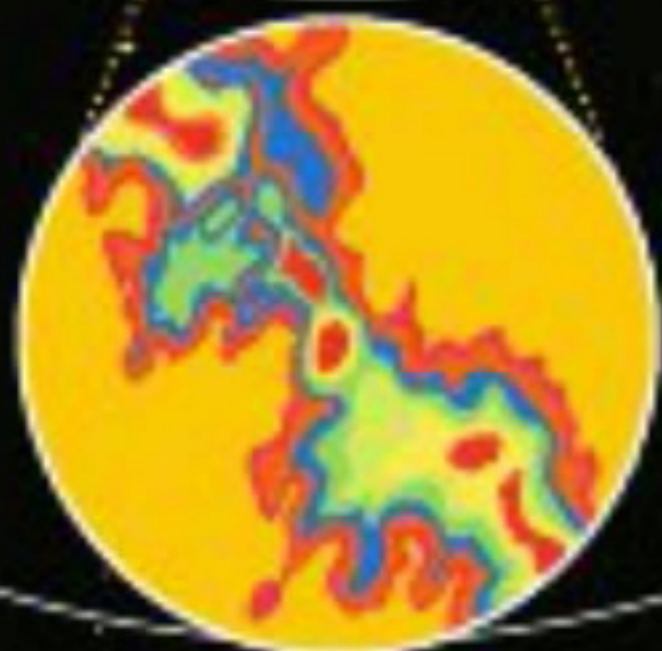


КВАЗАР

1



Квезары ① — ярчайшие объекты во Вселенной, связанные с черными дырами в центрах галактик. Внизу: на карте радиояркости квазара видны субсветовые потоки плазмы (джеты)



