

Золотой ключик: как стать (или не стать) Буратино и решить проблему перехода от СК-42 и WGS-84 к СК-63 и местным системам координат

Если существует так много систем координат, значит это кому-нибудь нужно?

Одновременное существование в стране нескольких систем координат порождает массу проблем. Представим себе, например, что люди в одном и том же городе живут в разных часовых поясах. Соответственно в одних организациях рабочий день начинается в 8:00, в других — в 10:00, а одна из городских служб вообще признает только солнечные часы. Глупо, правда ведь?

А ситуация с использованием систем координат точно такая же. В стране параллельно действуют две системы координат — официальная УСК-2000, в которой никто не работает, потому что её никто не видел, и старая добрая СК-42. Земельно-кадастровые органы принимают работы только при условии, что координаты земельных участков вычислены в СК-63. Что касается органов градостроительства и архитектуры, то они отдают предпочтение местным системам координат (подчас очень экзотическим), которые отличаются и от УСК-2000, и от СК-42, и от СК-63.

Примечательно, что эта проблема стала небольшим, но надежным источником заработка для счастливых обладателей «ключей», то есть секретных формул, позволяющих перейти от одной системы к другой. Поэтому и некоторые государственные предприятия, и АГП, и коммерческие фирмы, гордо именующие себя «геодезическими» (а на самом деле подвизающиеся на пересчете координат из СК-42 в СК-63), вовсе не стараются решить эту проблему и отдать «золотые ключики».

То же касается и организаций, принимающих и утверждающих результаты работ. Ведь исполнитель работ автоматически превращается в просителя. Любая его ошибка в пересчете координат в какую-нибудь местную системку, установленную еще до революции 1917 года, играет против него.

Поэтому, к сожалению, переход к использованию единой системы координат в Украине, или хотя бы отказ от некоторых местных систем, кое-кому не выгоден и будет тормозиться.

Сейчас при геодезических измерениях используется высокоточная спутниковая аппаратура, а также оптические приборы, оснащенные GPS-приемниками. Кроме того, в распоряжении геодезистов и землеустроителей имеется большой арсенал программного обеспечения, позволяющего легко обрабатывать результаты геодезических измерений, в том числе широко использовать методы дифферен-

циального и интегрального счисления (пакеты прикладных программ решают уравнения численными методами). Это привело к тому, что:

1) повысилась точность геодезических измерений, инженерно-геодезических работ;

2) можно отказаться от способов работ, снижающих точность измерений («висячие» ходы, некоторые методы полигонометрии, использование «ненадежных» пунктов городских сетей);

3) при математической обработке данных «вылезли» все деформации и другие недостатки местных и условных систем координат.

Поэтому самое время перейти к внедрению современной системы координат, например УСК-2000, и выполнению работ по перевычислению координат ГГС. Необходимо также выпустить обновленные каталоги координат, а также опубликовать четкий алгоритм перехода к УСК-2000 от геоцентрических систем, используемых при GNSS/GPS-измерениях, и обратно.

В данной статье пойдет речь о преобразованиях координат в систему 1963 года (СК-63) и местные системы координат. Поскольку в практике земельно-кадастровых работ сейчас широко используются GPS-приемники, будут рассмотрены способы установления связи между геоцентрическими и референсными системами координат.

Рассматривая эти вопросы, мы обратимся к математическим выкладкам. Некоторые базовые уравнения высшей геодезии (такие как уравнения Крюгера) мы не приводим. Их без труда можно найти в классических учебниках, например, П. С. Закатова «Курс высшей геодезии». — М.: Недра, 1976, или Л. М. Бугаевского «Математическая картография». — М.: Златоуст, 1998.

Можно использовать и другую литературу, в частности, перечисленную в конце статьи.

Применяя описанные методики, вполне можно самостоятельно решить проблему поиска параметров перехода от одной системы координат к другой. Для небольших по площади территорий (три-четыре района области) это вполне можно сделать.

Эллипсоиды, датумы, системы координат, картографические проекции

Это краткое описание основных терминов, которые будут использованы в данной статье.

Геодезические данные, относящиеся к точкам в пространстве, могут проектироваться на по-



Геодезичні прилади та інструменти

*Поставка широкого спектра
оборудования для геодезии и
строительства!*



ООО "УкрГеоПроект"

01032, г. Киев, ул. Саксаганского, 74-Б
тел. (044) 234-06-36 (многоканальный)
e-mail: mail@ukrgeo.com.ua
www.ukrgeo.com.ua

верхность эллипсоида, а затем на плоскость проекции.

