

ЗЕМНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА И ЕЕ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ

Б.Б. Серапинас (МГУ им. М.В. Ломоносова)

В 1958 г. окончил геодезический факультет МИИГАиК по специальности «инженерная геодезия». После окончания института работал в Якутском АГП, а после окончания аспирантуры преподавал в МИИГАиК. С 1973 г. работает в МГУ им. М.В. Ломоносова, в настоящее время — профессор кафедры картографии и геоинформатики географического факультета. Доктор географических наук.

В публикации [1, 2] предложена к обсуждению важная тема, касающаяся применения терминов в области спутниковых технологий, в частности, систем координат и систем отсчета, и их возможного несоответствия международной официальной терминологии. Соглашаясь со статьей в целом, рассмотрим этот вопрос еще раз, останавливаясь более детально на отдельных моментах.

▼ Земная система отсчета

Предметом обсуждения в данной статье являются особенности наименований земной системы отсчета. Суть их в том, что они определяют систему координат, устанавливаемую на Земле при помощи дат (параметров Земли) и пунктов геодезической сети. Земные системы отсчета классифицируют по территориальному охвату, выделяя глобальные (мировые), региональные, национальные (государственные) и локальные (местные). Они реализуются в ходе сотрудничества многих стран (международные), стран отдельного региона (региональные) или принадлежат одному государству (мировые, национальные, местные). Как объект, земная система отсчета имеет следующие составные части:

- систему координат;
- даты (параметры Земли);
- отсчетную основу (координаты пунктов геодезической сети).

Системы и их составные части как в российской, так и зарубежной практике описываются разными словами. Рассмотрим наиболее известные терминологические конструкции.

▼ Варианты наименований земных систем отсчета

1. *Система координат*. Данное название системы совпадает с наименованием ее составной части «система координат». Этот термин применяется в РФ, а именно системы координат СК–42 или СК–95. По существу под СК–42 и СК–95 понимаются не столько координаты как таковые (плоские, эллипсоидальные или пространственные), а то, что эти координаты вычисляются по разным параметрам Земли, при опоре на геодезические сети разного качества. СК–42 опирается на референц-эллипсоид Красовского и пункты АГС. СК–95 основывается на пунктах ГГС, координаты которых определены совместной обработкой сетей ДГС, КГС и АГС, а ее эллипсоид Красовского несколько иначе ориентирован в пространстве. Обе системы устанавливают референцные системы координат [3].

2. *Системы отсчета, содержащие в названии имя составной части*. К таковым относятся следующие системы: России — ПЗ–90 (Параметры Земли 1990 и ее уточненная версия ПЗ–90.02), стран Северной Америки — NAD–83 (North American Datum, 1983), Австра-

лии — GDA–94 (Geocentric Datum of Australia, 1994), Новой Зеландии — NZGD–2000 (New Zealand Geodetic Datum, 2000), Японии — JGD–2000 (Japanese Geodetic Datum, 2000), Кореи — KGD–2000 (Korean Geodetic Datum, 2000) и др. В наименованиях присутствует имя составной части: «даты» или «параметры Земли». В Национальном стандарте РФ предлагается термин «*координатная система отсчета*» [4]. Однако выражения «*координатная система*» и «*система координат*» легко отождествить, перенеся название составной части в название всей системы, и этим перепутать понятия.

3. *Геодезическая референцная система* GRS–80 (Geodetic Reference System, 1980), иначе, геодезическая система отсчета. В действительности, это не система отсчета, поскольку она не соответствует вышеприведенной конструкции. GRS–80 представляет собой аккуратно установленные и широко используемые параметры Земли. Эллипсоид GRS–80 лежит в основе практически всех зарубежных систем отсчета. Тем не менее, данное словообразование применяется в геодезическом сообществе в смысле «*земная система отсчета*» [5].

4. *Мировая геодезическая система* WGS–84 (World Geodetic System, 1984). WGS–84 предназначена для обеспечения работы спутниковой системы США

GPS, и в связи с этим получила мировое признание и распространение. Несмотря на мировое значение, она, как и ПЗ-90, принадлежит одному государству. В ее наименовании отсутствует, но видимо подразумевается, слово «отсчетная».

