,225	-4,254	5,996	0,048
8	<i>KOCH</i>	-4,371	-4,199	6,061	0,055
9	<i>KOCK</i>	-4,293	-4,352	6,113	0,083
10	<i>KOLV</i>	-4,392	-4,143	6,038	0,043
11	<i>KRAS</i>	-4,230	-4,441	6,133	0,096
12	<i>MASL</i>	-4,560	-4,204	6,202	0,088
13	<i>mhkv</i>	-4,456	-4,105	6,059	0,046
14	<i>NSKW</i>	-4,421	-4,177	6,082	0,064
15	<i>ORDN</i>	-4,394	-4,294	6,144	0,084
16	<i>SUZU</i>	-4,460	-4,349	6,229	0,111
17	<i>TOGU</i>	-4,518	-4,083	6,090	0,048
18	<i>UBIN</i>	-4,178	-4,264	5,970	0,043
19	<i>ZDVI</i>	-4,144	-4,376	6,027	0,069
	Минимум	-4,560	-4,441	5,938	0,032
	Максимум	-4,085	-4,030	6,229	0,111
	Среднее	-4,353	-4,244	6,081	0,066
	СКП	0,141	0,108	0,079	0,022

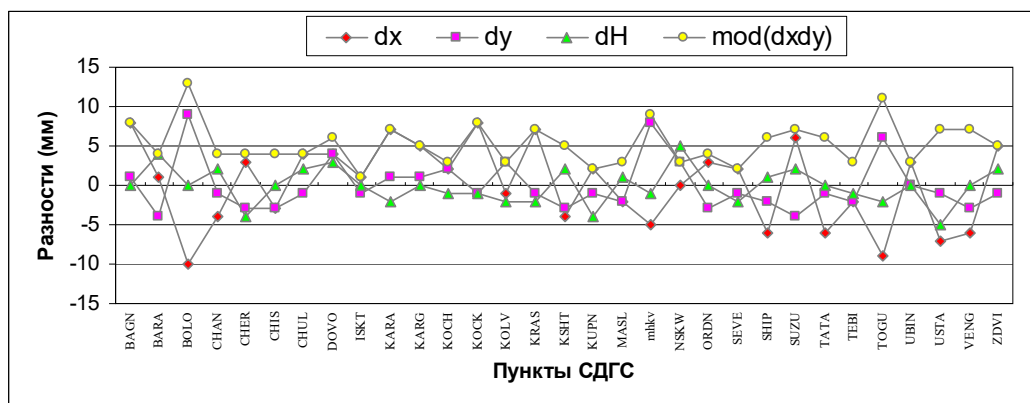


Рис. 3. Разности координат и нормальных высот, вычисленные по согласованным параметрам Гельмерта (вариант 5) с моделью высот геоида EGM2008 для СК-95 по 31 пункту СДГС НСО и каталожными значениями

Анализ вариантов 6–7. В этих вариантах использованы идентичные исходные данные, кроме моделей высот геоида. Вариант 6 является корректным с точки зрения применения модели высот геоида EGM2008\_СК42\_НСО, а в варианте 7 модель высот геоида заменена на близкую к ней EGM2008\_СК95\_НСО, что заметно отразилось на оценках параметров Гельмерта. Этот факт дополнительно подтверждает утверждение (анализ вариантов 2–3) о «чувствительности» оценок параметров Гельмерта не только от числа, геометрии и площади расположения исходных пунктов, но и от применяемой модели высот геоида. Такой вывод касается оценок параметров Гель-

мерта. Но следует сделать и другой немаловажный вывод о том, что при преобразовании трехмерных положений пунктов «в прямом и обратном направлении» параметры Гельмерта, согласованные с моделями высот геоида, близкими к поверхности референц-эллипсоида, дают вполне сопоставимые результаты. На рис. 4 приведены графики разности разностей координат в плане и нормальных высот, вычисленные по согласованным параметрам Гельмерта (варианты 6–7) с моделями высот геоида EGM2008 для СК-42 и EGM2008 для СК-95 по 19 пунктам СДГС НСО, которые подтверждают данное заключение.