В связи с этим в геодезии широко используются математические системы пространственных координат X, Y, Z , геодезических координат B, L, H и прямоугольных координат x, y, z .

Геодезические общеземные системы координат основываются на следующих положениях:

1) начало математической системы пространственных прямоугольных координат расположено в центре масс Земли;

2) ось Z параллельна направлению на Международное условное начало;

3) плоскость XOZ параллельна плоскости начального астрономического меридиана.

Референциальные геодезические системы координат основаны на двух последних положениях. Начало математической системы пространственных прямоугольных координат в них не совмещают с центром масс Земли. К ним относится система координат 1942 года (СК-42), её предшественница — СК-32 и многие другие национальные (внутригосударственные системы).

К общеземным (геоцентрическим) системам координат относятся *World Geodetic System* (WGS-84), *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) и некоторые другие.

Ни СК-63, ни местные системы координат не являются «полноценными» в прямом смысле слова. Это системы координат, получаемые пересчетами из системы СК-42.

Для перехода от одной системы координат к другой используется набор параметров, называемый геодезическим датумом. Датумы описывают параметры эллипсоида, который «моделирует» поверхность Земли и «на котором» устанавливается система координат.

Эллипсоид (применительно к планете Земля) — это фигура, подобная сплюснутой у полюсов сфере, размеры которой подобраны так, чтобы наилучшим способом описать фигуру Земли. Есть еще референц-эллипсоид — эллипсоид, наиболее удачно описывающий форму Земли для определенного региона или континента, и квазигеоид — модель, описывающая фигуру Земли по измеренным значениям потенциалов силы тяжести.

Для нас интересны параметры (датумы) следующих эллипсоидов: WGS-84, потому что на него опирается система координат WGS-84; референц-эллипсоида Красовского 1940 г., так как он лежит в основе системы СК-42, производной от неё СК-63, и многих местных систем; «сфероид» Бесселя 1841 года, так как он лежит в основе некоторых архаичных местных систем координат.

Земной эллипсоид имеет три основных параметра, любые два из которых однозначно определяют его фигуру:

- большая полуось (экваториальный радиус) эллипсоида, a ;
- малая полуось (полярный радиус), b ;
- геометрическое (полярное) сжатие, $f = \frac{a-b}{a}$.

Для определения координат также необходимо знать первый и второй эксцентриситеты:

- первый эксцентриситет, $e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$;
- второй эксцентриситет, $e' = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}}$.

Плоские прямоугольные координаты x и y изображения точки эллипсоида в проекции Гаусса являются следующими функциями ее геодезической широты B и долготы l , считаемой от осевого меридиана:

$$x = S + N \frac{l'^2}{2\rho'^2} \sin B \cos B + N \frac{l'^4}{24\rho'^4} \sin B \cos^3 B (5 - tg^2 B + 9\eta^2 + 4\eta^4) + N \frac{l'^6}{720\rho'^6} \sin B \cos^5 B (61 - 58tg^2 B + tg^4 B) + \dots;$$

$$y = N \frac{l'}{\rho'} \cos B + N \frac{l'^3}{6\rho'^3} \cos^3 B (-tg^2 B + \eta^2) + N \frac{l'^5}{120\rho'^5} \cos^5 B (5 - 18tg^2 B + tg^4 B + 14\eta^2 - 58\eta^2 tg^2 B) + \dots,$$

где S — длина дуги меридиана от экватора до параллели под широтой B ; N — длина нормали к поверхности эллипсоида под широтой B ; $\rho' = 206\,264''$; 8062 — величина радиана в секундах градусной меры; $\eta^2 = e'^2 \cos^2 B = 0,006738525 \cos^2 B$ (для эллипсоида Красовского).

Мы с вами, конечно, помним о том, что система координат — это не картографическая проекция. Картографическая проекция — это способ отображения земной поверхности, форма которой приближается к сферической, на плоскости карты.

На наших топографических картах применяется **проекция Гаусса-Крюгера**. Это поперечно-цилиндрическая проекция — один из меридианов принимается за осевой и изображается на плоскости как ось абсцисс. Этот меридиан еще называется осевым, поскольку он представляет собой ось для одной из шестиградусных зон. Весь земной шар разделен на 60 зон шириной в 6° каждая. В направлении от осевого меридиана к краям зоны растут искажения длин и площадей. Углы в проекции не искажаются (поэтому она называется равноугольной).