5. *Международная земная система отсчета* ITRS (International Terrestrial Reference System). Основная мировая система, на которую ориентируются все остальные.

Во всех перечисленных вариантах имеется в виду одна и та же сущность. Речь идет лишь о расхождениях в терминах. На практике существуют все варианты, но предпочтение, на мой взгляд, должно быть отдано последнему из них, пятому. По его образцу названа и Европейская земная система отсчета ETRS (European Terrestrial Reference System). В этом варианте присутствует определение «земная», чем подчеркивается характер системы, она не «небесная» (CRS — Celestial Reference System). В названии отсутствуют слова «координатная система» — залог избежания путаницы объекта с его составной частью — «система координат». Оправдано и отсутствие слова «геодезическая». Этим лишь подчеркивается универсальность предназначения общеземной или региональной системы отсчета.

В публикации [1, 2] отмечается как недостаток то, что в результате некорректного перевода в отечественном геодезическом и геоинформационном обиходе используются выражения вида «референцная система координат» и «референцная станция».

Термин «референцный» в России давно применяется и имеет право на существование. Всем хорошо знаком «референц-эллипсоид» — земной эллипсоид, принятый для обработки геодезических измере-

ний и установления геодезических координат [6]. Более того, системы координат, отнесенные к референц-эллипсоиду, называют *референчными* [3, 7]. В сущности, для этих целей служит и земная «референцная система». Однако в силу сложившихся традиций, в России выделяют общеземные эллипсоиды и противопоставляют им референц-эллипсоиды. Референц-эллипсоид, в отличие от общеземного эллипсоида, подходит лишь для ограниченных областей Земли, и устанавливает квазигеоцентрическую систему координат. Так, референц-эллипсоид Красовского смещен с центра масс на ~155 м, а его большая полуось завышена на ~108–109 м. Таким образом, в российской практике термин «референцный» используется по отношению к системам координат и эллипсоиду, применяемым в пределах ограниченных территорий [7]. В мировой практике этот термин применяют по отношению к системам отсчета (Reference System) как общеземного уровня (ITRS), так и регионального уровня (ETRS).

В прошлом применение референц-эллипсоидов диктовалось практической необходимостью. В настоящее время в мире стремятся использовать геоцентрические общеземные эллипсоиды. Так, общеземной эллипсоид GRS-80 лежит в основе всех геоцентрических региональных систем отсчета (NAD, ETRS) и упоминавшихся выше национальных систем (GDA, NZGD, JGD, KGD).

Что касается референчных станций, то это отдельная тема. В геодезическую практику прочно вошло выражение «сеть референчных станций» ГНСС (GNSS — Global Navigation Satellite System), предназначенных для точного кинематического позиционирования в режиме реального времени (RTK). Такая сеть существенно

повышает производительность, экономическую эффективность работ и обеспечивает возможность определения координат в единой системе. Почти по всему миру наблюдается бурный рост числа непрерывно действующих референчных станций. Большинство развитых стран уже полностью обеспечили свои территории сетями таких станций. В данном случае термин «референцная станция» означает, что на «опорном геодезическом пункте» установлен и работает приемник ГНСС, по отношению к которому формируются координаты подвижных (роверных) станций.

Рассмотрим особенности названий составных частей земной системы отсчета.

▼ Составные части земной системы отсчета

1. *Система координат* (Coordinate System). По определению данная составная часть содержит набор математических правил, описывающих, как координаты должны быть соотнесены с точками пространства [4]. Представляется, что термин имеет более глубокий смысл. Речь идет о том, что средствами математики описывается геодезическая сущность координат. Если рассматривается Гринвичская геоцентрическая пространственная прямоугольная система координат, то необходима информация о центре масс, где располагается начало координат; об условном земном полюсе, на который ориентируется ось Z, и др. При описании высот важно различать геодезические высоты над эллипсоидом, имеющие геометрический характер, и высоты в поле силы тяжести. Плоские прямоугольные координаты и практика их использования зависят от выбранной картографической проекции. Сюда должны быть причислены и правила трансформирования

координат из одной системы отсчета в другую. Должно быть понятно, что составная часть «система координат» заработает лишь тогда, когда в математические формулы, отражающие геодезическую сущность, будут подставлены соответствующие параметры Земли.

