

УДК 528.16 (571.14)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДА ОТ ОБЩЕЗЕМНОЙ К ГОСУДАРСТВЕННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ НА ТЕРРИТОРИЮ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Ягер Райнер

Университет прикладных наук Карлсруэ, факультет геоматики, D-76133 Карлсруэ, ул.Мольткештрассе, 30, д.т.н., профессор (спутниковая и математическая геодезия, методы уравнивания, геодезические измерения, разработка ПО), e-mail: reiner.jaeger@goca.info

Кельбер Симона

Дипломированный инженер по специальности «Геодезия», 75428 Иллинген, e-mail: simone.kaelber@web.de

Елена Константиновна Лагутина

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г.Новосибирск, ул.Плахотного, 10, к.т.н., ст.преподаватель кафедры «Инженерной геодезии и информационных систем», тел: (383) 343-29-55, e-mail: elena.k.frolova@gmail.com

Татьяна Игоревна Горохова

Сибирская государственная геодезическая академия, 630108, Россия, г.Новосибирск, ул. Плахотного, 10, научный сотрудник кафедры «Инженерной геодезии и информационных систем», тел: (383) 361-01-59, e-mail: tatyana.gorokhova@gmail.com

В настоящей статье описаны методика и результаты вычисления локальных параметров трансформирования между общеземной пространственной системой координат ITRF2005 и единой государственной системой геодезических координат 1995 г. (СК-95) на территорию Новосибирской области. Для повышения точности перехода от одной системы координат к другой, площадь области была поделена на небольшие участки, для которых были вычислены локальные параметры преобразования. Для вычисления параметров преобразования использовался программный комплекс SOPAG.

Ключевые слова: преобразование координат, геодезическая инфраструктура, преобразование Молоденского, патчинг, сеть референчных станций.

DETERMINATION OF TRANSFORMATION PARAMETERS BETWEEN INTERNATIONAL AND STATE COORDINATE SYSTEMS ON THE TERRITORY OF THE NOVOSIBIRSK REGION

Reiner Jäger

Karlsruhe University of Applied Sciences, D-76133 Karlsruhe, Moltkestrasse 30., Professor for Satellite and Mathematical Geodesy, Adjustment, Softwaredevelopment and Surveying. Faculty of Geomatics and Institute of Applied Research (IAF), e-mail: reiner.jaeger@goca.info

Simone Kälber

Dipl.-Ing. (FH) Geodesy, 75428 Illingen, Germany, e-mail: simone.kaelber@web.de

Lagutina Elena

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10., senior teacher, department of "Engineering geodesy and information systems", tel: (383) 343-29-55, e-mail: elena.k.frolova@gmail.com

Tatyana Gorokhova

Siberian State Academy of Geodesy (SSGA), 630108, Novosibirsk, Plahotnogo st., 10., Scientific assistant, department of "Engineering geodesy and information systems", tel: (383) 361-01-59, e-mail: tatyana.gorokhova@gmail.com

In the present article are described the technique and computation results of local transformation parameters between International Terrestrial Reference Frame ITRF2005 and state system of geodetic coordinates 1995 (SK-95) on the territory for the Novosibirsk region. For increase of reference-transformation accuracy, the hold area was divided into small patches for every of them were calculated local transformation parameters. For computation the local transformation parameters was used the program COPAG.

Key word: reference-transformation, geodetic infrastructure, Molodensky transformation, patching, reference stations network.

Для устойчивого развития территорий, решения научных и практических задач хозяйственной деятельности регионов все чаще используется геоинформационное обеспечение, полученное с применением технологий глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В частности, все более широкое распространение получают сети региональных референчных станций (наземные инфраструктуры ГНСС). При эксплуатации подобных сетей одной из основных задач является предоставление пользователям параметров трансформирования координат между общеземной пространственной системой координат (WGS-84 для GPS и ПЗ-90.02 для ГЛОНАСС) и референчными системами (СК-42 и СК-95).

Сложность решения этой задачи для сетей регионального масштаба связана с тем, что закрепленные нормативными документами параметры трансформирования вычислены на территорию всей страны и не учитывают локальные деформации референчных систем. Поэтому для корректной интеграции результатов современных работ с существующей государственной геодезической основой необходимо определить набор параметров перехода, наиболее полно соответствующих данному региону.