Топографические карты СССР, а теперь — Украины создаются в проекции Гаусса-Крюгера. На карты наносится координатная сетка в зависимости от того, какая система координат используется в данном случае. Это может быть СК-42 (при этом карты имеют рамку для счисления как прямоугольных, так и географических координат, а также зарамочное оформление), СК-63 или местная система координат.

Картографическая проекция **Universal Transverse Mercator** (UTM, Гаусса-Боба) — также поперечно-цилиндрическая проекция. В ней земной шар также разделяется на 60 шестиградусных зон. Но она имеет одно важное отличие от проекции Гаусса-Крюгера. Это проекция на *секущий* цилиндр, и масштаб равен единице вдоль двух секущих линий, отстоящих от центрального меридиана на 180 000 м. То есть земной

шар «вылазит» за пределы образующей цилиндра на 180 км на западе и на востоке (В проекции Гаусса шар касается цилиндра по окружности). Цилиндр разворачивают в плоскость и накладывают прямоугольную километровую сетку с началом координат в точке пересечения экватора и центрального меридиана. Вертикальные линии сетки параллельны центральному меридиану.

Всё это нужно учитывать пользователям ГИС, поскольку в ГИС-среде бытует мнение, что проекции Гаусса-Крюгера и поперечная Меркатора — суть одно и то же. Как видим, это не так.

Параметры эллипсоидов			
	Полуоси		Сжатие $f = (a-b)/a$
	<i>a</i>	<i>b</i>	
Красовского 1940	6 378 245 м	6 356 863,0188 м	1 : 298,3000
Бесселя 1841	6 377 397,155 м	6 356 079 м	1 : 299,1528
WGS-84	6 378 137 м	6 356 752 м	1 : 298,2572
ITRF2005	6 378 137 м	6 356 752,3141 м	1 : 298,2528

Параметры картографических проекций			
	Гаусса-Крюгера	UTM	Гаусса-Крюгера «трехградусная»
	Ширина зоны (Zone)	6°	6°
Масштаб по центральному меридиану (m scale)	1	0,9996	1
False Easting	500 000 м	500 000 м	0 м
False Northing	0 м	0 м	0 м

Система координат СК-63

Система координат СК-63 — наследие «холодной войны» между СССР и Западом. Она была введена в практику геодезических работ при землеустройстве, строительстве, мелиорации в 60-х годах. Топографические планы и карты, предназначенные для использования в народном хозяйстве (за исключением нескольких отраслей, например, геологии), с этого времени также стали составляться и печататься не в СК-42, а в СК-63.

СК-63 — это система координат, производная от СК-42, созданная в картографической проекции Гаусса-Крюгера (как и система 1942 года), на основе того же эллипсоида Красовского.

При введении данной системы ставилась цель максимально запутать вероятного противника и усложнить работу агентам зарубежных спецслужб, занимающихся среди прочего и сбором картографического материала. Для этого, во-первых, вводилась новая разграфка и номенклатура топографических карт, действительно, довольно запутанная, но внешне схожая с номенклатурой карт в СК-42. Во-вторых, намеренно искажались данные о местоположении объектов на местности, для чего все прямоугольные геодезические координаты точек пересчитывались по особым формулам, для каждой зоны — по своим.

Номенклатура карт (см. схему на следующей странице)

Вся территория СССР была разбита на регионы сложной формы, которым присваивались произвольные обозначения в виде букв латинского алфавита. Большая часть Украины попадает в зону Х. Северная часть Украины, вся Белоруссия и Северо-запад России лежат в зоне С, Москва и Черноземье России — в зоне Р, Северный Кавказ — в зоне Т и т. д. Без соответствующих бланковых карт вычислить местоположение района было невозможно.

Далее. Каждая зона разбивалась на трёхградусные зоны (в отличие от зон в 6° в СК-42). Во многих случаях осевые меридианы сдвинуты на запад на 30°. Колонки карт внутри зоны нумеруются с юга на север, начальные номера рядов и колонок для каждого района разные. Так формируется номенклатура карт масштаба 1 : 100 000. Карты более крупных масштабов — 1 : 50 000, 1 : 25 000, 1 : 10 000 обозначаются по тому же принципу, что и топокарты в СК-42 (листы называются А, Б, В, Г, затем а, б, в, г и так далее).

Координатная сетка

Внутри каждой зоны начало координат специально смещено. То есть точка отсчета координат может находиться и не на осевом меридиане. Долгота осевого меридиана первой по счету 3°-зоны и условные координаты x_0 , y_0 являются элементами так называемого «ключа перехода» и являются секретными. Для каждого блока (Х, Р, С и далее) в системе координат 1963 года установлены свои ключи.