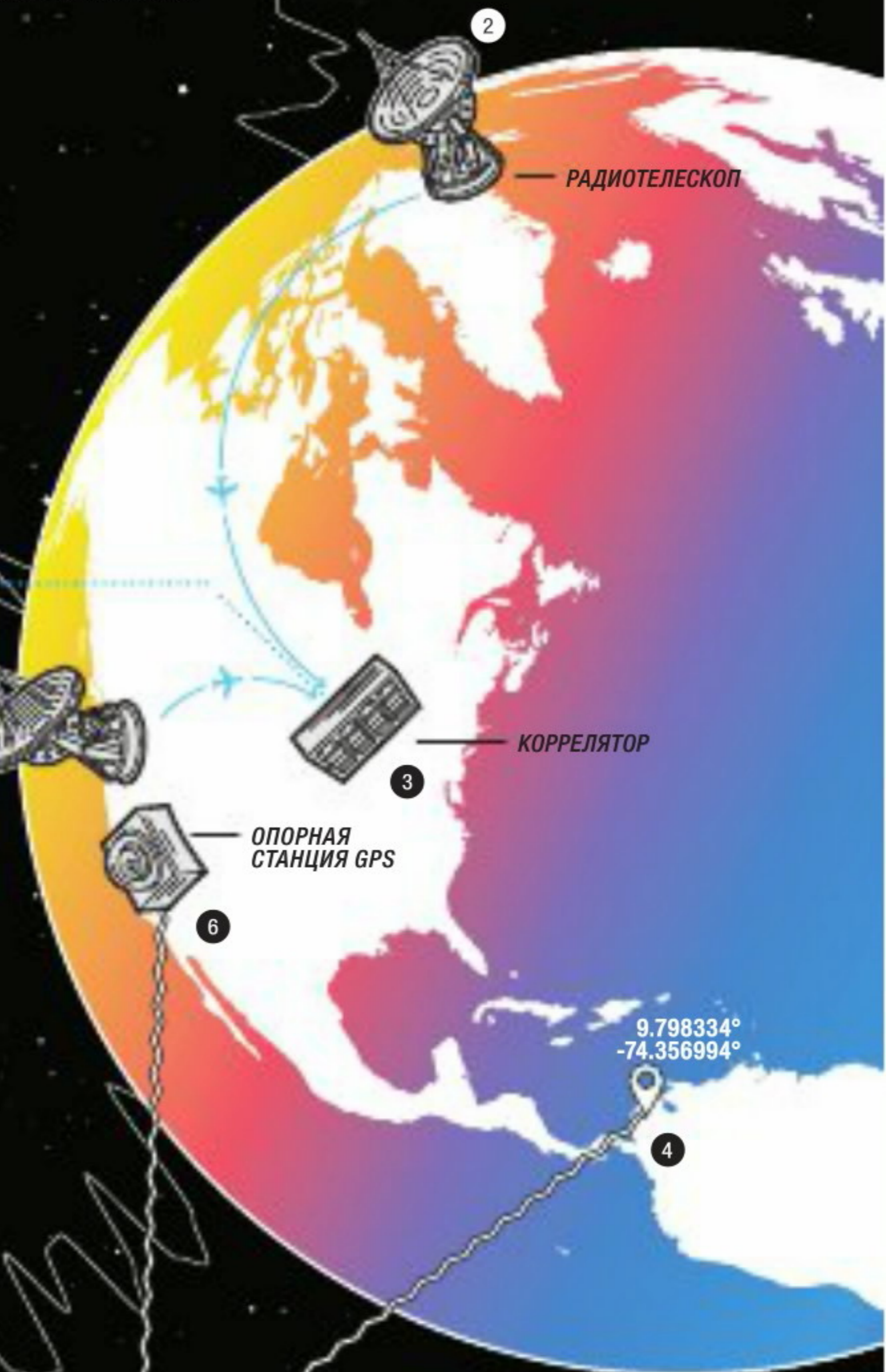
### Принцип работы РСДБ

Радиосигнал квазара ①, принимаемый каждой из антенн ②, оцифровывается и записывается на магнитный носитель, подобно тому, как это делается при многоканальной записи звука. Записи снабжаются метками времени от атомных часов и на жестких дисках доставляются самолетом в центр обработки на кореллятор ③. По этим данным можно либо с точностью до сантиметров определить положение антенн ②, либо с точностью до миллисекунд дуги — положение источника на небе ①. Многолетние наблюдения позволяют еще в десятки раз поднять точность. Сейчас положения антенн отслеживаются с миллиметровыми погрешностями, а квазаров — с точностью до десятков микросекунд дуги



Координаты земных объектов ④ определяются в системе GPS по расстоянию до спутников ⑤. Орбиты спутников уточняются по данным опорных станций ⑥, а их положение привязывается к антеннам РСДБ ②

Сигнал, идущий от квазара, искажается в межзвездной среде, а затем в ионосфере и атмосфере Земли, что затрудняет сопоставление сигналов, принятых разными антеннами



РАДИОТЕЛЕСКОП

КОРРЕЛЯТОР

ОПОРНАЯ СТАНЦИЯ GPS

GPS-СПУТНИК

9.798334°  
-74.356994°



# Фундамент всех координат

**В ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ GPS И ГЛОНАСС ЛЕЖАТ НАБЛЮДЕНИЯ КВАЗАРОВ. ДЛЯ ЭТОГО ИЗОБРЕТЕНА ОСОБАЯ ТЕХНОЛОГИЯ — РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ СО СВЕРХДЛИННОЙ БАЗОЙ, ИЛИ РСДБ**

**АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВ**

Иллюстрации  
**ЭЛЬДАР ЗАКИРОВ**  
**СЕМЕН ВИКТОРОВ**

На сегодня в мире действует несколько РСДБ-сетей. Наиболее крупные из них — американская VLBA (*Very Long Baseline Array*), включающая около десятка антенн в США, и европейская EVN (*European VLBI Network*), в которую входит около двух десятков инструментов. Российская сеть «Квазар» состоит из трех 32-метровых радиотелескопов, расположенных на Карельском перешейке, Северном Кавказе и в Бурятии. Деление на сети довольно условное, поскольку все они тесно взаимодействуют между собой и ведут совместные наблюдения. Свои инструменты есть у Австралии, Японии, Китая и других стран

Огромные параболические тарелки радиоастрономических антенн, разбросанные по всему земному шару, часто работают не самостоятельно, а синхронно друг с другом, объединяясь в сети. Технология совместных наблюдений несколькими радиотелескопами имеет труднопроизносимое название «радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой» (сокращенно — РСДБ). О ней мало известно за пределами узкого круга специалистов, но плодами их работы мы пользуемся всякий раз, включая GPS-навигатор или принимая сигналы точного времени.

Астрономия всегда служила навигации. Штурман выходил на палубу с секстантом и по Солнцу измерял широту. Сегодня смартфон с GPS выдает координаты в тысячу раз быстрее и точнее. И как будто звезды больше не нужны. Спутники спрятали от нас астрономию, подобно тому, как электрическая подсветка городов скрыла звездное небо. Но это лишь вопрос видимости. В основе спутниковой навигации по-прежнему лежат астрономические измерения, точность которых благодаря технологии РСДБ за полвека выросла в десятки тысяч раз.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПРИОРИТЕТ

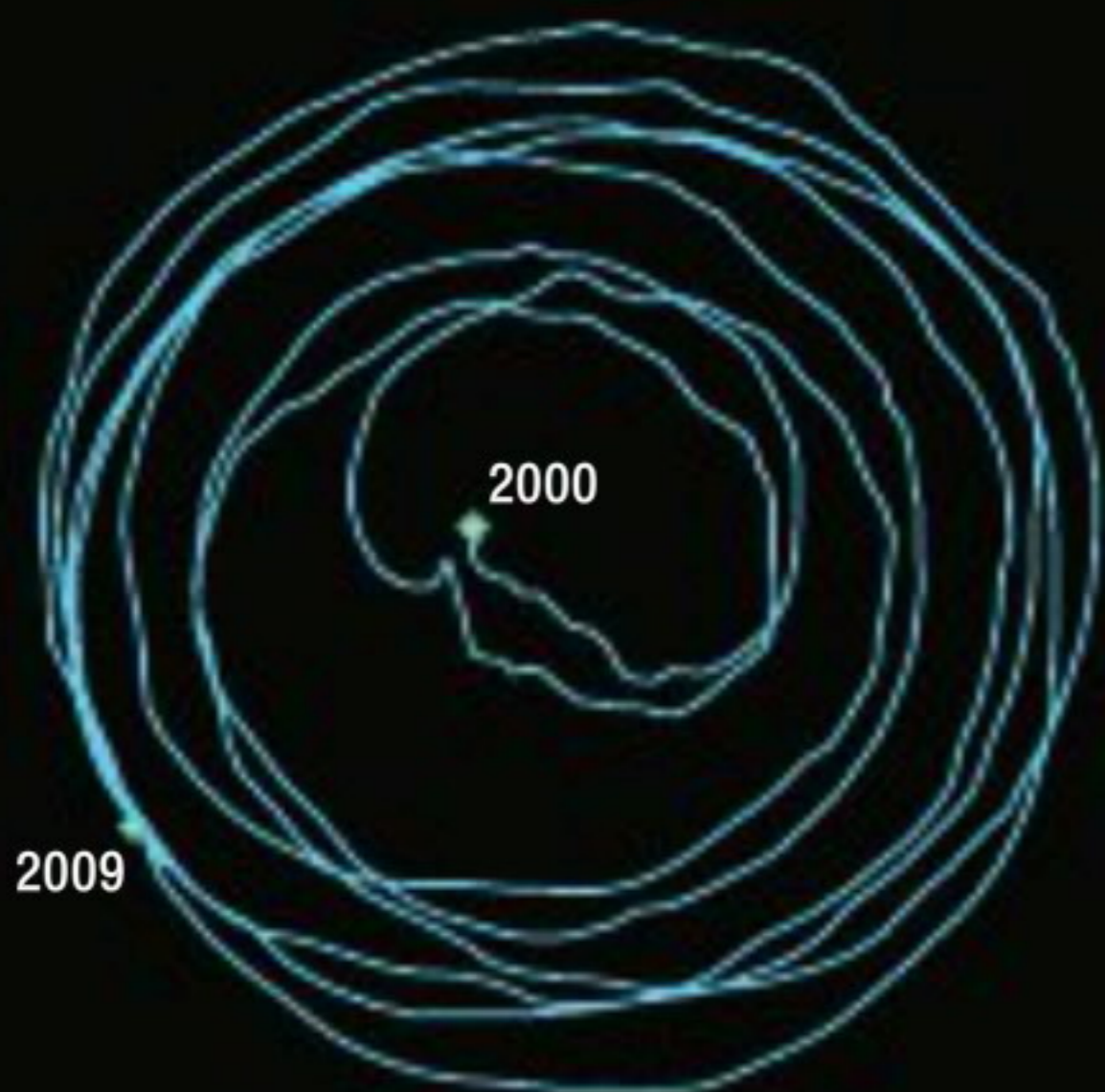
Ценность небесных тел для навигации заключается в относительном постоянстве их движений. Благодаря этому, зная точное время и расстояние до каких-либо космических объектов с известными траекториями, можно рассчитать собственную позицию. Но точность определения

*ТЕХНОЛОГИИ*

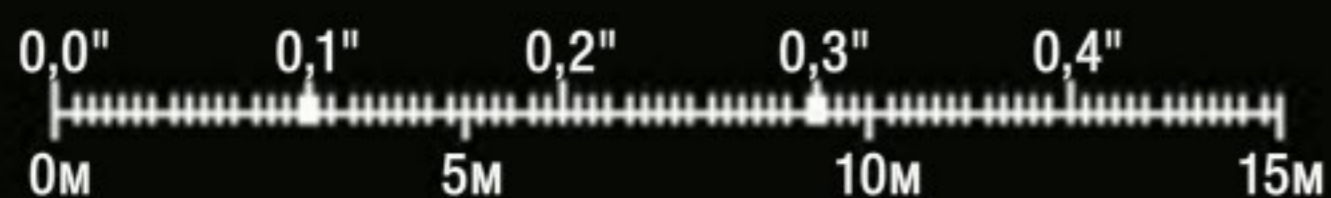
## **Маленькие проворные антенны**

Первое время для РСДБ-наблюдений использовались обычные «астрофизические» радиотелескопы больших размеров — от 20 до 100 метров. Они хороши для изучения слабых источников, но для координатных задач слишком медлительны. Астрометристам надо успеть изучить как можно больше объектов. Но крупные антенны поворачиваются со скоростью всего около одного градуса в секунду. В результате до 80% наблюдательного времени уходит на ожидание наведения. Поэтому в последние годы стали строиться скромные 12-метровые антенны, способные крутиться в несколько раз быстрее. Им, конечно, доступны только радиояркие квазары, но для решения координатных задач этого хватает.





