

## О системах координат и дальней связи.

### Значение систем координат для космонавтики.

Для успеха выполнения космических миссий необходимо точное позиционирование КА в пространстве. Чем выше точность определения позиции КА, тем более точно можно спрогнозировать его дальнейшую траекторию, а следовательно, обеспечить большую точность экспериментов и измерений, проводимых научным оборудованием и сенсорами КА.

Современные средства измерения траекторий обеспечивают исключительно высокую точность определения позиции КА. К примеру, для современных аппаратов ДЗЗ, движущихся на низкой орбите с  $|r^-| \leq 6871.0$  км. (высота полёта менее 500 км.), типичное отклонение измеренной позиции КА от реальной меньше их линейных размеров (в случае современного кубсата – менее 10-15 см.).

Столь высокая точность обеспечивается применением очень специальных наземных средств измерения, в частности, высокочастотных радаров с большой апертурой, лазерных дальномеров, мощных телескопов с камерами высокого разрешения, а так же развитого математического аппарата. *(Отмечу, что есть возможность определять положение КА и другими способами, однако столь высокая точность позиционирования при этом уже недоступна).*

Разумеется, для работы указанных выше средств измерения, необходимо уже точное позиционирование их в пространстве. Это делается с помощью привязки позиций средств измерения к глобальной системе координат (с.к.).

Наша планета совершает в пространстве сложное движение, включающее в себя вращение вокруг своей оси, прецессию, нутацию и искажения второго порядка, вносимые жидким ядром, а поверхность нашей планеты движется относительно оси вращения планеты (причём на довольно большие значения - порядка единиц метров за год). В связи с этим, глобальные с.к. необходимо постоянно корректировать.

Насколько правильны и корректны отечественные системы координат? После распада СССР, в связи с упадком науки в стране, многие знания и технические возможности были потеряны. Возможно, это является значимым препятствием для организации Роскосмосом экспедиций к Луне. Насколько данная гипотеза верна?

### Системы координат, используемые в мире и в Российской Федерации.

Для обеспечения разнообразных практических задач было разработано множество систем координат с различными центрами, различными способами привязки их к реальным географическим/астрономическим объектам и различными, часто весьма замороченными, способами пересчёта между ними.

В последней четверти XX века, для того чтобы облегчить работу с координатами и как-то систематизировать имеющийся «зоопарк», Международным Астрономическим Союзом было учреждено [IERS](#) - International Earth Rotation and Reference System Service (Международная служба вращения Земли и систем отсчёта). Эта служба разработала [ITRS](#) – International Terrestrial Reference System (Международную Наземную Систему Отсчёта), к которой привязываются современные прикладные системы координат. Её практической реализацией стал ITRF - International Terrestrial Reference Frame (фрейм Международной Наземной Системы Отсчёта,

фактически, набор методов для расчёта координат тех или иных пунктов на Земле и в околоземном пространстве относительно ITRS).

ITRS стала общепринятой системой координат для применения в геодезии, топографии и астрометрии, и многие страны подгоняют свои национальные стандарты геодезических систем координат под неё. Тем не менее, некоторые страны и организации используют свои координатные системы. В частности, например, армия США использует систему [WGS-84](#), определяемую несколько иным образом, чем ITRF, хотя на уровне практической реализации идентичную ей.

В России исторически сложилось так, что использовались собственные системы координат, отличающиеся от общемировых. В СССР были созданы прикладные системы координат серий СК и ПЗ.

Системы координат серии СК ([СК-42](#), [СК-95](#)) наследовали дореволюционным системам координат, разрабатывавшимся ещё в царское время военными топографами и Пулковской обсерваторией. Название этой серии систем расшифровывается как просто «Система Координат», а номер соответствует году разработки. Главным назначением этих систем координат было применение в военной топографии и народном хозяйстве. К настоящему времени (2021 год), в связи с появлением более точных исследований Земли и новых научных данных эти системы уже устарели, и не обеспечивают такую высокую точность, как ITRF. Поэтому была разработана новая с.к. – [ГСК-2011](#) (Государственная Система Координат 2011 года), принятая в 2017 году.