В Новосибирской области наземная инфраструктура ГНСС была создана по заказу администрации области в 2008/09 гг. [1]. Сейчас она функционирует в тестово-эксплуатационном режиме, предоставляя пользователям наблюдения референчных станций для пост-обработки и определений в реальном времени в системе ITRF2005. Применение установленных в [3] числовых значений для преобразования координат пунктов показывает, что локальные деформации сети ГГС увеличиваются по мере удаления от Новосибирского района и составляет в среднем 3 м (см. рис 1, б).

Одним из способов решения этой проблемы является определение локальных параметров перехода для данной конкретной области, где

координаты соседних пунктов согласованы между собой. Среди методов получения локальных параметров можно выделить «калибровку» и метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе CoPaG.

CoPaG (COntinuously PAtched Georeferencing) – программное обеспечение для вычисления параметров преобразования между различными системами координат, разработанное в Университете прикладных наук г. Карлсруэ (HKA), Германия [2]. Особенность этого ПО состоит в том, что площадь района работ делится на небольшие участки (ячейки), для каждого из которых вычисляются индивидуальные параметры перехода. Разбивка территории на отдельные ячейки (т.н. «патчинг») (рис. 1, а) позволяет избежать больших невязок, появляющихся в результате накопления ошибок классической тригонометрической сети, так называемое «слабое звено» (рис.1, б).

Концепция преобразования координат в CoPaG базируется на строгом трехмерном пространственном преобразовании между геоцентрическими (x, y, z) и географическими (B, L, h) координатами. Связь между исходной 1 и конечной 2 системами координат приводят к линейному виду и проводят дифференциальное преобразование географических координат в исходной системе $(B, L, h)_1$, т.е. преобразование Молоденского [2]:

$$\left(\begin{bmatrix} B \\ L \\ h \end{bmatrix}_2 - \begin{bmatrix} \Delta B(a,b)_1, (a,b)_2 \\ \Delta L(a,b)_1, (a,b)_2 \\ \Delta h(a,b)_1, (a,b)_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B \\ L \\ h \end{bmatrix}_1 \right) + \begin{bmatrix} v_B \\ v_L \\ v_h \end{bmatrix}_i = [Molodenski]_{(B,L,h)_1,i} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \Delta s \\ t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

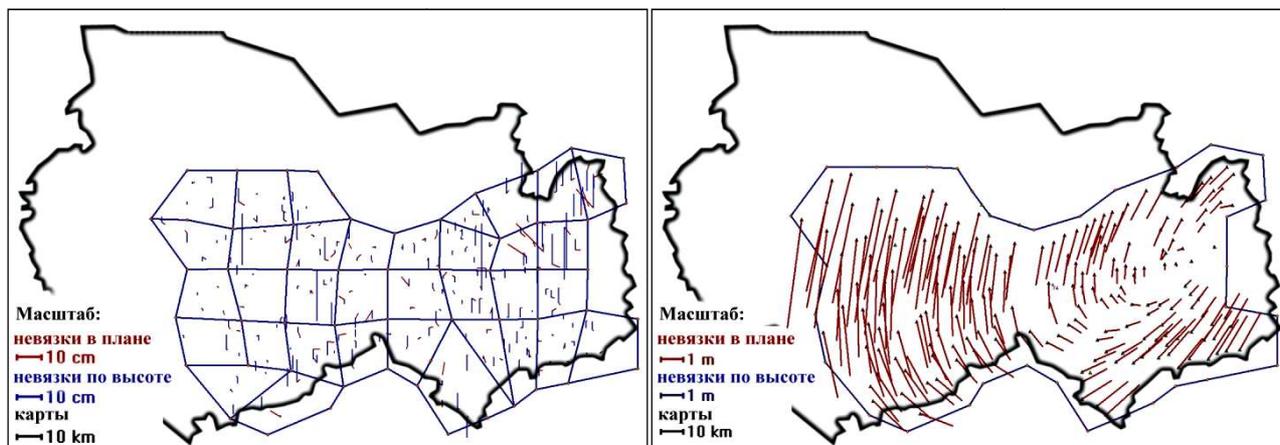
где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – углы поворота осей, Δs – разность масштабов систем координат 1 и 2, t_x, t_y, t_z – сдвиги по трем осям. В развернутом виде матрица Молоденского $[Molodenski]_{(B,L,h)_1,i}$ записывается как [2]:

$$\begin{bmatrix} -\sin L \cdot \frac{a \cdot W + h}{M + h} & \cos L \cdot \frac{a \cdot W + h}{M + h} & 0 & \frac{-\sin B \cdot \cos B \cdot N \cdot e^2}{M + h} \\ \frac{\sin B \cdot \cos L \cdot (N(1 - e^2) + h)}{(N + h) \cdot \cos B} & \frac{\sin B \cdot \sin L \cdot (N(1 - e^2) + h)}{(N + h) \cdot \cos B} & -1 & 0 \\ -N \cdot e^2 \cdot \sin B \cdot \cos B \cdot \sin L & N \cdot e^2 \cdot \sin B \cdot \cos B \cdot \cos L & 0 & h + a \cdot W \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{-\sin B \cdot \cos L}{M + h} & \frac{-\sin B \cdot \sin L}{M + h} & \frac{\cos B}{M + h} \\ \frac{-\sin L}{(N + h) \cdot \cos B} & \frac{\cos L}{(N + h) \cdot \cos B} & 0 \\ \frac{\cos B \cdot \cos L}{\cos B \cdot \sin L} & \frac{\cos B \cdot \sin L}{\cos B \cdot \sin L} & \sin B \end{bmatrix}. \quad (2)$$

На основании координат $(B, L, h)_1$ или $(x, y, z)_1$ вычисляются поправки $(\Delta B, \Delta L, \Delta h)$, обусловленные различиями эллипсоидов в исходной и конечной системе координат, по формулам [2]:

$$\begin{aligned} \Delta B_{(a_1, b_1), (a_2, b_2)} &= B(a_2, b_2 | (X, Y, Z)_1) - B(a_1, b_1 | (X, Y, Z)_1) \\ \Delta L_{(a_1, b_1), (a_2, b_2)} &= 0 \\ \Delta h_{(a_1, b_1), (a_2, b_2)} &= h(a_2, b_2 | (X, Y, Z)_1) - h(a_1, b_1 | (X, Y, Z)_1) \end{aligned} \quad (3)$$

При разработке программного обеспечения для практической реализации задач, решаемых на основе формул Молоденского (1)-(3), в программе CoPaG была реализована возможность построения замкнутой нерегулярной сети для соответствующих территорий страны (рис. 1, 2). Вместо одного единственного набора параметров d в CoPaG реализована система из n -уравнений параметров преобразования $(d_i, i = 1, \dots, n)$ – соответственно количеству ячеек n . При этом вводятся дополнительные стохастические условия непрерывности вдоль границ ячеек. Стохастичность условий непрерывности соответствует при этом рассеянию пунктов в ячейках сети. Непрерывность границ ячеек достигается за счет требования непрерывности для пунктов, лежащих на границах ячеек, или требования одинаковых невязок для пунктов, расположенных близко к границе. Соответствующие условия сформулированы и в отношении параметров соседних ячеек, участвующих в преобразовании.



а)

б)

Рис. 1. Преобразование в CoPaG между плановыми координатами СК-95 и WGS-84:

- а) по локальным параметрам, с разделением юго-восточной части НСО на 36 ячеек (невязки в среднем менее 3 см); б) по единому набору параметров для всей страны по ГОСТ [3] (невязки в среднем 3 м)

Разбивка территории на отдельные элементы с собственными параметрами преобразования $(d_i, i = 1, \dots, n)$ позволяет выявлять грубые ошибки исходных пунктов $(B, L, h)_1$ и $(B, L, h)_2$. При использовании одного набора параметров d и возникновении больших невязок, выявление грубых ошибок возможно лишь на основе ковариационной матрицы координат сети, которая не всегда доступна.

Кроме того, большие невязки подразумевают возрастающую ошибку интерполяции при преобразовании новых пунктов, чего не случается при патчинге и получении маленьких невязок (рис.1, а). Благодаря патчингу, при преобразовании классических плановых координат $(B, L)_{\text{класс}}$ в пространство ITRF, удается искоренить слабые места классической геометрии сети (рис. 1, б).