2009



**ВРАЩАЮЩИЙСЯ ПОЛЮС**

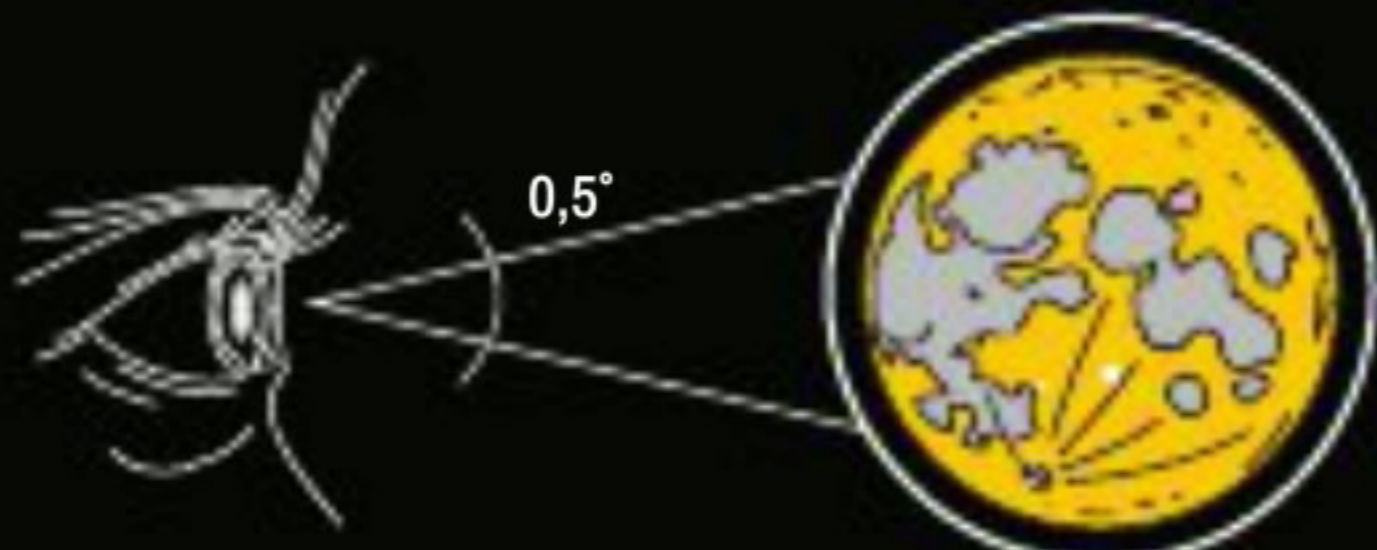
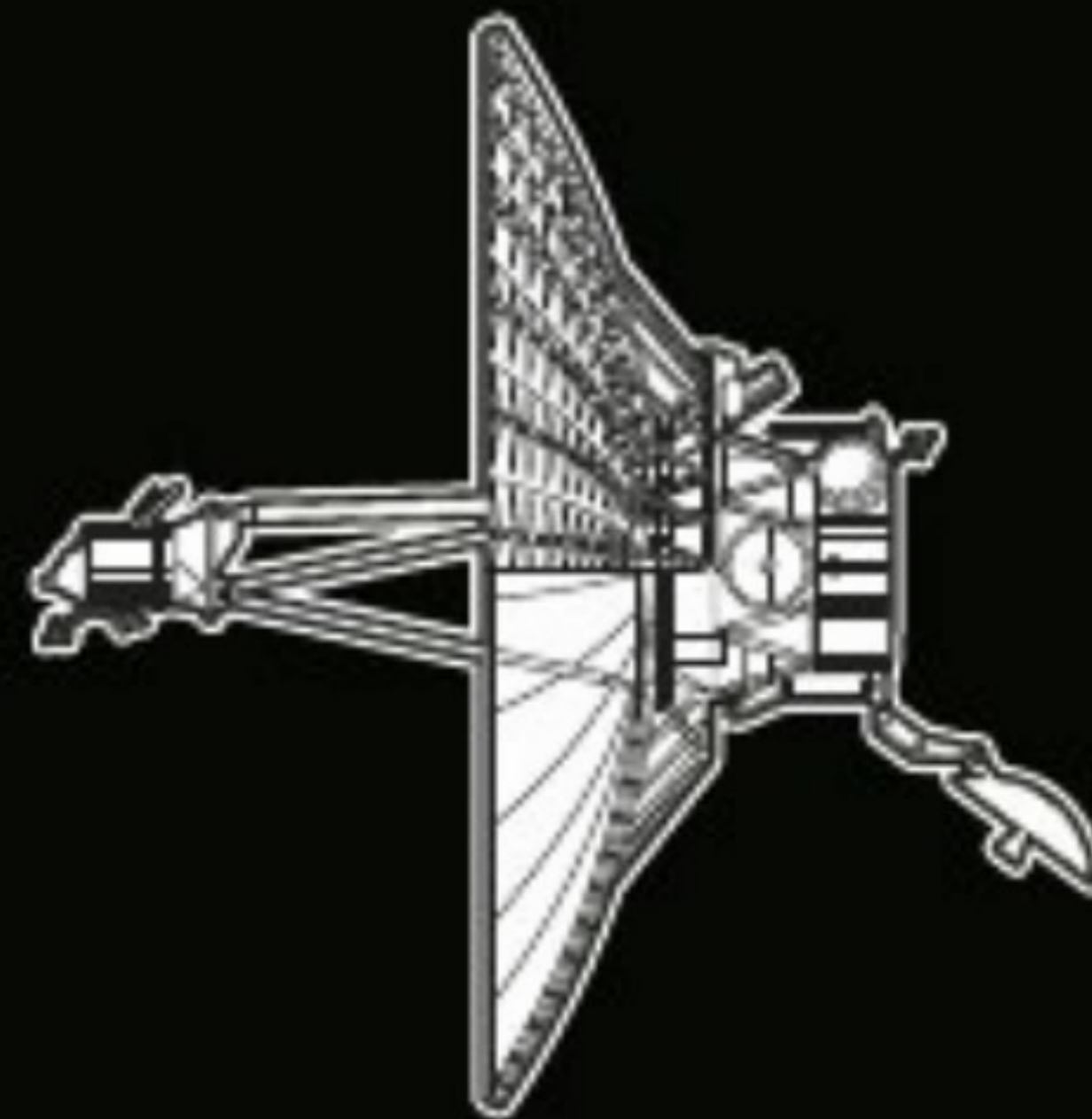
Эта кривая — траектория движения Северного полюса Земли в период с 2000 по 2009 год, которое удалось отследить благодаря технологии РСДБ

**ОПТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ**

Разрешение глаза — 1 угловая минута, крупнейших телескопов — 0,1 угловой секунды. Разрешение РСДБ-наблюдений в десятки тысяч раз выше. В оптике с таким разрешением был бы виден рисунок следа астронавта на Луне

**ПРОЕКТ «РАДИОАСТРОН» И СПУТНИК «СПЕКТР-Р»**

Вынос РСДБ-антенны в космос позволяет значительно увеличить угловое разрешение РСДБ-наблюдений. В прошлом году Россия отправила на орбиту спутник «Спектр-Р». Это самый большой в истории орбитальный радиотелескоп и единственная действующая российская обсерватория в космосе. Телескоп прошел все необходимые этапы тестирования, но к регулярным научным наблюдениям пока не приступил. Сейчас идет уточнение орбиты спутника, который в рамках проекта «Радиоастрон» позволит обеспечить разрешение в 30 раз выше, чем у наземных интерферометров



0,5°

1/2 градуса = 30 минут



1 минута = 60 секунд



1 секунда



1/100 секунды



1/10 000 секунды



**КАРТА ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИКОВ**

Движение тектонических плит по данным РСДБ, а также систем глобального позиционирования *GPS*, лазерной локации спутников *SLR* и доплеровского слежения за спутниками *DORIS*, которые опираются на фундаментальную систему координат РСДБ





## Рабочие моменты

Если бы вблизи работающей РСДБ-антенны случилось крупное землетрясение, это дало бы уникальную информацию о геодинамических процессах во время подвижек земной коры. Но геофизикам пока не везет. 27 февраля 2010 года мощнейшее землетрясение частично повредило РСДБ-пункт в чилийском Консепсьоне, но сеанса наблюдений в это время не проводилось. Японские РСДБ-антенны тоже оказались выключены во время катастрофического землетрясения 11 марта 2011 года.

В 2009 году радиоастрономы провели 24-часовой наблюдательный супермарафон, в котором участвовали 36 антенн, размещенных от Шпицбергена до Антарктиды. Был собран огромный массив данных, но... они до сих пор еще до конца не обработаны: анализ РСДБ-данных требует существенно больших затрат, чем сами наблюдения.

координат ограничена возможностями наших инструментов. Разрешение человеческого глаза — 1 угловая минута, то есть 1/60 градуса. Звезды, отстоящие друг от друга менее чем на минуту дуги, сливаются для нас в одну светящуюся точку. С большей точностью координаты без оптических приборов не определить. Разрешение телескопа пропорционально его размеру. Например, диаметр 30-сантиметрового инструмента в 60 раз больше, чем у зрачка, что обеспечивает предельное разрешение в 1 секунду дуги. Ограничение связано с волновой природой света, из-за которой изображение в фокусе всегда немного размыто. Крупнейшие в мире 10-метровые телескопы могли бы теоретически различать сотые доли секунды, но из-за дрожания атмосферы практический предел составляет около 0,1 угловой секунды, и он был достигнут почти столетие назад.

От появившихся в середине прошлого века радиотелескопов никто не ждал особой точности угловых измерений. Радиоволны в сотни тысяч раз длиннее световых и дают во столько же раз более размытые изображения. Так что по четкости «картинки» 100-метровый радиотелескоп на порядок уступает невооруженному глазу. Но именно благодаря большой длине волны это ограничение удалось обойти.

Полвека назад, весной 1962 года, радиоастроном из Физического института имени П.Н. Лебедева (ФИАН) Леонид Матвеев предложил использовать разнесенные на большое расстояние радиотелескопы в качестве единого инструмента. По его идее принимаемые сигналы надо записывать на магнитные ленты, сопровождая отметками атомных часов, а затем в вычислительном центре «сводить» дорожки, как если бы они были приняты разными частями объектива единого гигантского инструмента. В оптике, где длина волны составляет доли микрона, для такого фокуса не хватило бы ни точности атомных часов, ни скорости записи информации. А вот с куда более длинными сантиметровыми радиоволнами это было хоть и на пределе, но возможно.

