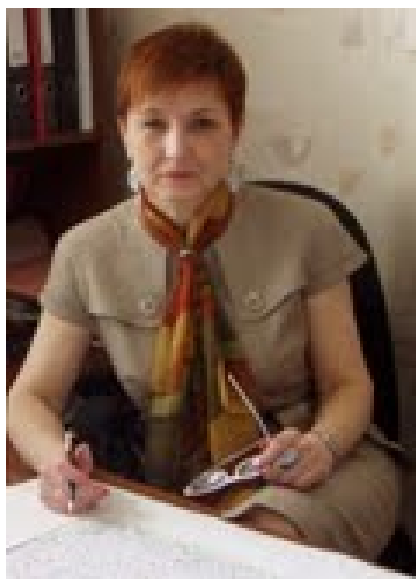


ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЯЗИ МЕЖДУНАРОДНОЙ ОБЩЕЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА И ГОСУДАРСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА КООРДИНАТ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ



Н.И. РУДНИЦКАЯ,

начальник информационно-вычислительного отдела,

УП «Белэрокоsmогеодезия,

г. Минск

Целью работы, описанной в данной статье, являлось определение параметров связи международной общеземной системы отсчета ITRS (ITRF2005) и государственной системы отсчета координат Республики Беларусь СК-95. Указом Президента Республики Беларусь № 200 от 23 апреля 2007 г. «О некоторых вопросах в области геодезии и картографии» установлено, что с 1 января 2010 г. при выполнении геодезических и картографических работ на территории Республики Беларусь используется государственная система геодезических координат 1995 г. (СК-95). Для вычисления геодезических координат согласно этому документу применяется эллипсоид Красовского со следующими параметрами: большая полуось a – 6378245 м, малая полуось b – 6356863,019 м, сжатие α – 1:298,3.

В соответствии с требованиями международного стандарта ISO 19111 [1] и п.5.2.2 ГОСТа Р 52572-2006 координатная система отсчета должна быть определена одной системой координат и одним вариантом геодезических дат. Поэтому под СК-95 мы можем принимать только одну координатную систему отсчета, реализованную координатами пунктов государственной геодезической сети (ГГС), полученными в 1995 г. в результате совместного уравнивания координат пунктов космической геодезической сети (КГС), доплеровской геодезической сети (ДГС) и астрономо-геодезической сети (АГС). Уравнивание выполнено МАГП с помощью программного комплекса Г.Н. Ефимова для уравнивания геодезических сетей большой протяженности.

Направление осей СК-95 совпадает с направлением осей геоцентрической системы отсчета ПЗ-90, масштаб СК-95 равен масштабу ПЗ-90, положение начала системы выбрано так, чтобы координаты пункта Пулково были равны его координатам в системе СК-42. При таком определении СК-95 ее связь с ПЗ-90 определяется только линейными элементами смещения начала отсчета, несмотря на то, что геометрические параметры общеземного эллипсоида ПЗ-90 значительно отличаются от параметров эллипсоида Красовского.

Система отсчета ПЗ-90 на территории бывшего СССР была реализована координатами 26 пунктов космической геодезической сети (КГС), созданной ВТУ ГШ МО по результатам наблюдений ИСЗ системы ГЕОИК. Именно эта реализация общеземной системы отсчета послужила исходной основой для масштаба и ориентировки осей СК-95. Определить качество реализации ПЗ-90 стало возможным с развитием ГЛОНАСС.

Использование одних и тех же принципов ориентации координатных осей систем ITRS (International Terrestrial Reference System) и ПЗ-90, а также отнесение их начала к центру масс Земли предполагают идентичность обеих отсчетных систем. Однако, как показали исследования IGEX-98 (International Glonass Experiment), система ПЗ-90 недостаточно (с недостаточной точностью) реализует общеземную геоцентрическую систему отсчета: ее начало, ориентация координатных осей и масштаб отличаются от аналогичных параметров ITRS.

Поэтому в соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.06.2007 г. с 20.09.2007 г. в глобальной навигационной системе ГЛОНАСС реализуется уточненная версия

государственной геоцентрической системы отсчета координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.02), масштаб которой совпадает с масштабом системы ITRS, а координатные оси параллельны осям ITRS.

К моменту ввода СК-95 на территории Республики Беларусь повсеместное использование GNSS (глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС) для решения геодезических задач потребовало реализации системы отсчета координат на качественно более высоком уровне, чем геодезической сетью, построенной методами традиционной геодезии – триангуляцией и полигонометрией.