На листах карты масштаба 1 : 100 000 расстояние между линиями сетки — 2 см, то есть 2 км на местности, 1 : 25 000 — 4 см (1 км на местности), 1 : 10 000 — 10 см (500 м на местности).

Линии координатной сетки на картах в СК-63 расположены под углом к линиям сетки СК-42.

Пересчет координат в СК-63 и из СК-63

Еще раз обратим внимание на то, что система координат СК-63 — это производная от СК-42. Преобразование выполняется путем введения следующих коэффициентов:

- смещения по оси X;
- смещения по оси Y;
- масштабного преобразования;
- поворота координатных осей относительно осей в проекции Гаусса-Крюгера.

Эти параметры называются ключом системы. Ранее они были секретны. С 1 января 2010 г., в связи с принятием нового «Свода ведомостей», который снимает ряд ограничений на геодезические данные, ситуация изменилась. За разъяснениями лучше всего будет обратиться в соответствующий отдел по месту работы.

Но мы, геодезисты, как известно, не ищем легких путей. Преобразование от СК-42 к СК-63 и обратно существовали всегда, а с повсеместным использованием GPS-приемников ситуация намного упростилась. Теперь необязательно уметь раскладывать ряды Тейлора.

Местные системы координат, производные от СК-63

Существует огромное количество местных систем координат. Все они могут быть условно разделены на два типа.

В большинстве случаев местная система координат является производной от СК-63, а та, как уже говорилось, является производной от СК-42. Цепочка выглядит так СК-42 → СК-63 → МСК. Таким образом, все они основываются на проекции Гаусса-Крюгера.

Такие СК, согласно приказу Минэкоресурсов Украины №245 от 03.07.2001, называются системами координат «Местные-II». В противоположность им, местные системы, полученные непосредственно из СК-42 путем искажения величин (СК-42 → МСК), а также системы, построенные на архаичных системах типа Бесселя, Баумана, Кассини-Зольднера, названы «Местные-I».

Местная система координат получается из СК-63 путем сдвига начальной точки или путем смещения начального меридиана и параллели. Теоретически, в местных системах координат могут вводиться и другие искажения, как и в СК-63. Может применяться и система высот, отличная от Балтийской. Но на практике такое встречается редко.

Все местные системы подлежат регистрации в Укргеодезкартографии, там же должны находиться и документы с описанием их ключей. Но во многих случаях получить ключ перехода от местной системы к СК-42 нереально.

Пересчитать координаты из «Местной системы II» в СК-63 можно с помощью нехитрых преобразований. Необходимо иметь хотя бы две начальные точки, для которых известны координаты в обеих системах.

Алгоритм перехода из системы в систему близок к Афинову преобразованию.

1) Решаются две обратные геодезические задачи: для отрезка АВ между двумя точками в одной системе координат и в другой системе координат.

2) В результате решения задачи находят $S1$ и $S2$ — горизонтальные проложения в исходной и конечной системах, а также $\alpha1$ и $\alpha2$ — дирекционные углы в этих системах.

3) Необходимо вычислить угол поворота θ между координатными осями исходной и конечной систем (иногда это искажение может и не вводиться, и получается $\theta = 0$). Формула $\theta = \alpha2 - \alpha1$.

4) Находят масштабный множитель $m = S2/S1$.

5) Если угол поворота все-таки существует, т. е. не равен нулю, необходимо вычислить коэффициенты

$$K_1 = m \cos \theta,$$

$$K_2 = m \sin \theta.$$

Теперь координаты любой точки новой системы можно вычислить, имея координаты этой точки в исходной системе. Введем еще нумерацию точек N . Наши связующие точки, координаты которых мы брали выше, обозначим $N = 1$, $N = 2$. Точке, которую будем вычислять затем, присвоим $N = 3$, далее 4, 5, 6 и т. д.

$$x'_N = x'_{N-1} + (x_N - x_{N-1})K_1 - (y_N - y_{N-1})K_2,$$

$$y'_N = y'_{N-1} + (y_N - y_{N-1})K_1 - (x_N - x_{N-1})K_2.$$

Ну а если $\theta = 0$, задача вообще упрощается.

Местные системы координат, образованные по другому принципу

В отдельных регионах Украины действуют местные системы координат, которые построены не на основе проекции Гаусса-Крюгера и даже не на основе эллипсоида Красовского! При работе с ними стандартные «ключи», как бы тщательно они не подбирались, не подойдут.

Самыми экзотическими среди них являются:

- Южнобережная система координат, установленная в Крыму, которая построена на системе координат Генштаба Красной армии 1932 года, основанной на сфероиде Бесселя;

- Донбасская ведомственная система, созданная на базе системы координат Баумана.