Первый эксперимент планировалось провести с использованием антенн дальней космической связи в Евпатории и Симферополе. Однако на семинаре лаборатории радиоастрономии ФИАН не поверили в реализуемость такого проекта, и его «пробивание» заняло несколько лет. Как писал позже Леонид Матвеев, «основными проблемами были не бюрократические препоны, а «поддержка» коллег». Лишь в 1965 году он совместно с астрономами из Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Николаем Кардашёвым и Геннадием Шоломицким смог опубликовать принцип радиоинтерферометрических наблюдений в журнале «Радиофизика». К тому времени уже шла подготовка к совместным наблюдениям с английской радиообсерваторией «Джодрелл

## КОСМОНАВТИКА

### РСДБ и космонавтика

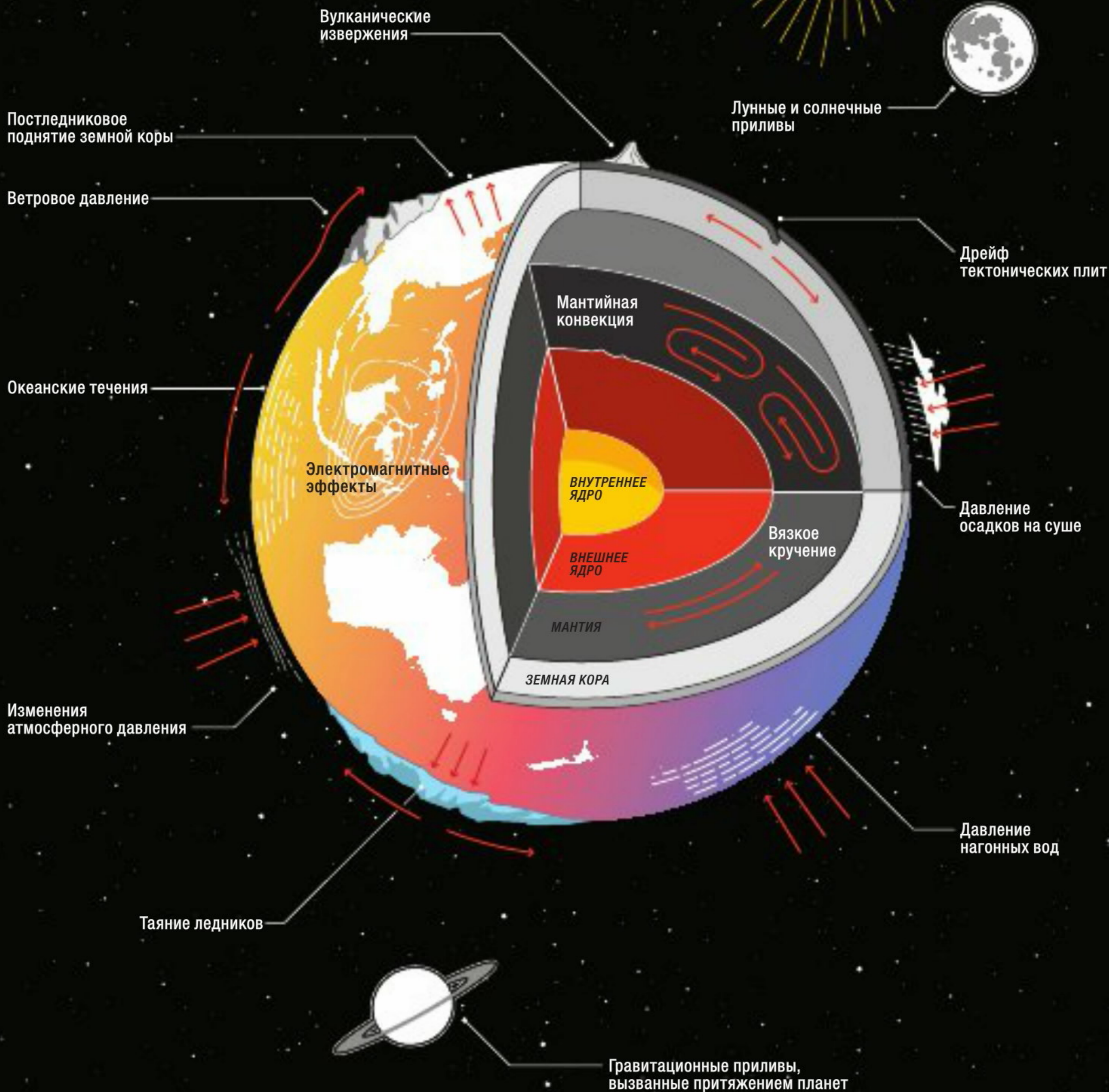
Технология РСДБ не раз применялась для межпланетных исследований. В 1971–1972 годах американцы с помощью интерферометра наблюдали за перемещениями астронавтов по поверхности Луны.

В 1985 году глобальная сеть из 20 антенн следила за дрейфом двух советских аэростатов «Вега» в атмосфере Венеры. Это позволило уточнить характер воздушных течений на планете. 14 января 2005 года европейские и американские РСДБ-сети измеряли траекторию спуска зонда «Гюйгенс» в атмосфере спутника Сатурна — Титана.