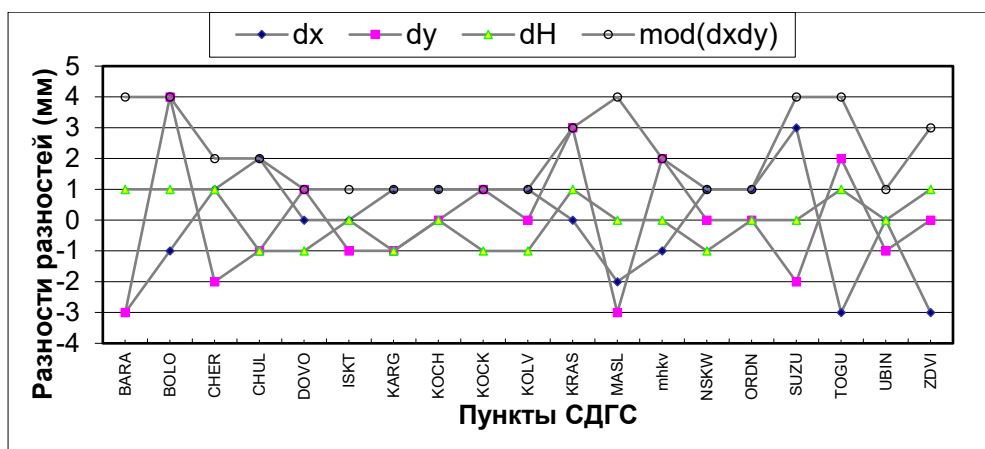


Рис. 4. Разности разностей координат в плане и нормальных высот, вычисленные по согласованным параметрам Гельмерта (варианты 6-7) с моделями высот геоида EGM2008 для СК-42 и EGM2008 для СК-95 по 19 пунктам СДГС НСО



### Заключение

Разработана методика преобразования трехмерных положений пунктов для региональных территорий между геоцентрическими и референсными системами координат путем согласования параметров Гельмерта с моделями высот геоида для референчных систем координат и трехмерными положениями пунктов в обеих СК. Методика основана на замене модели высот квазигеоида на модель высот геоида EGM2008, преобразованную для референчных систем координат. Для региональных территорий методика потенциально обеспечивает точность определения параметров Гельмерта и точность преобразований координат и высот пунктов на уровне точности положений пунктов в общеземной и референчной системах координат. Приведены примеры вычислений со-

гласованных параметров Гельмерта с преобразованной моделью высот геоида EGM2008 между референчной системой координат СК-95 и WGS-84, СК-42, ГСК-2011 для территории Новосибирской области. Выполнен анализ полученных результатов для семи наиболее показательных вариантов вычисления оценок параметров Гельмерта и результатов преобразований между референчной системой координат СК-95, общеземными системами координат WGS-84 и ГСК-2011, а также между референчными системами координат СК-42 и СК-95. Сделан вывод о заметной «чувствительности» оценок параметров Гельмерта от условий задания исходных данных – размеров региональной территории, количества и геометрии расположения исходных пунктов, а также близости применяемой референчной модели высот геоида к поверхности референц-эллипсоида.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 24.11.2016 г. № 1240 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.government.ru/>.
2. Chang Guobin, Xu Tianhe, Wang Qianxin, Zhang Shubi et al. A generalization of the analytical leastsquares solution to the 3D symmetric Helmert coordinate transformation problem with an approximate error analysis // *Advances in Space Research*. – 2017. – Vol. 59, No. 10. – P. 2600–2610.
3. Yao Yevenyo Ziggah, Hu Youjian, Alfonso Rodrigo Tierra, Prosper Bassommi Laari. Coordinate Transformation between Global and Local Data Based on Artificial Neural Network with K-Fold Cross-Validation in Ghana Transformacion coordinada entre information global y local basada en Redes Neuronales Artificiales con validacion cruzada de k-iteraciones en Gana. Yao Yevenyo Ziggah, Hu Youjian, Alfonso Rodrigo Tierra, Prosper Bassommi Laari // *Earth Sciences Research Journal*. – 2019. – Vol. 23, No. 1.
4. Шендрик Н. К. Способ итераций для высокоточной реконструкции координат пунктов локальных геодезических сетей // *Геопрофи*. – 2014. – № 5. – С. 44–48.
5. Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95). ГКИНП (ГНТА) - 06-278-04. – М. : ЦНИИГАиК, 2004. –138 с.
6. Topcon Tools. Руководство оператора. Номер по каталогу 7010-0612. Редакция “G”. – Topcon Positioning Systems, Inc., 2006. – С. 27–34, разд. 6.
7. Шендрик Н. К. Методика выноса проектных точек на местность в WGS-84 // *Геопрофи*. – 2016. – № 5. – С. 40–42.
8. Шендрик Н. К. Методика формирования цифровых моделей высот геоида для референчных систем координат // *Вестник СГУГиТ*. – 2023. – Т. 28, № 2. – С. 40–46.
9. Канушин В. Ф., Карпик А. П., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н., Косарева А. М., Косарев Н. С. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли : монография. – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. – 270 с.
10. Пеллинен Л. П. Высшая геодезия (теоретическая геодезия). – М. : Недра, 1978. – С. 65.
11. ГОСТ 32453–2017. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М. : Стандартинформ, 2017.
12. Герасимов А. П. Спутниковые геодезические сети. – М. : ООО «Издательство "Проспект"», 2012.
13. 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.
14. Попрыгин В. А., Третьяков В. И. ГСК-2011. Проблема перехода // *Геопрофи*. – 2018. – № 1. – С. 8–12.

## Об авторах

Николай Кириллович Шендрик – заведующий лабораторией кафедры космической и физической геодезии.