На сфероиде Бесселя базируется довольно много местных систем координат и в России, например, московская МСК-50, система для Кольского полуострова и другие.

Не знаю, используются ли еще системы, применявшиеся в УССР, которые построены на основе преобразований Кассини-Зольднера. Эти «инновационные» системы применялись при межевой съемке после отмены крепостного права в России.

Корректный переход между системами достигается при использовании математически строгих преобразований, например, с помощью уравнений Крюгера или описанных ниже преобразований.

Способ Гельмерта — высокоточные преобразования координат из системы в систему

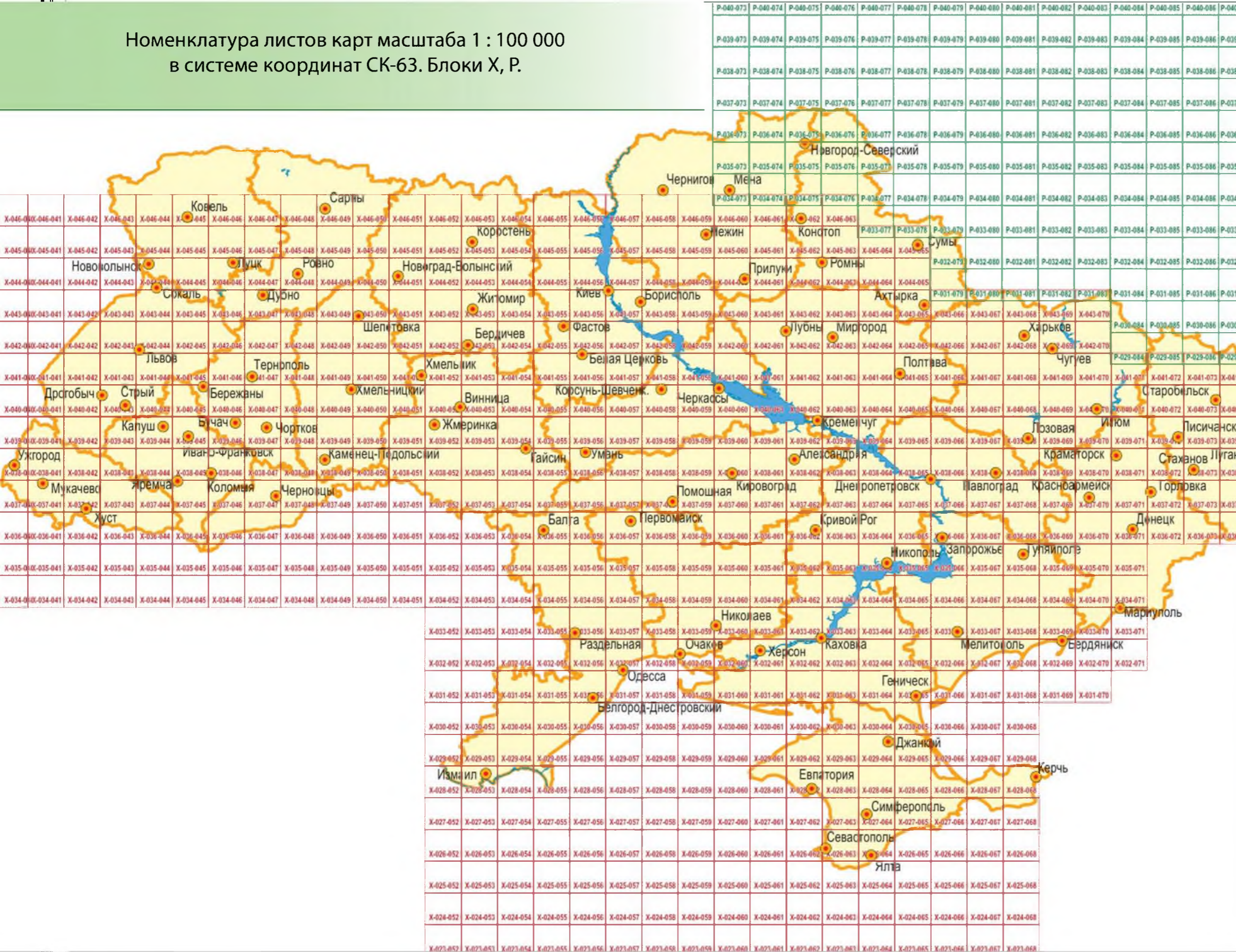
В данном способе используются семь параметров: три параметра взаимного линейного ориентирования, три для углового взаимного ориентирования и один — как масштабный множитель, учитывающий разницу в расстояниях на поверхностях эллипсоидов.