В связи с этим необходимо отметить, что в геодезической практике иногда возникают недоразумения по поводу термина «географические координаты». Отношение к этому термину у специалистов сложное. В работе [1, 2] отмечается, что в описании программного обеспечения и публикациях по геоинформатике геодезические координаты ошибочно именуется географическими. Автору данной работы известны также утверждения, что таких координат попросту «нет». Между тем, они существуют и используются уже более двух тысяч лет. В официальном ГОСТе по геодезическим терминам и определениям сказано следующее: «Географические координаты. Обобщенное понятие об астрономических и геодезических координатах, когда отклонения отвесных линий не учитывают» [6]. Полной ясности тоже нет: это «обобщенное понятие» или случай, «когда отклонения отвесных линий не учитывают»? Обратимся еще к одному авторитетному источнику, где интересующий нас раздел написан крупнейшим специалистом по геодезии проф. А.А. Изотовым, который считает, что астрономические и геодезические системы координат «могут быть объединены общим названием системы географических координат» [8, с. 16–17]. Представляется, что подход проф. А.А. Изотова на более верный.

По мнению автора данной статьи, термин «географические координаты» следует рассматривать как обобщенное оп-

ределение координат, называемых широтой, долготой и азимутом, предназначенных для указания местоположения объекта на планете и задания на ней некоторого направления. Эти величины могут быть отнесены либо к отвесной линии в заданной точке реальной планеты Земля — это *астрономические координаты*, либо к нормалям или радиусам ее эллипсоидальной или шарообразной моделей. В случае эллипсоидальной модели имеют место *геодезические координаты*, отнесенные к нормали эллипсоида, а также *геоцентрические*, связанные с радиус-вектором эллипсоида, или *квазигеоцентрические*, если центр эллипсоида смещен с центра масс Земли. В ряде задач используются еще *приведенные* и *изометрические* широты, производные от геодезических широт. Например, приведенные широты применяются при решении на эллипсоиде главных геодезических задач способом Бесселя, а изометрические широты — при построениях равноугольных проекций. В случае шарообразной модели Земли сферические координаты отнесены к нормали или к радиусу шара. Различий не возникает, поскольку эти линии лежат на одной и той же прямой.

Использование координат эллипсоидальной или сферической моделей самостоятельно имеет большое значение. В геодезии всегда, когда позволяют ограничения по точности, стремятся перейти от эллипсоида к шару. Этим упрощаются формулы и вычисления по ним. В математической картографии существует способ двойного проектирования, когда эллипсоид отображается сначала на сферу, а затем сфера — на плоскость. Переход с эллипсоида на сферу может быть выполнен, по крайней мере, шестью способами (отображение по нормальям,

геоцентрическое проектирование, проектирование с сохранением условий равноугольности, равновеликости, а также длин параллелей или длин меридианов). В этих задачах приходится иметь дело как со сферическими, так и с эллипсоидальными координатами.

Разночтения возникают при установлении взаимосвязи координат моделей Земли с астрономическими координатами реальной планеты. В случае эллипсоидальных координат учитываются составляющие отклонений отвесных линий. В случае сферических координат отклонения отвесных линий пренебрегают. Более того, как это следует из определений в справочниках и учебниках по топографии, предполагается, что в любой точке поверхности земного шара его радиус, отвесная линия и нормаль лежат на одной прямой. Однако во всех рассмотренных случаях речь идет о географических координатах.

2. *Даты (Datum)*. Стандарт [4] предлагает термин «*исходные даты*» как обобщающий «геодезические даты, высотные даты и местные даты». Практически, слово «*исходные*» часто опускается. В определенной степени такое сокращение обосновано. Исходные даты имели смысл, когда в прошлом референц-эллипсоид ориентировали по одному исходному пункту. В случае, когда ориентирование выполняется с учетом высот квазигеоида и отклонений отвеса на многих астрономо-геодезических пунктах, исходный пункт теряет особое положение. Исходный пункт вовсе не нужен при установлении геоцентрических систем координат.