На территории Республики Беларусь геоцентрическая международная общеземная система отсчета ITRS (ITRF2005) реализована пунктами фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), высокоточной геодезической сети (ВГС) и спутниковой геодезической сети 1 класса (СГС-1).

Координаты пунктов ФАГС и ВГС в ITRS переданы от девяти ближайших опорных пунктов IGS (рис. 1). Вычисления выполнены с помощью программного обеспечения BERNESE версии 5.0 Астрономического института Бернского университета. Координаты пунктов ФАГС и ВГС получены с внутренней надежностью 3,1 мм. Погрешность определения по отношению к опорным пунктам IGS – 6,5 мм.



Рис. 1. Привязка пункта ФАГС к опорным пунктам IGS

Спутниковая геодезическая сеть (СГС-1), уравненная как единый блок с опорой на пункты ФАГС и ВГС,

характеризуется средней квадратической погрешностью определения планового положения пунктов от 2,8 до 13,6 мм. Около 40% пунктов СГС-1 совмещено с пунктами астрономо-геодезической сети (АГС) 1 и 2 классов, реализующими в свою очередь СК-95.

Для сохранения точностных характеристик спутниковой геодезической сети, реализующих на территории Республики Беларусь ITRS (ITRF2005), и единого с Российской Федерацией координатного пространства, необходимо было определить однозначные параметры связи двух систем отсчета, т.е. определить параметры преобразования координат из ITRS (в реализации ITRF 2005) в отсчетную координатную систему Республики Беларусь, относящуюся к СК-95. Это позволит:

- качественно улучшить реализацию СК-95 на территории Республики Беларусь;
- обеспечить с требуемой точностью интеграцию в координатное пространство Европы;
- повысить эффективность использования спутниковой технологии при решении различного рода геодезических задач, исключить потерю точности при координатных определениях и переходе к референцной системе отсчета координат.

В качестве данных о реализации СК-95 Российская Федерация передала Республике Беларусь информацию о координатах пунктов государственной геодезической сети 1, 2 класса в системах отсчета СК-42, СК-95 и WGS-84, причем в СК-42 для каждого пункта дана нормальная высота, в СК-95 – геодезическая высота и высота квазигеоида, соответствующая модели ГАО-98. Таким образом, задача

заключалась в вычислении параметров связи между ITRS и СК-95 по совмещенным пунктам СГС-1 и АГС 1 и 2 классов.

Все операции, связанные с преобразованием координат и вычислением параметров преобразования между системами отсчета координат, выполнялись с использованием программного обеспечения ТРАНСКОР версии 2.0 и Pinnacle версии 1.0 (*Javad Positioning Systems*, 1998). В обоих случаях для преобразования пространственных координат из системы «А» в систему «В» используется зависимость:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_B = (1+m) \times \begin{bmatrix} 1 & +\omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & +\omega_X \\ +\omega_Y & -\omega_X & 1 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_A + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix},$$

где ΔX , ΔY , ΔZ – смещения начала одной системы отсчета относительно другой, m – масштаб, ω_X , ω_Y , ω_Z – углы разворота осей.

По результатам уравнивания СГС-1 получены геоцентрические координаты пунктов СГС-1 $(X, Y, Z)_{ITRF}$. Вычисление прямоугольных декартовых координат пунктов в СК-95 выполнено по формулам:

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L, \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L, \\ Z &= [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{aligned} \right\},$$

где

$$e = \sqrt{a^2 - b^2} / a, \quad N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}, \quad H = H^y + \zeta.$$

Геодезические координаты B и L вычислены по плоским прямоугольным координатам пунктов АГС (x, y) в проекции Гаусса-Крюгера, полученным в результате уравнивания в МАГП.

Как видно из приведенных выше формул, точность значений пространственных координат X , Y , Z напрямую зависит от точности значений высот квазигеоида при переходе от нормальной высоты к геодезической. Поэтому обработке материалов предшествовала оценка качества высот квазигеоида ζ , полученных по результатам выполненного в 1993 г. ЦНИИГАиК астрономо-гравиметрического нивелирования и использованных при совместном уравнивании АГС и КГС [9].

В результате проведенных исследований установлено, что высоты квазигеоида имеют низкий уровень точности, которая характеризуется средней квадратической погрешностью 0,7 м; на юго-востоке Республики Беларусь погрешности высот квазигеоида составила более 1,5 м.