[Система координат ПЗ](#) была разработана в СССР в середине 1950-х годов для советской космической программы, и её главным назначением было использование в расчётах позиционирования КА и прогнозирования их траекторий. Название её расшифровывается как «Параметры Земли» (т.к., она включала в себя учёт прецессии и нутации планеты, а так же некоторых других эффектов), номер соответствует году разработки. Финальной её реализацией была с.к. ПЗ-90.11 – ПЗ-90 с поправками для соответствия условиям 2011 года.

## **Особенности современных отечественных с.к.**

На данный момент в России нет полноценной единой глобальной системы координат.

Официально с 1 января 2021 года единственной допустимой прикладной с.к. для гражданского применения является ГСК-2011. Она практически полностью соответствует ITRF (отклонения составляют порядка единиц-долей сантиметра), и является обязательной к использованию при составлении современных карт или расчётах координат. Однако, преобразование координат из использовавшейся до этого СК-95 в ГСК-2011 вызвало у специалистов разнообразные проблемы. Рекомендации по пересчёту, выпущенные Росреестром, были неполноценными и неточными, при пересчёте точек привязки согласно этим инструкциям возникали ошибки в позиционировании порядка 30 м для контрольных точек (и, как показало исследование профильных форумов, до 150 м. при прикладных расчётах). Было написано несколько научных статей (напр., В.И.Обиденко, «[ОБ ИЗМЕНЕНИИ КООРДИНАТ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ СК-95 К ГСК-2011](#)», 2017), в которых приводились улучшенные методы пересчёта координат, однако всё равно, при практическом применении ошибки позиционирования велики.

Также, далеко не все объекты на территории РФ к настоящему времени полноценно привязаны к ГСК-2011. Анализ профильных форумов показал, что существует огромный массив топографических данных, привязка которых выполнена только в СК-95, а перевод их, в силу вышеописанных особенностей новой с.к. затруднён.

Почему была принята к использованию такая система – неизвестно. Почему система координат настолько «сырая», тоже не ясно. Тем не менее, система утверждена к использованию [постановлением правительства РФ от 24 ноября 2016 г. № 1240](#), Росреестр требует использовать во всех топографических приложениях только её, и на ней основаны все кадастровые данные.

Этим же [постановлением правительства](#) для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полётов и решения навигационных задач установлена система ПЗ-90.11, и в МО РФ и Роскосмосе принята к использованию именно она. ПЗ-90 разрабатывалась ещё в 80-е годы XX в., вместе с проектом по созданию космической навигационной системы ГЛОНАСС. Она соответствует ITRF (отклонения [составляют порядка 1 метра](#)), однако, далеко не всегда согласуется с ГСК-2011 (хотя ГСК-2011 разработана на её основе). Для её построения использовались средства РСДБ ([система КВАЗАР](#) ИПА РАН), лазерная локация ИСЗ и доплеровская опорная геодезическая сеть, входящая в международный проект [DORIS](#), т.е., фактически, те же средства, что используются и для отслеживания положения КА. Математический аппарат и необходимые для расчётов данные были выработаны [Службой ПВЗ ИПА РАН](#) (и они соответствуют современным требованиям точности IERS). С помощью этих данных измерительных средств уточнялись координаты измерительных пунктов, обеспечивая точную привязку их положения к с.к. ПЗ-90/ITRF. В 2014 году МО РФ приняло последнюю версию этой системы координат, ПЗ-90.11, с поправками соответствующими параметрам Земли в 2011 году.

Таким образом, моя первоначальная гипотеза верна лишь отчасти. Действительно в нашей стране на данный момент имеются проблемы с геоцентрическими системами координат – старая с.к. «ушла» от времени, а новая не позволяет точно определять положения объектов на поверхности Земли. Однако измерительные средства, применяемые в космической навигации, используют отдельную систему координат, соответствующую (в пределах погрешности) требованиям ITRS.

### Оценка применимости с.к. для КА на орбите Луны.

Достаточно ли точна ПЗ-90.11 для обеспечения точного позиционирования КА у Луны, или, если говорить правильнее, какова величина ошибки позиционирования КА, вызываемая погрешностью ПЗ-90.11 относительно ITRS?

Согласно R.Battin<sup>1</sup>, в первом приближении,

$$\delta \vec{q} = h \vec{\delta r}$$

т.е., величина отклонения реального положения КА от расчётного  $\delta \vec{r}$  пропорциональна величине отклонения измеренных значений величин, по которым мы измеряем положение КА, от референсных  $\delta \vec{q}$ , а в качестве коэффициента пропорциональности выступает вектор  $h$ .