Порядок вычислений таков. По геодезическим координатам B_A, L_A, H_A рассчитываются прямоугольные пространственные координаты X_A, Y_A, Z_A в той же геодезической системе. Используя параметры взаимного ориентирования, координаты X_A, Y_A, Z_A преобразуются в прямоугольные координаты X_B, Y_B, Z_B геодезической системы В. Затем координаты X_B, Y_B, Z_B преобразуются в геодезические координаты B_B, L_B, H_B системы В.

Вычисление пространственных прямоугольных координат X_A, Y_A, Z_A выполняется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} X_A &= (N_A + H_A) \cos B_A \cos L_A \\ Y_A &= (N_A + H_A) \cos B_A \sin L_A \\ Z_A &= (N_A + H_A - N_A e^2) \sin B_A \end{aligned} \right\}$$

Номенклатура листов карт масштаба 1 : 100 000 в системе координат СК-63. Блоки X, P.



где N_A — радиус кривизны в первом вертикале референц-эллипсоида, принятого для данной местной геодезической системы A в метрах

$$N_A = \frac{a_A}{\sqrt{1 - e_A^2 \sin^2 B_A}}$$

В этом случае a_A обозначает большая полуось этого референц-эллипсоида, e_A — его первый эксцентриситет.

Переход к прямоугольным пространственным координатам системы B производится по формуле:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + R \times \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} \times (1 + \Delta m),$$

где $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ — элементы линейного взаимного ориентирования, то есть отстояние центров референц-эллипсоидов, Δm — масштабный множитель, учитывающий разницу в расстояниях на поверхностях эллипсоидов, R — матрица вращения.

$$R = R_X \times R_Y \times R_Z,$$

где R_X, R_Y, R_Z — матрицы вращения вокруг осей X, Y, Z соответственно.

$$R_Z = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_z & \sin \varepsilon_z & 0 \\ -\sin \varepsilon_z & \cos \varepsilon_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_Y = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_y & 0 & -\sin \varepsilon_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon_y & 0 & \cos \varepsilon_y \end{bmatrix}, R_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon_x & \sin \varepsilon_x \\ 0 & -\sin \varepsilon_x & \cos \varepsilon_x \end{bmatrix},$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ — углы вращения вокруг осей X, Y, Z соответственно (в радианной мере).

Существует **упрощенный способ расчета**, который, в частности, не предусматривает такой сложной процедуры вычисления R_X, R_Y, R_Z . В этом случае допускают, что углы вращения $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ отсутствуют или настолько малы, что ими можно пренебречь, а также допускают, что масштабный множитель $\Delta m = 0$. Тогда вычисления прямоугольных пространственных координат в координатную систему B проводятся по упрощенным формулам:

$$\begin{aligned} X_B &= X_A + Y_A \varepsilon_z - Z_A \varepsilon_y + \Delta X \\ Y_B &= Y_A + Z_A \varepsilon_x - X_A \varepsilon_z + \Delta Y \\ Z_B &= Z_A + X_A \varepsilon_y - Y_A \varepsilon_x - \Delta Z \end{aligned}$$

Способ Гельмерта относится к способам, с помощью которых непосредственно вычисляются трёхмерные геодезические координаты, а не поправки. У способа Гельмерта есть одна разновидность, называемая способом Бурса-Вольфа. Она предполагает разворот осей другой пространственной прямоугольной геодезической системы. Поэтому в матрице углов поворота знаки элементов противоположны тем, что в способе Гельмерта.

Способ Молоденского — практический метод при переходе от WGS-84 к СК-42 (СК-63)

Представим себе обычную задачу, с которой сталкивается геодезист при обработке данных GNSS/GPS-измерений. Есть две системы координат — назовём их первая и вторая, основанные: одна — на эллипсоиде WGS, вторая — на эллипсоиде Красовского.

Обозначим большие полуоси эллипсоидов a_1 и a_2 , их малые полуоси b_1 и b_2 , сжатия f_1 и f_2 и эксцентриситеты e_1 и e_2 . С первым эллипсоидом связана декартова система координат x, y, z , начало которой совпадает с его центром, а ось z — с осью его вращения, то есть с малой полуосью.

В этой системе координаты центра второго эллипсоида отличаются на величины $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, называемые линейными элементами взаимного ориентирования.