Кроме того, полученные параметры преобразования координат пунктов из ITRS в СК-95 для варианта, когда геодезические высоты вычислялись с привлечением высот квазигеоида, использованных при совместном уравнивании АГС и КГС, имели значительный разворот вокруг оси Y (0,57") и существенные остаточные погрешности в высотной компоненте координат пунктов (рис. 2). Необходимые для этого прямоугольные топоцентрические координаты N , E , U получены по координатам X , Y , Z с помощью известных формул:

$$\begin{pmatrix} E \\ N \\ U \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin L & \cos L & 0 \\ -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

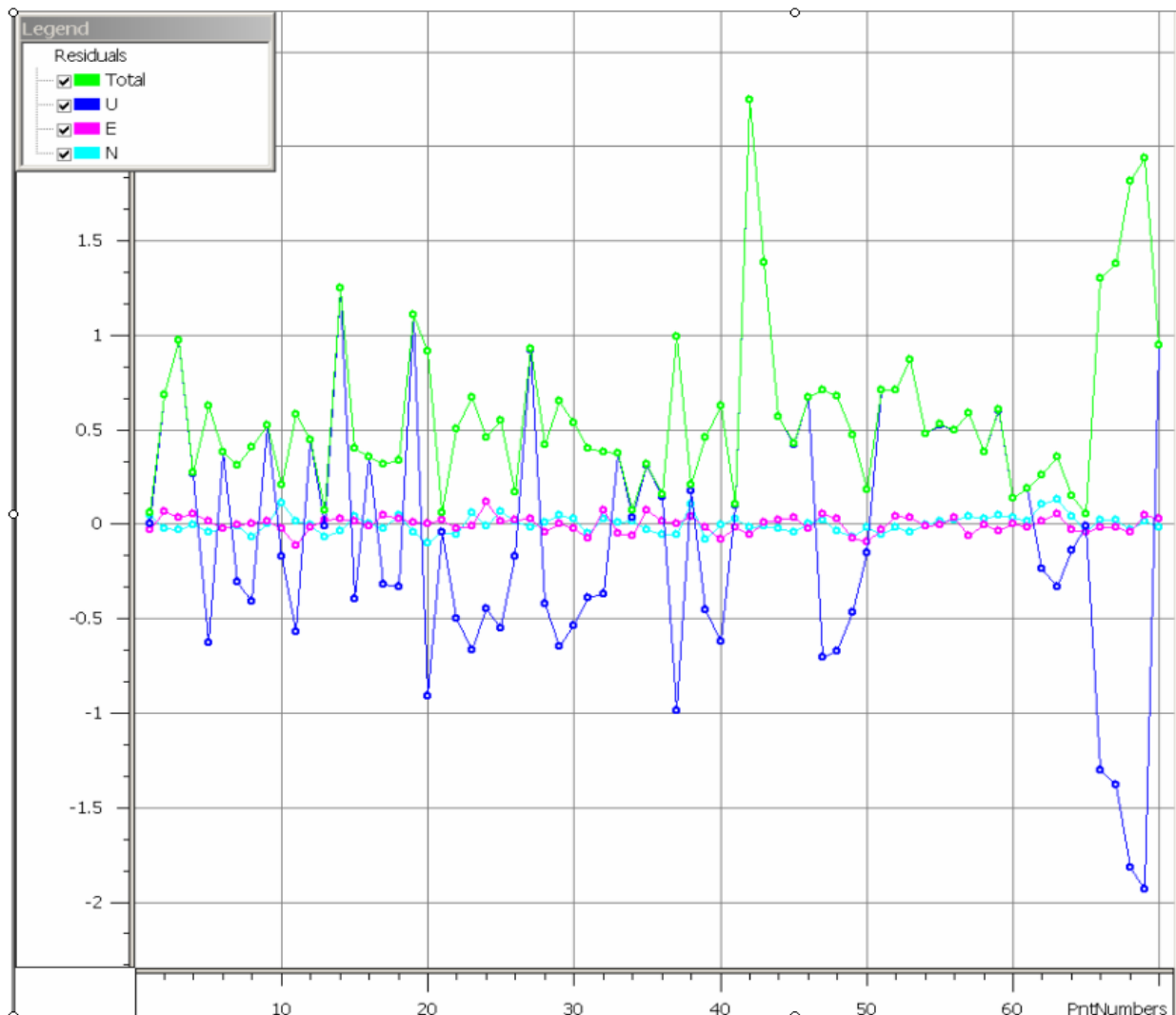


Рис. 2. Остаточные погрешности координат пунктов при вычислении параметров преобразования в представлении N, E, U с привлечением высот квазигеоида, использованных при совместном уравнивании АГС и КГС