В контексте изучаемой проблемы, данный вектор есть вектор от сенсора до КА. Насколько он соответствует реальному, если у нас присутствует неточность в определении положения сенсора порядка 1 м.? Элементарная школьная геометрия показывает, что при таких расстояниях ошибка от неточности привязки с.к. на много порядков меньше ошибки инструментов измерения.

Т.е., можно утверждать, что ПЗ-90.11 применима для точного позиционирования КА даже вблизи Луны, и в этом первоначальная гипотеза неверна.

---

<sup>1</sup> Richard H.Battin, An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics, Revised Edition, 1999

## Особенности современных отечественных средств наблюдения.

Наземные системы, предназначенные для измерения положения КА (или, как их часто называют в зарубежной литературе, «сенсоры» или «датчики») имеют физические ограничения по углу обзора, а так же технические ограничения по дальности обнаружения КА, и точности определения расстояния.

Технические ограничения сенсоров зависят, в первую очередь, от их назначения. В зарубежной литературе (например, у D.Vallado<sup>2</sup>), принято разделять датчики по назначению на три основных класса:

1. специальные (англ. “dedicated”), предназначенные специально для наблюдения и измерения траекторий КА.
2. второстепенные (англ. “collateral”), используемые для других целей (в основном для военных, например, для работы в составе СПРН), однако применяющиеся и для контроля космического пространства.
3. вспомогательные (англ. “contributing”), к которым относятся сенсоры, принадлежащие научным учреждениям и коммерческим структурам, но не используемые для трекинга КА систематически.

В нашей стране, по информации из открытых источников, имеется большое количество сенсоров первого типа, в частности, [НИП](#) (научно-измерительные пункты, иногда используется термин ОКИК – отдельные командно-измерительные комплексы), а так же развитая сеть сенсоров второго типа, к которым относятся военные объекты СПРН и СККП. Сенсоры третьего типа (к которым можно отнести разнообразные научные оптические и радиотелескопы) представлены меньше, т.к., после распада СССР техническое оснащение отечественной астрономии понесло убытки.

Во времена СССР для нужд МО СССР и обеспечения советской космической программы было построено 23 НИПа, а так же 8 кораблей Плавучего Измерительного Комплекса МО СССР (КИК), и 11 кораблей [СКИ ОМЭР АН СССР](#) (так называемый «Морской Космический Флот»). К нашему времени из них осталось 17 наземных НИПов, 1 КИК («[Маршал Крылов](#)», обеспечивающий пуски с космодрома «Восточный»), и 1 корабль Морского Космического Флота («[Космонавт Виктор Пацаев](#)» в непригодном для использования состоянии).

Сенсоров второго типа, (даже) по данным открытых источников, на данный момент в нашей стране очень много. Средства [СПРН](#) и [СККП](#) МО РФ объединены в сложную отлаженную сеть, включающую в себя:

1. разнообразные стационарные РЛС различных типов («[Днепр](#)», «[Дарьял](#)», «[Волга](#)», «[Дунай](#)», и т.п.)
2. подвижные РЛС (например, [55Ж6МЕ](#))
3. оптико-электронные станции типа «[Сажень](#)», установленные в различных точках на территории РФ
4. радиооптический комплекс «[Крона](#)»
5. оптико-электронный комплекс «[Окно](#)»
6. различные средства оптической и радио и радиотехнической разведки, как стационарные, так и базирующиеся на кораблях и самолётах.

---

<sup>2</sup> David A.Vallado, Fundamentals of Astrodynamics and Applications, Fourth Edition, 2013

К сенсорам третьего типа можно отнести различные радио- и оптические телескопы российских научных центров, например радиотелескопы ИПА РАН типа [РТ-32](#) в дер. Светлое и станции Зеленчукской, [РТ-64](#), расположенный в Центре Космической Связи «Медвежьи Озёра» в Московской области, и некоторые другие.