Такой подход обеспечивает гомогенизацию и исправление деформированной классической государственной сети при переходе к ITRF (рис. 1, а). При обратном переходе, напротив, пространство ITRF, не имеющее геометрически слабых мест, деформируется в классическую систему координат.

Полученные параметры преобразования $(d_i, i = 1, \dots, n)$ записываются вместе с невязками в так называемый банк параметров преобразования. Наряду с вышеупомянутыми положительными свойствами патчинга для поиска грубых ошибок и интерполяции невязок, необходимо отметить следующие преимущества и некоторые особенности трехмерного метода преобразования в CoPaG [2]:

1. В противоположность трехмерным методам преобразования в картезианских координатах, в CoPaG исходные данные могут быть как пунктами ГГС разных классов точности, так и нивелирными реперами. При вычислении параметров перехода может учитываться индивидуальная точность импортированных пунктов.

2. Концепция уравнивания CoPaG позволяет наряду со статистически обоснованным контролем качества вычисленных параметров, построить также поверхность (карту) точности перехода между ITRF и классической системой координат на всей территории (см. рис. 3).

3. Для точного преобразования плановых координат необходимы высоты соответствующей точности в исходной системе $(B, L, h)_1$. Поэтому в случае, когда имеются только плановые координаты пунктов, при вычислении банка параметров информация о высотах должна быть получена из открытых источников: поверхности относимости или высотные модели местности (EGM96, EGM2008, EIGEN05, и.т.д.).

4. Путем соответствующего разделения четвертого столбца матрицы Молоденского в формуле (2) на два столбца – в противоположность другим концепциям – в CoPaG достигается принципиально необходимое разделение между масштабами плановых и высотных координат.

5. Универсальность строгого 3D-моделирования в CoPaG позволяет применять его для вычисления параметров перехода в любой стране мира (см. обзор на www.geozilla.de).

Как упоминалось выше, в CoPaG выполняется строгий трехмерный переход от одной СК к другой по полному параметрическому предложению с предварительным преобразованием [4]. Параметры предварительного преобразования tx, ty, tz вычислялись с помощью программы WTrans, разработанной в HSKA (http://geozilla.de/eng/software/software_wtrans.htm), в которой реализовано то же преобразование Молоденского (1)-(3), что и в CoPaG.

После этого в CoPaG были импортированы координаты пунктов ГГС в системах ITRF2005 и СК-95, и создана сеть из 36 ячеек, покрывающая большую часть территории НСО, с таким расчетом, чтобы в каждой из ячеек находилось не менее 4 пунктов ГГС (см. рис. 2). Затем было выполнено строгое преобразование с использованием ранее полученных t_x, t_y, t_z , в результате которого получено 36 наборов параметров $[\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \Delta s, t_x, t_y, t_z]$ (по числу ячеек).

Предварительный контроль правильности вычисленных параметров выполнялся по величине остаточных невязок в каждой ячейке. В табл. 1 приведены остаточные невязки V_x, V_y координат пунктов ГГС в СК-95, полученных из решения в ячейках №28 (наименьшая СКО во всей сети), №73 (средняя СКО по сети), №71 (наибольшая СКО во всей сети) при переходе от ITRF2005 к СК-95.

Таблица 1. Остаточные уклонения координат пунктов в СК-95

№ ячейки	Название пункта	$V_x, \text{ м}$	$V_y, \text{ м}$
28	Салаухино	-0.0065525585	-0.0032700151
	Баклуши	0.0041690471	0.0125050538
	Горькое_у_Ярового	0.0002516014	0.0015466824
	Садомное	0.0026063948	-0.0076675458
Ср.кв.ошибка: 0.00482 м			
73	За_Сопкой	0.0154231596	0.0430873001
	Александровский	0.0306294984	0.0040377275
№ ячейки	Название пункта	$V_x, \text{ м}$	$V_y, \text{ м}$
73	Поротниково	-0.0054883252	0.0666000073
	Линевский	-0.0114727608	0.0110064695
	Поселок	-0.0023782370	-0.0240382977
	Мышланка	-0.0265745738	-0.1007275383
Ср.кв.ошибка: 0.02846 м			
71	Сушиновский	0.0774225917	-0.1278278377
	Чахлово	-0.0108994634	0.2202278452
	Степаниха	-0.1078754570	-0.0373981187
	Варламов_Падун	0.0409059271	-0.0549333074
Ср.кв.ошибка: 0.08469 м			