В связи с этим для определения геодезических высот совмещенных пунктов СГС-1 и АГС была использована альтернативная модель геоида EGM2008 с разрешением $2,5' \times 2,5'$. Эта модель, как показали результаты ее исследований для территории Республики Беларусь («Кредо-Диалог» [6]) и Москвы (ФГУ «29 НИИ Минобороны России» [7]), значительно превосходит по точности модели EGM96 и ПЗ2002/360. Возможность подключения модели квазигеоида EGM2008, как и извлечения высот нужных точек с представлением их в форме, позволяющей эффективно оперировать большими объемами данных, реализована в версии 2.0 программы ТРАНСКОР.

С помощью программного обеспечения ТРАНСКОР модель геоида EGM2008 предварительно была преобразована в СК-95 и редуцирована на эллипсоид Красовского по официальным параметрам WGS-84 – СК-95 [2]. Для каждого из совмещенных пунктов выделена высота квазигеоида. С новыми значениями геодезических высот вычислены прямоугольные декартовы координаты X, Y, Z совмещенных пунктов СГС-1 в СК-95 и высчитаны параметры преобразования координат из ITRS (ITRF2005), реализованной координатами пунктов СГС-1 Республики Беларусь, в СК-95, реализованную координатами пунктов АГС, полученными по результатам уравнивания МАГП.

Остаточные (не исключенные) погрешности координат пунктов, полученные при определении параметров связи с привлечением высот квазигеоида модели EGM2008, по всем компонентам не превышали 5 см (рис. 3), а разворот вокруг оси Y уменьшился с $0,57''$ до $0,02''$.

Вычисления высот квазигеоида по модели EGM2008 можно представить блок-схемой (рис. 4). Весь объем работ выполнен с помощью программы ТРАНСКОР (рис. 5).