Однако, исторически сложилось так, что в нашей стране сенсоры первого и второго типа, фактически, следует относить ко второму типу – первоначально они строились для решения задач МО СССР и РФ, в частности, для предупреждения ракетной атаки территории нашей страны баллистическими ракетами, обеспечения работы военных КА, а так же для регистрации результатов испытаний отечественных баллистических ракет. В связи с этим большинство из них имеют весьма специфические возможности, а именно:

- сравнительно малую дальность (не более 40000 км по высоте, в среднем менее 10000 км),
- ограниченный угол обзора ( $<180^\circ$  по азимуту, с весьма небольшим возвышением)
- очень малые минимальные углы возвышения (многие РЛС – вообще загоризонтные, т.е., видят цели ниже локального горизонта)
- возможность работать с малоразмерными, маневренными целями без ответчиков в условиях активной и массовой постановки помех.

Т.е., эти сенсоры отлично подходят для военных задач, но для обеспечения межпланетной космонавтики не оптимальны. Кроме того, они расположены в тех местах, где это требовалось для целей обороны страны, поэтому для обеспечения лунных экспедиций им не хватает углов обзора.

Более подходящими для задач обеспечения позиционирования лунных экспедиций являются вспомогательные сенсоры, принадлежащие различным научным учреждениям. Однако некоторые из них (РТ-32 в Ленинградской области) находятся в относительно высокоширотных регионах, что затрудняет для них работу с Луной, а другие не оборудованы системами, позволяющими решать задачи позиционирования КА.

Также, следует понимать, что для быстрого и точного определения позиции КА необходимо несколько измерений, произведённых из различных точек (как минимум трёх). Для этого требуется несколько сенсоров, желательно, связанных между собой в реальном времени. У НИП и военных средств обнаружения такая связь есть, у датчиков, принадлежащих научным учреждениям её нет (хотя её создание, при использовании современных средств передачи данных, относительно просто и дёшево).

### **Использование НИПов (ОКИК) для обеспечения полёта к Луне.**

Необходимо отметить, что в СССР были сенсоры сети НИПов, которые были способны обеспечивать дальнюю космическую связь. Часть из них располагалась на кораблях, а главным узлом системы дальней космической связи был [НИП-16](#) (40-й отдельный командно-измерительный комплекс) в Евпатории (Крым), где располагался Западный Центр Дальней Космической Связи. Особенностью НИП-16 было то, что там были расположены установки, специально разработанные для дальней космической связи, в частности, [комплекс «Плутон»](#), радиотелескопы [П-400П](#), [П-2500](#), и другие, например Эти системы способны были не только принимать, но и передавать очень мощный направленный сигнал, а следовательно, могли использоваться и для активной локации КА (разумеется, принимая сигнал от ответчика космического аппарата).

НИП-16, благодаря своему расположению в относительно низкоширотном районе, хорошо подходил для межпланетной связи. Однако, после распада СССР, он отошёл Украине. Украинское

МО и Академия Наук «не потянули» содержание столь сложного, дорогого, и не нужного для страны комплекса, и НИП-16 был заброшен, а установки связи, оставшиеся без обслуживания, постепенно разрушились. Только после присоединения Крыма к России в 2014 году НИП-16 вновь был введён в контур управления космическими аппаратами МО РФ и «Роскосмоса». Однако восстановить работоспособность комплекса [планируется только к 2030-му году](#).

Помимо НИП-16, Роскосмосом были предприняты попытки постройки систем дальней космической связи для обеспечения межпланетных миссий. В частности, часть систем НИП-1 (площадка 23) в 2011 году [была обновлена](#) и включена в систему «Спектр». Современное высокочувствительное оборудование позволяло использовать старое антенное хозяйство НИП-1 для обеспечения межпланетных миссий (в частности, миссии «Фобос-грунт»).

Также, в 2012 году Роскосмос проводил [некие переговоры с ЮАР](#) о строительстве там наземной станции, а в 2018 году в прессе [сообщалось](#) о проекте постройки НИП в Антарктиде. Однако дальше планов в обоих случаях дело так и не зашло.

## **Выводы.**

Подытоживая проведённое исследование, можно сделать следующие выводы:

- 1) Первоначальная гипотеза о том что у российской «государственной» космонавтики имеются проблемы с привязкой системы координат к реальным объектам и что это вызывает сложности определения местоположения КА в миссиях к Луне, не подтвердилась.
- 2) Однако, имеются определённые сложности со средствами дальней космической связи, вызванные общим упадком технологического развития страны в 1990-е годы.
- 3) Указанные сложности решаемы, однако их планируется решить к началу 2030-х гг.