В системах отсчета используются «высотные даты», определяющие исходный пункт и правила счета нормальных или ортометрических высот. Высо-

ты исходных пунктов отнесены к среднему уровню моря, например, Балтийского моря с исходным пунктом в Кронштадте, Северного моря с пунктом в Амстердаме. Собственные исходные пункты установлены в Северной Америке, Австралии и др. При введении этих высот в качестве уровня принимается геометрический эллипсоид.

Заметим, что термин «даты» уже занят и используется в исчислениях времени (календарные даты, юлианские даты). Такое двойное его применение порой приводит к недоразумениям. Возможно поэтому во многих публикациях, переводных руководствах к картографическим программам и статьях в Интернет встречается термин «датумы» или «Datum'ы». Например, в статье [9] речь идет об определении локального «Datum'a» для установления взаимосвязи системы отсчета WGS-84 с местными системами г. Сочи и региона Кавказских Минеральных Вод. Возможно, имеет смысл узаконить уже употребляемое слово «датумы»?

В случае геоцентрических систем отсчета взамен термина «даты» применим термин «параметры Земли». Ведь геодезические даты содержат набор параметров Земли, посредством которых система координат реализуется на практике. Параметры Земли включают константы, описывающие ее размеры, форму, гравитационное поле, модели геоида (квазигеоида), положение начала координат и ориентацию координатных осей в пространстве, а иногда также параметры взаимосвязи с другими системами отсчета. В числе параметров Земли присутствует скорость света. Данная константа важна в силу того, что с ее помощью устанавливается масштаб линейных построений на Земле и в околоземном

пространстве, так как длины линий определяют по времени и скорости распространения электромагнитных волн. В качестве примера можно указать системы параметров GRS-80 и WGS-84, которые очень близки друг к другу. Эллипсоид WGS-84 получен за счет незначительных изменений эллипсоида GRS-80. Их большие полуоси одинаковы (6 378 137 м), а значения малых полуосей совпадают до миллиметра (6 356 752,314 м) и различаются только в малых его долях.

3. *Отсчетная основа.* Она является практической реализацией системы отсчета. Это координаты геодезических пунктов или иных физических носителей координат, например, спутников ГНСС. По терминологии стандарта [4] — это «геодезическая отсчетная основа» или просто «геодезическая основа». В англоязычной литературе отсчетная основа часто обозначается термином «Reference Frame». Например, ITRF (International Terrestrial Reference Frame) — отсчетная основа ITRS. Сотни пунктов ITRF расположены на материках и островах в океанах. Эти пункты с высокой точностью закрепляют начало координат в центре масс Земли и ориентируют координатные оси относительно экватора и плоскости меридиана Гринвича. Вследствие геодинамических процессов координаты пунктов изменяются в среднем со скоростью около 1–2 см/год. Поэтому координаты постоянно обновляются, а в каталогах указывается эпоха, к которой они отнесены. Например, обозначения ITRS-2000 и ITRF-2000 указывают на эпоху 2000 г.

Отсчетная основа WGS-84 не имеет отдельного наименования. Иногда ее обозначают номером GPS-недели, соответствующей времени модернизации. Модернизация проводи-

лась неоднократно: в начале 730-й (1994 г.), 873-й (1997 г.) и 1150-й (2002 г.) GPS-неделей. Соответственно, отсчетная основа получила обозначения G-730, G-873 и G-1150. Модернизации способствовали GPS-измерения на пунктах IGS (International GNSS Service). В настоящее время в мире имеется около 400 станций IGS, на которых ведутся непрерывные измерения ГНСС-приемниками. Отсчетные основы G-1150 и ITRF-2000 практически идентичны.