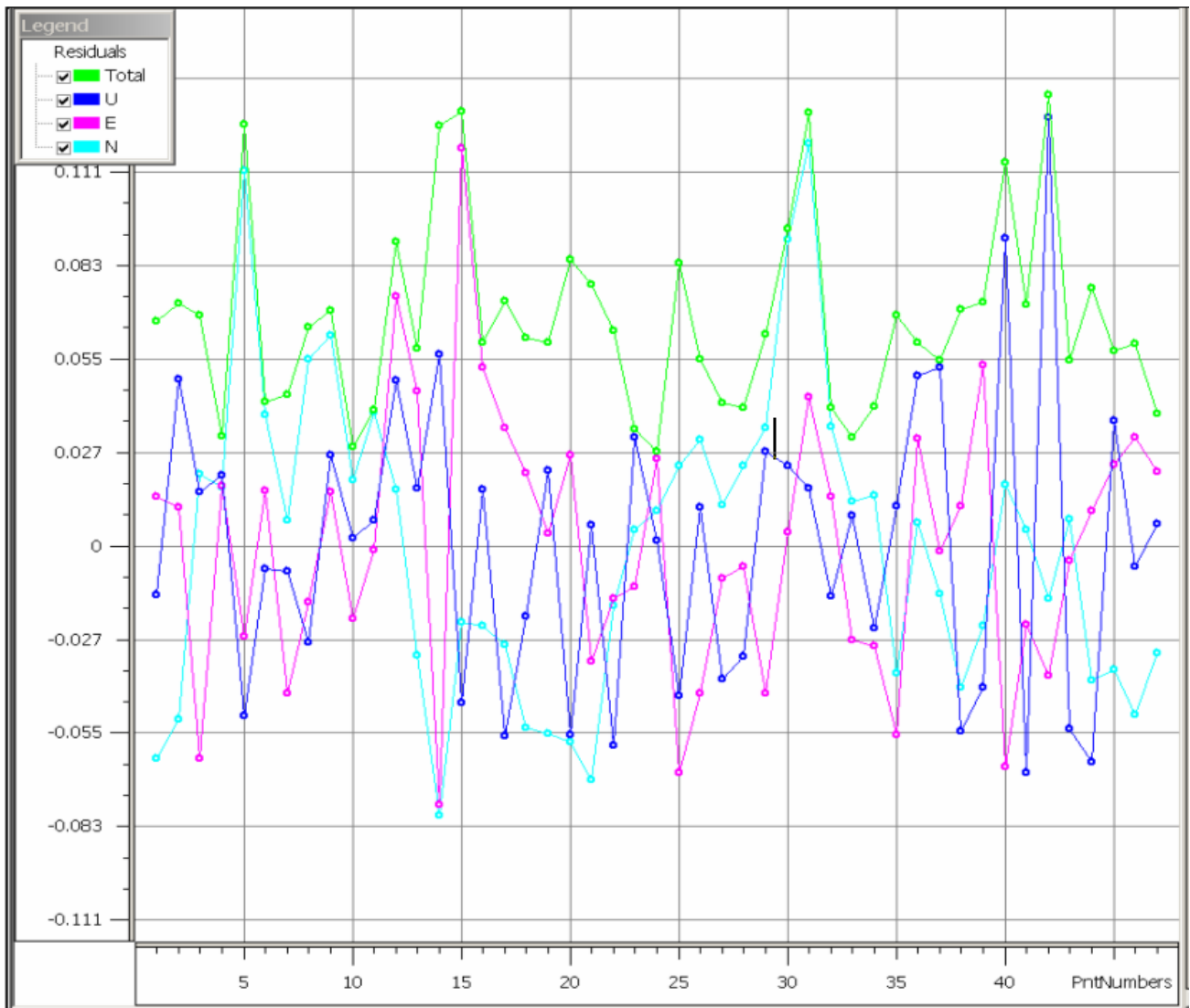


Рис. 3. Остаточные погрешности в координатах пунктов при вычислении параметров преобразования в представлении N, E, U с привлечением высот квазигеоида модели EGM2008