Получено 25.01.2023

© Н. К. Шендрик, 2023

## The method of transformation of three-dimensional positions of points between geocentric and reference coordinate systems for regional territories

N. K. Shendrik<sup>1</sup>\*

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk,  
Russian Federation

\* e-mail: snk\_aig@mail.ru

**Abstract.** A technique was developed for converting three-dimensional positions of points for regional territories between geocentric and reference coordinate systems (RCS) by matching the Helmert parameters with the geoid height model for the reference coordinate system and the three-dimensional positions of points in both SC. The technique is based on replacing the quasi-geoid height model to the EGM2008 geoid height model transformed for reference coordinate systems. For regional territories, the accuracy of determining the Helmert parameters and the accuracy of transformations of coordinates and heights of points at the level of accuracy of the positions of points in the general and reference coordinate systems is ensured. Examples of calculations of the agreed Helmert parameters with the transformed elevation model of the EGM2008 geoid between the reference coordinate system SK-95 and WGS-84, SK-42, GSK-2011 for the territory of the Novosibirsk region are given.

**Keywords:** method of transformation of three-dimensional positions of points, regional territory, coordinated Helmert parameters, EGM2008 geoid elevation model, geocentric and reference coordinate systems

## REFERENCES

1. Decree of the Government of the Russian Federation of November 24, 2016 No. No. 1240. Retrieved from <https://www.government.ru/> [in Russian].
2. Chang Guobin, Xu Tianhe, Wang Qianxin, Zhang Shubi, & et al. (2017). A generalization of the analytical leastsquares solution to the 3D symmetric Helmert coordinate transformation problem with an approximate error analysis. *Advances in Space Research*, 59(10), 2600–2610.
3. Yao Yevenyo Ziggah, Hu Youjian, Alfonso Rodrigo Tierra, & Prosper Bassommi Laari. (2019). Coordinate Transformation between Global and Local Data Based on Artificial Neural Network with K-Fold Cross-Validation in Ghana Transformacion coordinada entre information global y local basada en Redes Neuronales Artificiales con validacion cruzada de k-iteraciones en Gana. Yao Yevenyo Ziggah, Hu Youjian, Alfonso Rodrigo Tierra, Prosper Bassommi Laari. *Earth Sciences Research Journal*, 23(1).
4. Shendrik, N. K. (2014). Method of iterations for high-precision reconstruction of the coordinates of points of local geodetic networks. *Geoprofi [Geoprofy]*, 5, 44–48 [in Russian].
5. Geodetic, Cartographic Instructions, Norms and Regulations. (2004). User's guide for performing work in the coordinate system 1995 (SK-95). GKINP (GNTA) - 06-278-04. Moscow: TsNIIGAiK Publ., 138 p. [in Russian].
6. TopconTools. (2006). Operator's manual. Part number 7010-0612. Revision "G", Section 6 (pp. 27–34). Topcon Positioning Systems.
7. Shendrik, N. K. (2016). The method of carrying out design points on the ground in WGS-84. *Geoprofi [Geoprofy]*, 5, 40–42 [in Russian].
8. Shendrik, N. K. (2023). Methodology for the formation of digital models of geoid heights for reference coordinate systems. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 28(2), 40–46 [in Russian].
9. Kanushin, V. F., Karpik, A. P., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Kosareva, A. M., & Kosarev, N. S. (2015). *Issledovanie sovremennykh global'nykh modelei gravitatsionnogo polia Zemli [Research of modern global models of the Earth's gravitational field]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 270 p. [in Russian].

10. Pellinen, L. P. (1978). *Vysshaia geodeziia (teoreticheskaia geodeziia) [Higher geodesy (theoretical geodesy)]*. Moscow: Nedra Publ., P. 65 [in Russian].
11. Standards Russian Federation. (2017). GOST 32453-2017. Global navigation satellite systems. Coordinate systems. Methods for transforming the coordinates of the determined points. Moscow: Standardinform [in Russian].
12. Gerasimov, A. P. (2012). *Sputnikovye geodezicheskie seti [Satellite geodetic networks]*. Moscow: OOO Prospekt Publ. [in Russian]
13. Surnin, Yu. V., Ashcheulov, V. A., Kuzhelev, S. V., Mikhailovich, E. V., & Shendrik, N. K. (2015). *Sovershenstvovanie i prakticheskaia realizatsiia dinamicheskogo metoda kosmicheskoi geodezii [Improvement and practical implementation of the dynamic method of space geodesy]* (pp. 147–149). Yu.V. Surnin (Ed.). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
14. Poprygin, V. A., & Tretyakov, V. I. (2018). GSK-2011. The problem of transition. *Geoprofi [Geoprofy]*, 1, 8–12 [in Russian].

#### Author details

*Nikolay K. Shendrik* – Head of the Laboratory of the Department of Space and Physical Geodesy.

Received 25.01.2023

© *N. K. Shendrik*, 2023