Региональная Европейская отсчетная система ETRS обеспечена высокоточной геоцентрической отсчетной основой EUREF (European Reference Frame) или, иначе, ETRF (European Terrestrial Reference Frame). Предусмотрено ее регулярное уточнение. При этом важная роль отводится пунктам EPN (EUREF Permanent Network). Таких пунктов более 200, и на них постоянно ведутся измерения приемниками ГНСС. Работу EPN добровольно поддерживает около 100 европейских агентств и университетов.

Высотная основа (Vertical Reference Frame) определяется реперами нивелирных сетей. ETRS — высотная основа, созданная на базе двух нивелирных сетей континентального уровня — Центрально- и Западно-Европейских государств в Амстердамской системе высот (1973 г.) и государств бывшего СССР и Восточной Европы в Балтийской системе высот (1977 г.). Североамериканская система высот NAVD-88 (North American Vertical Datum, 1988) получена в результате уравнивания обширных нивелирных сетей США, Канады, Мексики и стран Центральной Америки.

Идет речь об образовании единой Глобальной высотной отсчетной основы GVRF (Global

Vertical Reference Frame) посредством приведения высот, прежде всего стран Северной Америки, Австралии, Европы, а также Бразилии, к единой отсчетной уровенной поверхности заданного потенциала силы тяжести.

Как видно, единообразие в применяемой терминологии отсутствует. Параллельно существуют и успешно используются системы и их составные части с разными наименованиями. И в этом нет ничего особенного. Важно, чтобы в учебном процессе и практической работе правильно понималась суть определений и не смешивались понятия.

▼ Список литературы

1. Кафтан В.И. Системы координат и системы отсчета в геодезии, геоинформатике и навигации // Геопрофи. — 2008. — № 3. — С. 60–63.
2. Кафтан В.И. Системы координат и системы отсчета в геодезии, геоинформатике и навигации // Геопрофи. — 2008. — № 4. — С. 62–65.
3. Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 51794–2001. Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек. — М.: Госстандарт России, ИПК Изд-во стандартов, 2001. — 11 с.
4. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52572–2006. Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2006. — 11 с.
5. Машимов М.М. Земные сфероиды, нормальная Земля и геодезические системы отсчета // Геодезия и картография. — 1998. — № 7. — С. 12–17.
6. Геодезия. Термины и определения. ГОСТ 22268-76. — М.: Издательство стандартов, 1981. — 32 с.
7. Пеллинен Л.П. Высшая геодезия. - М.: Недра, 1978. — 264 с.
8. Изотов А.А., Зубинский В.И., Макаренко Н.Л., Микиша А.М. Основы спутниковой геодезии. — М.: Недра, 1974. — 320 с.
9. Погорелов В.В., Шавук В.С. Создание локального Datum'a на территорию картографического проекта // Геодезия и картография. — 2007. — № 7. — С. 52–55.

RESUME

Terminological problems raised by V.I. Kaftan in the Geoprofi magazine in 2008 are discussed. The discussion concerns the Earth reference and its components. It is shown that there is no terminological uniformity nor in foreign practice neither in the Russian practice. Under these circumstances it is important to exactly understand the essence of objects in both practice and education in order not to confuse notions.



Новая серия тахеометров **PENTAX®**

УЖЕ В ПРОДАЖЕ!



R-400

- Мощный безотражательный дальномер до **500 м!**
- Встроенная память до 60 000 измеренных точек.
- Простота в использовании.
- Система тройной фокусировки, включая автофокус.
- Разъем под SD карту, USB и RS-232C порты.
- Невысокая цена.



V300DN

- Простой и надежный тахеометр
- Безотражательный дальномер до 250 м.
- Встроенная фотокамера 3,1 Мрпх с цветным экраном 1,5 дюйма.
- Внутренняя память и внешняя SD карта, USB и RS-232C порты.
- Оптимальное соотношение цены и качества – доступно всем!

Комплексная поставка всего спектра геодезического оборудования и аксессуаров. Сервисное обслуживание и обучение. Высокоточные измерительные системы.

С-Петербург: Тел\ф: (812)-784-15-34 784-96-70 Тел: 380-92-13 337-51-92 Москва: Тел\ф: (495)-967-99-35
www.nevatec.ru www.pentax-geo.ru nevatech@mail.rcom.ru