Дана точка с геодезическими координатами первого эллипсоида B_1, L_1, H_1 . Необходимо найти координаты этой же точки относительно второго референц-эллипсоида — B_2, L_2, H_2 .

Способ Молоденского состоит в вычислении поправок $\Delta B, \Delta L, \Delta H$, которые следует алгебраически сложить с координатами B_1, L_1, H_1 , чтобы получить искомые вторые координаты, то есть $B_2 = B_1 + \Delta B, L_2 = L_1 + \Delta L, H_2 = H_1 + \Delta H$.

Математически строгое решение задачи выглядит так:

$$\Delta B = \frac{1}{M_1 + H_1} \times \left[-\Delta X \sin B_1 \cos L_1 - \Delta Y \sin B_1 \sin L_1 + \Delta Z \cos B_1 + \frac{a_2 - a_1}{a_1} N_1 e_1^2 \sin B_1 \cos B_1 + (f_2 - f_1) \left(M_1 \frac{a_1}{b_1} + N_1 \frac{b_1}{a_1} \right) \sin B_1 \cos B_1 \right],$$

$$\Delta L = \frac{1}{M_1 + H_1} (-\Delta X \sin L_1 + \Delta Y \cos L_1) \operatorname{secc} B_1,$$

$$\Delta H = \Delta X \cos B_1 \cos L_1 + \Delta Y \cos B_1 \sin L_1 + \Delta Z \sin B_1 - \frac{a_1(a_2 - a_1)}{N_1} + (f_2 - f_1) \left(\frac{b_1}{a_1} \right) N_1 \sin^2 B_1,$$

где $M_1 = \frac{a_1(1 - e_1^2)}{\sqrt{(1 - e_1^2 \sin^2 B_1)^3}}, N_1 = \frac{a_1}{\sqrt{1 - e_1^2 \sin^2 B_1}}$.

Получение параметров перехода между системами координат с помощью прикладных программ

Общие замечания

Для определения связи между системами координат необходимо иметь хотя бы четыре совмещенных пункта, то есть пункта с известными координатами в обеих системах. Но это необходимый минимум. Вообще же нужно располагать десятью-двадцатью парами координат в зависимости от размера территории. Лучше затем отсеять «случайные» значения, чем получить заведомо неправильные параметры связи.

Естественно, вы должны быть уверены в том, что работаете в пределах одного блока номенклатурных листов СК-63 или местной системы. Связать сразу

три системы вряд ли получится. Проанализируйте, где проходят границы зон. В СК-42 при переходе из зоны в зону используйте параметры перехода.

И даже при соблюдении всех условий нужно помнить, что вы получаете параметры связи между системами косвенным методом, и они иногда могут оказаться неточными (причины — банальные ошибки определения координат пунктов, неуровненные сети, смещение пунктов). Математически строгий пересчет может осуществляться с помощью математически и физически корректных преобразований.

Тем не менее, все формулы и методы, предложенные в данной статье, применимы и дают (при надежных исходных данных) хорошие результаты.

Использование Trimble Geomatic Office и Leica Geo Office

Рассмотрим такой случай. Например, нужно пересчитать координаты из местной системы координат (МСК) на эллипсоиде Бесселя в СК-42. Для этого нужно импортировать координаты МСК в проект, затем создать проекцию с ранее названными параметрами, а именно False Northing, Central Meridian и Zone Width (например, 3° для СК-63 или нашей МСК) на эллипсоиде Бесселя 1841.

Далее нужно присвоить проекцию нашему проекту.

Программа позволит пересчитать координаты в WGS-84. После чего мы экспортируем полученные координаты WGS-84 в отдельный файл. Далее, в другой проект импортируем координаты в СК-42 и соответственно создаем проекцию False Easting -7500000,0000, Central Meridian (выберите сами необходимый — в Украине это может быть 27°, 33°, 39°, 45°) и Zone Width 6°, на эллипсоиде Красовского. Соответственно назначаем проекцию новому проекту.

Наконец, создам проект номер три, в который импортируем координаты WGS-84 из ранее созданного отдельного файла. С помощью контекстного меню модуля Datum Map выбираем проект с WGS-84 как трансформируемый, а проект с СК-42 как опорный, по общим точкам в автоматическом режиме вычисляются параметры перехода между эллипсоидами и соответственно перевычисляются координаты определяемых точек.

Таким образом, можно получить параметры перехода между местной системой, основанной на сфероиде Бесселя, и СК-42, базирующейся на эллипсоиде Красовского.

При вычислениях в *Trimble Geomatic Office (TGO)* и *Leica Geo Office (LGO)* используются преобразования Гельмерта и Молоденского.