Для оценки средней точности, с которой будет выполняться преобразование координат по полученным параметрам в пределах построенной сети ячеек, была вычислена плоскость точности, представленная на рис. 3. Как видно из рисунка, точность преобразования убывает по мере удаления от группы пунктов, по которым вычислялись локальные параметры.

По результатам вычислений, средняя точность преобразования координат из ITRF2005 в СК-95 на территории НСО составляет 1,9 см в плане и 30,6 см по высоте, а при обратном переходе: 2,2 см в плане и 31,5 см по высоте.

Потенциально точность преобразования плановых координат может быть повышена следующими способами: разбиением области на большее количество

ячеек; использованием для вычисления первоначального сдвига (tx , ty , tz) пунктов ГГС с минимальными ошибками взаимного положения; ужесточением требований к величине остаточных невязок и СКО ячеек. Точность преобразования высот можно повысить использованием локальной модели геоида для территории НСО.

На последнем этапе вычисления из параметров перехода была сформирована база данных, которой можно воспользоваться с помощью утилиты CoPaG Access. Для проверки точности вычисленных параметров перехода в CoPaG Access было выполнено преобразование пунктов ГГС, не участвовавших в вычислениях параметров, координаты которых хорошо известны как в ITRF2005, так и в СК-95. Для наглядности были выбраны пункты, находящиеся в пределах упоминавшейся выше ячейки 73. Результаты прямого и обратного преобразования пунктов приведены в Табл. 2. Как видно из результатов, при переходе от ITRF2005 к СК-95 расхождения между ранее известными и вычисленными координатами находятся в пределах указанной выше СКО ячейки и составляют 1-2 см.

Таблица 2. Разница между контрольными и вычисленными координатами пунктов при прямом и обратном переходе

№ ячейки	Название пункта	ITRF2005 -> СК-95		СК-95 -> ITRF2005	
		Δx , м	Δy , м	ΔB , м	ΔL , м
73	Шигаево	-0,001	-0,024	-0,031	0,081
	Холодное	-0,019	0,023	0,015	- 0,016
	Лукошиково	-0,019	0,005	-0,022	0,011

Подводя итог можно сказать, что полученные локальные параметры позволяют осуществлять на территории НСО высокоточные преобразования координат между общеземной системой ITRF2005 и государственной СК-95.

В связи с подготовкой сертификации данной инфраструктуры как средства измерений и в исполнение постановления правительства РФ №139 от 3 марта 2007 г «Об утверждении Правил установления Местных систем координат» решается задача вычисления параметров преобразования к государственной системе СК-95 и региональной системе МСК-54.

В дальнейшем созданная геодезическая инфраструктура будет поддерживаться и совершенствоваться в части улучшения сервисов, обеспечивающих доступ пользователей к продуктам созданной сети РС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпик, А.П. Реализация проекта наземной инфраструктуры глобальной навигационной спутниковой системы “ГЛОНАСС” на территории Новосибирской области [Текст] / А.П. Карпик, Г.А. Сапожников, А.В. Дюбанов // Сб. матер. VI Междунар. конгр. “ГЕО-Сибирь-2010”.- Новосибирск, 2010.
2. Reiner Jäger. Geodatische Infrastrukturen für GNSS-Dienste (GIPS). Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, Band 2010, 3 „Vernetzt und ausgeglichen: Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Günter Schmitt“, p.151-171.

3. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. М.: Стандартинформ, – 2009.

4. Simone Kälber, Reiner Jäger. CoPaG – COntinuously PAthed Georeferencing. Benutzerhandbuch, 2008. [Электронный ресурс] – Нем. – Режим доступа: http://www.geozilla.de/eng/software/software_copag.htm.

© Я. Райнер, К. Симона, Е.К. Лагутина, Т.И. Горохова, 2012