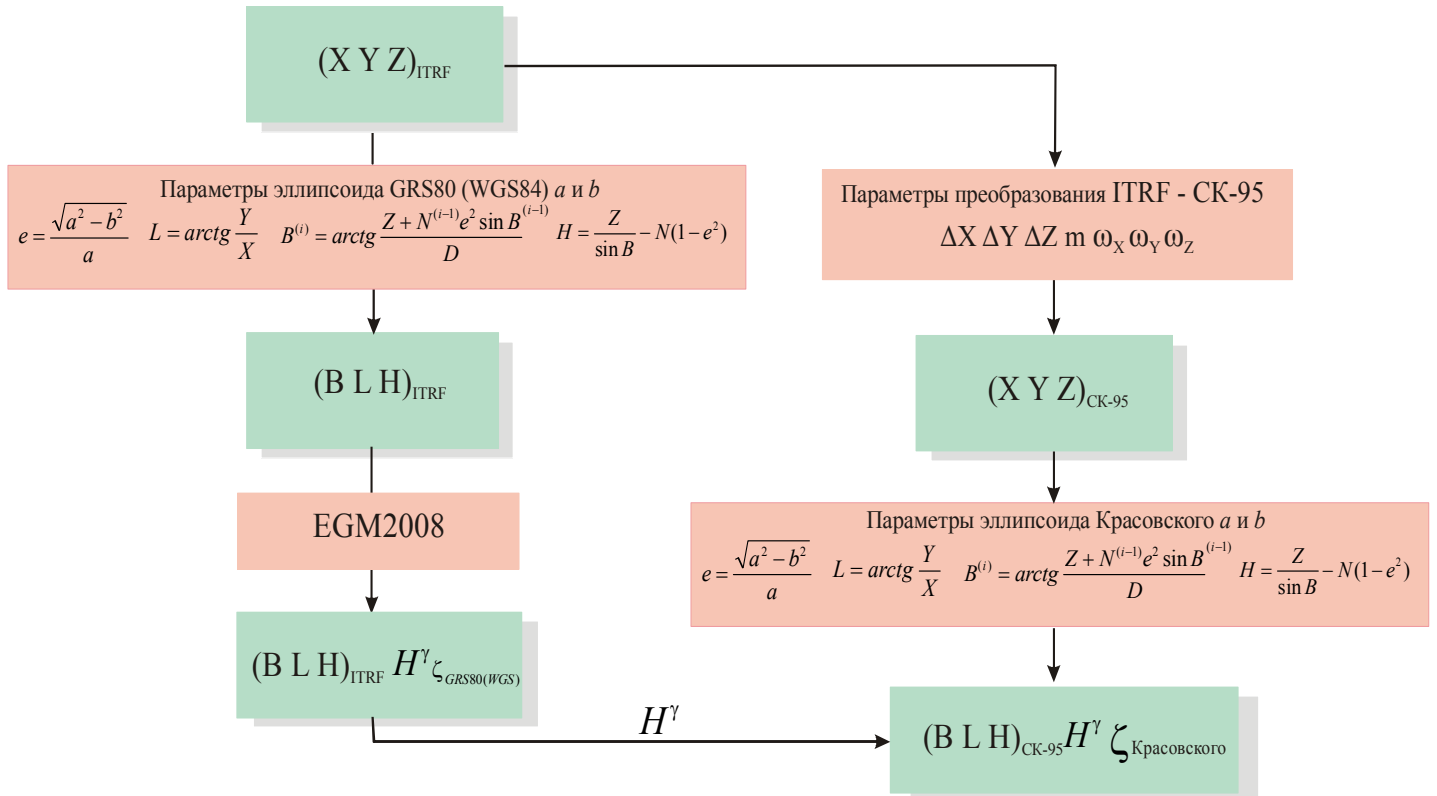


Рис. 4. Блок-схема вычислений высот квазигеоида над эллипсоидом Кравоского по модели EGM2008

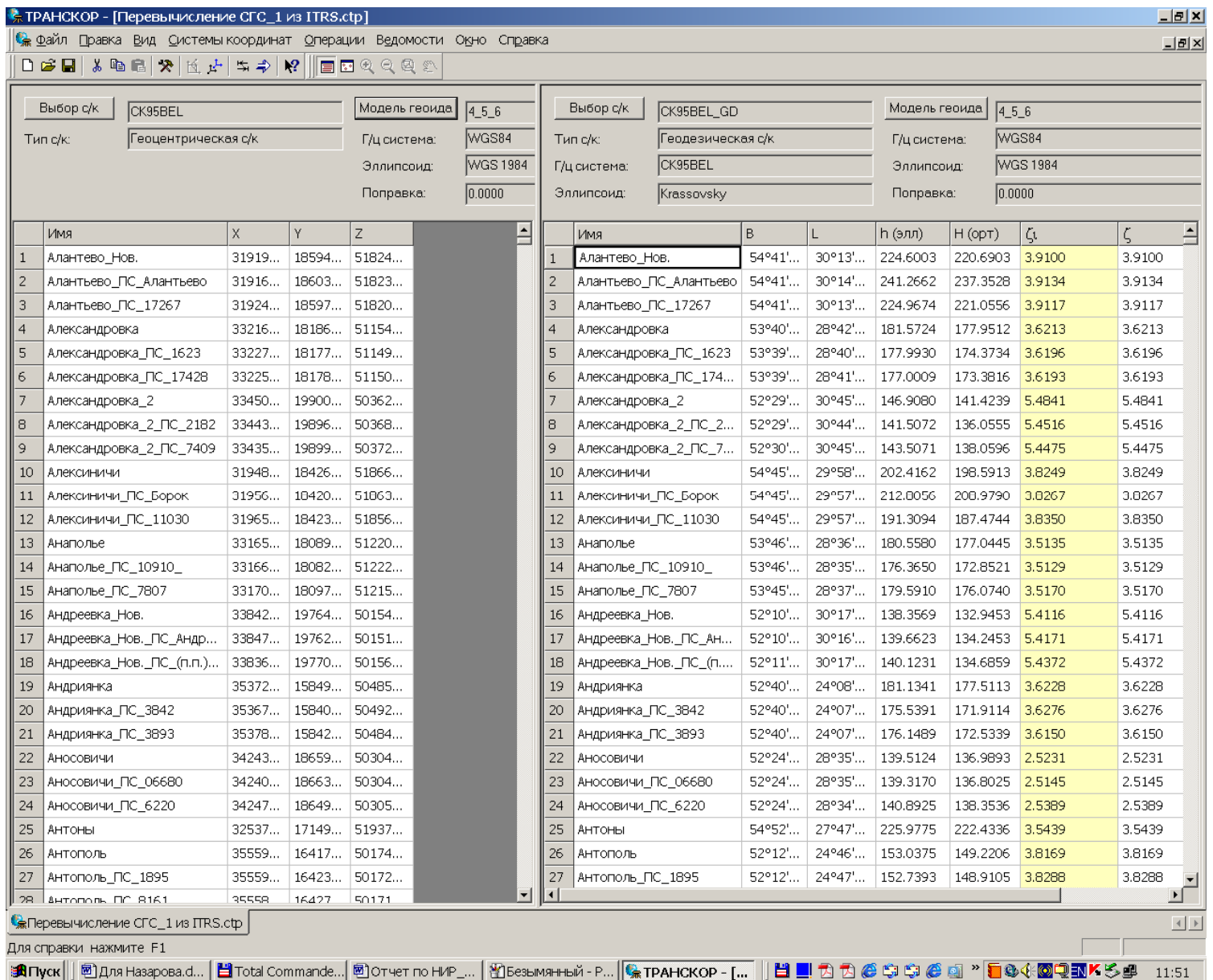


Рис. 5. Вычисление геодезических координат $B, L, H_{\text{геод.}}, H_{\text{с высотами квазигеоида}}$ над эллипсоидом Красовского по данным EGM2008 в программе TRANSCOR