РСДБ-антенны используются для точного определения координат межпланетных и высокоаппетитных космических аппаратов. В перспективе планируется использовать РСДБ для непосредственного определения координат и орбит навигационных спутников. Это резко упростит их привязку к фундаментальной системе координат, определяемой по наблюдениям квазаров.



# Силы, влияющие на вращение Земли





## Рабочие моменты

Осенью 1969 года для подготовки к первому международному РСДБ-эксперименту американские астрономы из обсерватории «Джодрелл Бэнк» везли в Крым рубидиевые атомные часы во включенном состоянии. Это был единственный способ с необходимой точностью синхронизировать время между антеннами. Но на полпути из Москвы, где-то в районе Харькова, часы остановились — не хватило аккумулятора. Пришлось срочно выписывать вторые атомные часы, на этот раз поближе, из Швеции.

Вращение Земли не совсем равномерно. Изменяется как скорость, так и расположение оси, которая постоянно немного «вихляется». Это связано со многими факторами: влиянием других космических объектов, атмосферными явлениями, процессами, идущими в земной коре и мантии, топографией земного ядра. Технология РСДБ позволяет изучать многие из этих явлений

Бэнк». Однако первые радиоинтерферометрические сеансы провели в 1967 году американцы, а затем независимо от них канадцы.

На следующий год Национальная радиоастрономическая обсерватория США предложила советским ученым совместно развивать РСДБ. Первые межконтинентальные наблюдения состоялись в 1969 году, и вскоре они обеспечили совершенно фантастическое разрешение — около 0,1 угловой миллисекунды, в тысячу раз более высокое, чем доступно оптическим инструментам.

Среди первых объектов РСДБ-наблюдений были так называемые квазизвездные радиоисточники, квазары. Природа их была тогда неясна. Они выглядели точечными, как звезды, отсюда и их название. Но большие красные смещения говорили, что они с колоссальной скоростью от нас удаляются. Если это следствие расширения Вселенной, то квазары должны находиться на огромных расстояниях и иметь невероятную мощность излучения. Согласно альтернативной гипотезе, они выброшены из нашей Галактики, находятся не так далеко и излучают не так мощно.

РСДБ-наблюдения выявили у квазаров сложную внутреннюю структуру, а в ней — движущиеся детали. Теперь мы знаем, что это активные ядра очень далеких галактик со сверхмассивными черными дырами, на которые падает вещество. При падении оно разогревается газодинамическим трением до миллионов градусов, порождает мощное излучение и струи плазмы — джеты, — летящие с околосветовыми скоростями.

Поначалу интерес к РСДБ проявляли именно астрофизики, которые получили невероятно детальные радиоизображения. Их разрешение ограничивалось лишь расстоянием между антеннами, которое могло достигать размеров земного шара. Но очень скоро новый метод заинтересовал специалистов по астрометрии и геодезии. А в наше время построенная на базе РСДБ фундаментальная система координат лежит в основе всей спутниковой навигации.

## НАВИГАЦИЯ ПО КВАЗАРАМ

Раньше геодезисты определяли координаты обсерваторий по звездам, а астрономы измеряли положения звезд, опираясь на известные координаты обсерваторий. Проблема курицы и яйца? Вытаскивание самого себя за волосы? Не совсем, если знать, что стабильнее — фундамент под телескопом или положение звезд на небе. В древности полагались на звезды. Потом обнаружили их движение и стали держаться за Землю. Но точность возросла, и оказалось, что и Земля тоже вращается нестабильно.

Иногда к последней минуте полугодия добавляется 61-я «високосная» секунда, которая учитывает набежавшее отклонение реального вращения Земли от теоретического

## ГЕОФИЗИКА

### Телескоп для ядра Земли

В середине 1960-х годов теория дрейфа континентов, выдвинутая Альфредом Вегенером в 1912 году, в одночасье превратилась из маргинальной гипотезы в научный мейнстрим. Вот только советскую науку этот мейнстрим обошел стороной. Ситуация скорректировалась лишь к началу 1980-х годов и во многом благодаря РСДБ.

Дело в том, что радиоинтерферометрия позволяет с высочайшей точностью определять положение на Земле приемных антенн. Континенты дрейфуют всего на несколько сантиметров в год. Но при систематических РСДБ-наблюдениях можно обеспечить миллиметровую погрешность координат. Именно так в 1980-х годах была измерена скорость удаления Американского континента от Европейского. Сегодня, когда около более полусотни РСДБ-антенн работает на всех континентах, даже в Антарктиде, скорость дрейфа большинства литосферных плит измерена с высокой точностью.

Положение антенн, участвующих в наблюдениях, отражает далеко не только дрейф континентов, но и множество других процессов. Это и ежедневные колебания земной коры из-за так называемых твердотельных приливов, и неравномерность вращения Земли, и циркуляция магмы в глубинах планеты, и даже влияние неровностей рельефа земного ядра. Оказалось, что данные РСДБ дают возможность изучать многие из этих эффектов.

Так метод астрофизических наблюдений, разработанный для изучения самых далеких объектов Вселенной, неожиданно стал ценным средством геофизических исследований, позволяющим заглянуть даже в центр Земли.