Использование CREDO Трансдор

В CREDO Трансдор необходимо выполнить следующие действия:

1. Пересчитать координаты СК-42 в геоцентрические и записать в файл (Файл → Экспорт → По шаблону...)
2. Пересчитать координаты СК-63 или местной системы координат и записать в файл (Файл → Экспорт → По шаблону...)

3. Загрузить оба файла и установить (найти для территории) параметры связи между этими двумя системами. Для этого нужно выбрать команды Операции → Найти параметры перехода.

Программа предлагает два способа перехода — по Бурсу-Вольфу, который, как мы уже выяснили, является по сути преобразованием Гельмерта, и по Молоденскому-Бадекасу.

Также в новой версии программы — две локальные модели геоида, представляющие собой соответствующие участки EGM 96 и EGM 2008 с шагом сетки 15' и 2.5' соответственно. Так как данные модели отнесены к мировой геодезической системе (WGS-84) и соответствующему эллипсоиду, которые в программе Транскор могут иметь произвольные названия, в диалоге дана возможность выбора геоцентрической СК и эллипсоида из имеющихся (программы *Trimble* и *Leica* производят данные вычисления не хуже).

Использование ГИС

Географические информационные системы обеспечивают корректный переход от одной системы координат к другой только в том случае, если изначально введены правильные параметры этих систем. Большинство ГИС содержат множество стандартных картографических проекций, применяемых в различных странах мира, во встроенных библиотеках. Поэтому если вы осуществляете переход, например, из СК-42 (проекция Гаусса-Крюгера) к WGS-84 (проекция UTM), проблем возникнуть не должно. Однако СК-63, тем более местные системы координат Украины в стандартных библиотеках ГИС отсутствуют.

Можно описать проекцию самостоятельно, например в *ArcGIS* или *MapInfo*, введя все необходимые параметры: даутм, тип проекции (в нашем случае — поперечно-цилиндрическая), начало координат, смещение от центра зоны, масштабный коэффициент и другие.

Однако переход между проекциями в ГИС, даже в случае задания верных параметров системы координат и проекции вручную, далеко не всегда корректен. Очевидно, дело в алгоритмах, вернее в способах, которыми осуществляется пересчет координат. Есть немало примеров, когда при переходе от одной системы к другой местоположение объектов существенно искажается.

Принцип «резинового листа» (*rubber sheet*), применяемый в ГИС для привязки растровых изображений, чреват серьезными ошибками.

Поэтому безопаснее будет работать с геодезическими данными в «геодезических» программах и контролировать правильность расчетов, выполненных компьютером.

Исключением является *ERDAS Imagine*, который довольно корректно пересчитывает координаты.

Математически строгие вычисления

Все приведенные вычисления производятся с достаточной точностью, но, тем не менее, не являются математически и физически корректными.

Точные параметры при пересчете координат из одной системы в другую, а также параметры перехода можно получить:

- 1) последовательно решая уравнения Крюгера;
- 2) на основе вычисления длины дуги как эллиптического интеграла второго рода (например, с помощью преобразований Лапласа-Карлсона).

Необходимо использовать точные модели геоида (квазигеоида), устанавливая связь между используемой системой высот и Балтийской. Необходимо быть уверенным в точности координат пунктов геодезической сети.

Кроме того, эти вычисления требуют, во-первых, знания основ высшей геодезии, во-вторых, применения пакетов программ для решения уравнений численными методами, как минимум *MatLab*.

Зато у вас есть возможность получить параметры связи точнее, чем в «ключках», и выявить ряд недостатков существующих геодезических сетей.

Если вы не ставите перед собой такую задачу, используйте TGO, LGO, CREDO, координатные калькуляторы, а мы надеемся, что приведенные в статье формулы будут полезны в вашей работе.

Все вопросы по системам координат и связям между ними подробно изложены в следующих учебниках:

1. Закатов П. С. Курс высшей геодезии. — М.: Недра, 1976.
2. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Том 1, том 2. — М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005.
3. Бугаевский Л. М. Математическая картография. — М.: Златоуст, 1998.
4. Комаровский Ю. А. Использование различных референц-эллипсоидов в судовождении. — Владивосток: Изд-во Государственного морского университета, 2005.
5. Морозов В. П. Курс сфероидической геодезии. — М.: Недра, 1979.

Г. П. Герасимов

Много полезных статей в журнале «Геопрофиль»!

Подписаться на журнал можно в редакции

телефон (044) 221-07-26

e-mail geoprofile@yandex.ru

В любом почтовом отделении

подписной индекс 37550