Для контроля параметры связи вычислены с использованием программного обеспечения Pinnacle со значениями геодезических высот совмещенных пунктов АГС и СК-1 над эллипсоидом Красовского в СК-95 по модели EGM2008, найденными с помощью программы TRANSCOR. Полученные результаты оказались практически идентичными.

Для всех пунктов СК-1, имеющих нормальные высоты, полученные методом геометрического нивелирования, выполнено сравнение высот, вычисленных по единым параметрам с привлечением модели геоида EGM2008 и полученных геометрическим нивелированием. При этом для всей территории республики принято стандартное отклонение $\sigma_{\text{Норм.}} = \pm 0,05\text{м}$.

В заключение координаты пунктов СК-1, полученные по результатам уравнивания единым блоком в ITRF2005 на эпоху 23.04.2008 г., по единым параметрам перевычислены в систему отсчета, близкую СК-95, что позволило сохранить точность спутниковой геодезической сети и качественно улучшить реализацию СК-95. Совмещенные пункты СК-1 и АГС послужили исходными при уравнивании астрономо-геодезической сети 1 и 2 классов, которые в свою очередь использованы как исходные при уравнивании 3 и 4 классов.

Реализованная на территории Беларуси СК-95 имеет ряд отличий от СК-95, введенной на территории Российской Федерации. И, тем не менее, единое координатное пространство двух стран сохранено, а новая государственная система отсчета координат Республики Беларусь, созданная с соблюдением всех требований ISO 19111, правомочна именоваться СК-95. Основанием для этого

является то, что среднее квадратическое отклонение координат совмещенных пунктов, полученных в 1995 г. МАГП и вычисленных в СК-95 Республики Беларусь, составляет $\pm 0,05$ м по обеим плановым координатам, что соответствует заявленной точности СК-95 [2].

Разности абсцисс и ординат совмещенных пунктов СГС-1, полученных МАГП (1995 г.), и по параметрам трансформирования из системы ITRF2005 в систему СК-95 Республики Беларусь с учетом масштаба и поворота координатных осей представлены на рисунке, где изолинии проведены через 1 см (рис. 6).