равномерного. Необходимость введения «лишней» секунды в конечном счете определяется по РСДБ-наблюдениям. Казалось бы, секундой больше, секундой меньше — это же не с зимнего на летнее время переходить. Но авиалайнер за секунду пролетает 250 метров, а навигационный спутник — четыре километра. Если бы параметры вращения Земли не отслеживались по данным РСДБ с сантиметровой точностью, о спутниковой навигации в городских пробках можно было бы забыть.

Орбиты самих навигационных спутников *GPS* и ГЛОНАСС, которые служат определению координат объектов на Земле, постоянно меняются. Влияние тяготения Луны, Солнца и планет еще можно предвычислить, но есть и негравитационные факторы — сопротивление атмосферы Земли, простирающейся до спутниковых орбит, воздействие геомагнитного поля, солнечного ветра, дегазация и тепловое излучение самих аппаратов. Орбиты навигационных спутников приходится постоянно уточнять. Делается это путем определения расстояний от спутников до опорных станций *GPS*-сети. Но ведь сами эти станции располагаются на колеблющейся поверхности неравномерно вращающейся планеты. К чему привязаны они? Надежной опорой теперь служат квазары, находящиеся на космологических расстояниях и потому не меняющие своего положения на небе. РСДБ-наблюдения квазаров положены в основу фундаментальной системы координат, к которой привязываются все остальные координатные и навигационные службы. Опорные пункты *GPS* и станции лазерной локации спутников рекомендуется ставить рядом с радиотелескопами. Причем, что немного забавно, их взаимное расположение до сих пор измеряют по старинке с помощью переносного угломерного прибора теодолита, бетонных столбиков и цветных маркеров, нанесенных на антенны.

Но и по неподвижным квазарам построить высокоточную систему координат совсем не просто. Про движения земной коры и неравномерности вращения планеты уже сказано. Но приходится также учитывать ионосферную задержку радиосигнала, зависящую от солнечной активности, и преломление радиоволн в атмосфере, зависящее от ее давления, температуры и влажности. И даже еще не достигнув Земли, волновой фронт искажается под влиянием гравитационных полей Солнца, Луны и планет, так что в РСДБ-наблюдениях учитываются и эффекты общей теории относительности Эйнштейна. Без учета искривления пространства-времени навигатор в вашем смартфоне не работал бы так точно. Трудно вообразить, сколь далекие небесные тела содействуют определению ваших координат на Земле. Они вычисляются по положению навигационных спутников, спутники привязаны к опорным станциям на Земле, а станции — через радиотелескопы — к квазарам, сияющим в миллиардах световых лет от нашей планеты. Благодаря системе РСДБ именно они сегодня являются фундаментом всех координатных задач.

Из истории физики и астрономии известно, что повышение точности измерения любой величины на порядок часто приводит к новым неожиданным открытиям. Радиointерферометрия со сверхдлинной базой — самый прецизионный из существующих методов определения координат на небе и на Земле. За полвека, которые прошли с его изобретения, погрешность измерения углов уменьшилась на 3–4 порядка, а вынос радиоантенн в космос и повышение частоты, на которой ведется работа, позволят в будущем увеличить точность еще на 1–2 порядка. Благодаря технологии РСДБ удалось не только создать точные системы спутникового геопозиционирования, но и пронаблюдать эффект галактической абберации, связанный с вращением нашей Солнечной системы вокруг центра Галактики, изучить явления, происходящие в земной коре. Наконец, радиointерферометрия используется в межпланетных исследованиях. С такой измерительной методикой движения материков и даже галактик становятся столь же отчетливыми, как движения планет и звезд для астрономов прежних поколений. 🌐

#### АСТРОФИЗИКА

### Галактическая абберация

В 1725 году английский астроном Джеймс Брайлей экспериментально доказал, что Земля обращается вокруг Солнца. Он, правда, не сомневался в этом факте и наоборот хотел им воспользоваться, чтобы измерить расстояние до звезд по их параллактическому смещению при наблюдении с разных краев земной орбиты.

Но измеренное им смещение не соответствовало расчетному и было одинаковым для всех звезд. Это явление, получившее название звездной, или годичной, абберации, связано с тем, что свет звезд регистрируется на Земле, вектор скорости движения которой вокруг Солнца постоянно меняется, и вместе с ним меняется угол, под которым к нам приходят лучи звездного света. Скорость Земли в 10 000 раз меньше световой, чему соответствует изменение угла наклона световых лучей в 20 угловых секунд — величина годичной абберации. Ее измерение стало первым наблюдательным подтверждением теории Коперника.

И вот три века спустя ситуация повторилась. Оказалось, что координаты квазаров, измеряемые методом РСДБ, медленно дрейфуют. Анализ, выполненный сотрудником службы *Geoscience Australia* Олегом Титовым совместно с французскими коллегами, показал, что дело тут тоже в изменении скорости движения наблюдателя, но только не вокруг Солнца, а вокруг центра Галактики.

Полный оборот вокруг нее — галактический год — занимает около 200 миллионов лет, но благодаря поразительной точности РСДБ-наблюдений для выявления эффекта галактической абберации хватило всего пары десятков лет наблюдений. Это все равно, как если бы Брайлей открыл свой эффект, взглянув в телескоп на три секунды.