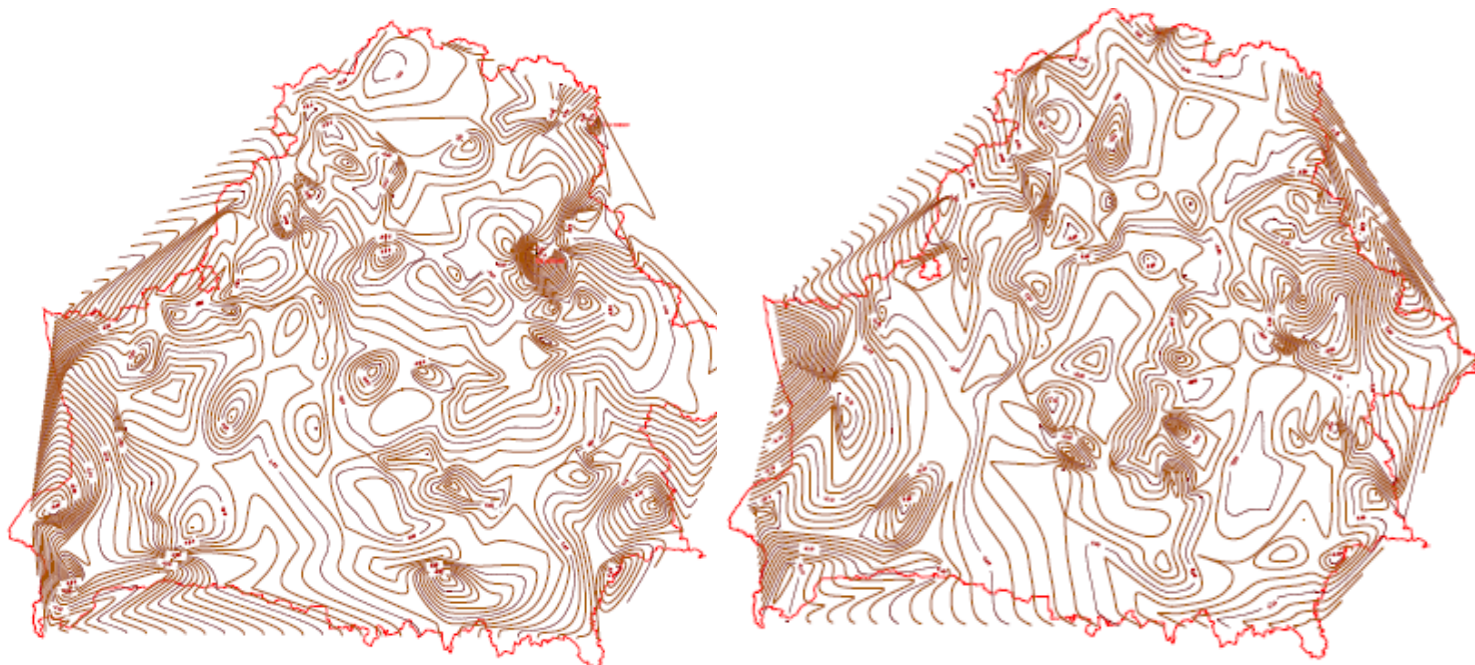


Рис. 6. *Изолинии разностей абсцисс (слева) и ординат (справа) совмещенных пунктов СГС-1, полученных МАГП (1995 г.) и вычисленных по параметрам трансформирования ITRF2005 →СК-95 (сечение через 1 см)*

Главное отличие от СК-95 Российской Федерации – строгая связь с ITRS. Включение в сетевое решение по определению координат пунктов ФАГС и ВГС девяти опорных пунктов IGS, закрепляющих ITRS, позволит интегрироваться в координатное пространство Европы и любую координатную основу, построенную на основе GNSS. Практически доказана возможность передачи нормальных высот на расстояния 10–30 км по результатам спутниковых наблюдений с точностью не ниже 10 см при использовании модели EGM2008.

Литература

1. ISO 19111:2003 «Geographic information – Spatial referencing by coordinates» – международный стандарт ISO 19111:2003 «Географическая информация. Пространственное описание с использованием координат».
2. Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 г. (СК-95), ГКИНП (ГНТА)–06-278-04. М., ЦНИИГАиК, 2004.
3. Макаренко И.Л., Демьянов Г.В., Зубинский В.И. и др. Системы координат спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. «Геодезия и картография», 2000, №6, с. 16–22.
4. Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008 / EGU General Assembly 2008. Vienna, Austria, April 13–18, 2008.
5. Непоклонов В.Б. Об использовании новых моделей гравитационного поля Земли в автоматизированных технологиях изысканий и проектирования. «Автоматизированные технологии изысканий и проектирования», 2009, №2 (33), с.72—76.
6. Пигин А.П., Березина С.В. Глобальная модель геоида EGM2008. Предварительный анализ. «Автоматизированные технологии изысканий и проектирования». 2008, №4 (31), с. 63–66.

7. Концепция модернизации и развития государственной геодезической сети Республики Беларусь. Утверждена постановлением коллегии Государственного комитета по имуществу РБ № 19-2 от 3.11.2006 г.
8. Бовшин Н.А., Зубинский В.И., Остац О.М. Совместное уравнивание общегосударственных опорных геодезических сетей. «Геодезия и картография», 1995, №8, с. 6–17.
9. Морозов В.П. Курс сфероидической геодезии. М., «Недра», 1979, с. 118–135.
10. Geocentric Datum of Australia. Technical Manual. Chapter 4–Computations on the Ellipsoid, с. 16. <http://www.icsm.gov.au/icsm>.
11. INSPIRE – Infrastructure for Spatial Information in Europe. D2.8.I.1 – Specification on Coordinate Reference Systems. Draft Guidelines <http://inspire.jrc.ec.europa.eu>.
12. INSPIRE – Infrastructure for Spatial Information in Europe. Draft Structure and Content of the implementing Rules on Interoperability of Spatial Data Sets and Services <http://inspire.jrc.ec.europa.eu>.
13. Marco Ollicainen, Matti Ollicainen. The Finnish Coordinate Reference System. Published by the Finnish Geodetic Institute and the National Land Survey of Finland. <http://www.maanmittauslaitos.fi>
14. Michael Cory, Roy Morgan, Colin Bray, Iain Greenway, UK and Ireland. A new coordinate system for Ireland. <http://www.osni.gov.uk>.
15. National Geodetic reference system. <http://www.bkg.de/Geodesy>.