

ИСТОРИЯ ВЫБОРА ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ КООРДИНАТ В РОССИИ

Левитская Т.И.

Уральский федеральный университет,
г. Екатеринбург
t.i.levitskaya@urfu.ru

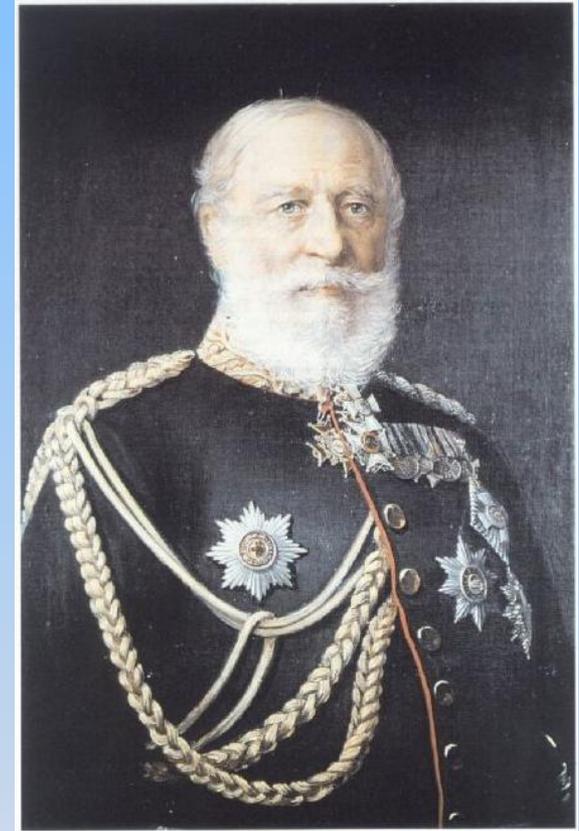
Астрометрическая конференция , Пулково, 2015 г.

Проблема создания единой координатной основы

Эта проблема является одной из важнейших задач геодезии. Она может решаться для всей Земли в целом или в пределах одного государства, а может и для небольшого локального участка земной поверхности. Выбор системы координат заключается в решении двух задач: в фиксировании начала системы координат и в способах определения в этой системе координат интересующих нас объектов. Местоположение вновь создаваемых определяемых пунктов получают относительно исходных пунктов опорной геодезической сети, находящихся в данном районе.

Начиная с XVI – XVII вв., основными задачами и направлениями геодезии являлись следующие: установление систем координат, единицы длины и переход к сплошной координатизации пространства с использованием принципа «от общего к частному». В XIX в. начинается применение геодезических сетей в виде сети треугольников, необходимых для обоснования топографических съемок, а также и для координатизации окружающего пространства путем формирования систем координат. Основной проблемой геодезии этого периода стал вопрос создания опорных геодезических сетей с целью получения единой системы координат всего окружающего пространства и определение в принятой системе координат положения пунктов на земной поверхности.

Создание опорных триангуляционных сетей на территориях ряда стран Европы было сделано к 1864 году. Объединение национальных европейских триангуляций в единую сеть происходило под контролем созданной для этой цели организации под названием «Среднеевропейские градусные измерения». В этой организации видная роль принадлежала известному немецкому геодезисту И.Я. Байеру . К концу XIX в. почти вся поверхность Европы покрылась сплошной сетью триангуляции. Длины 90 базисов сети были измерены с относительной ошибкой 2×10^{-6} , точность измерения углов составляла 0,3 – 2,0". В эту сеть был включен и ряд триангуляции, проложенный в России по параллели до Орска .



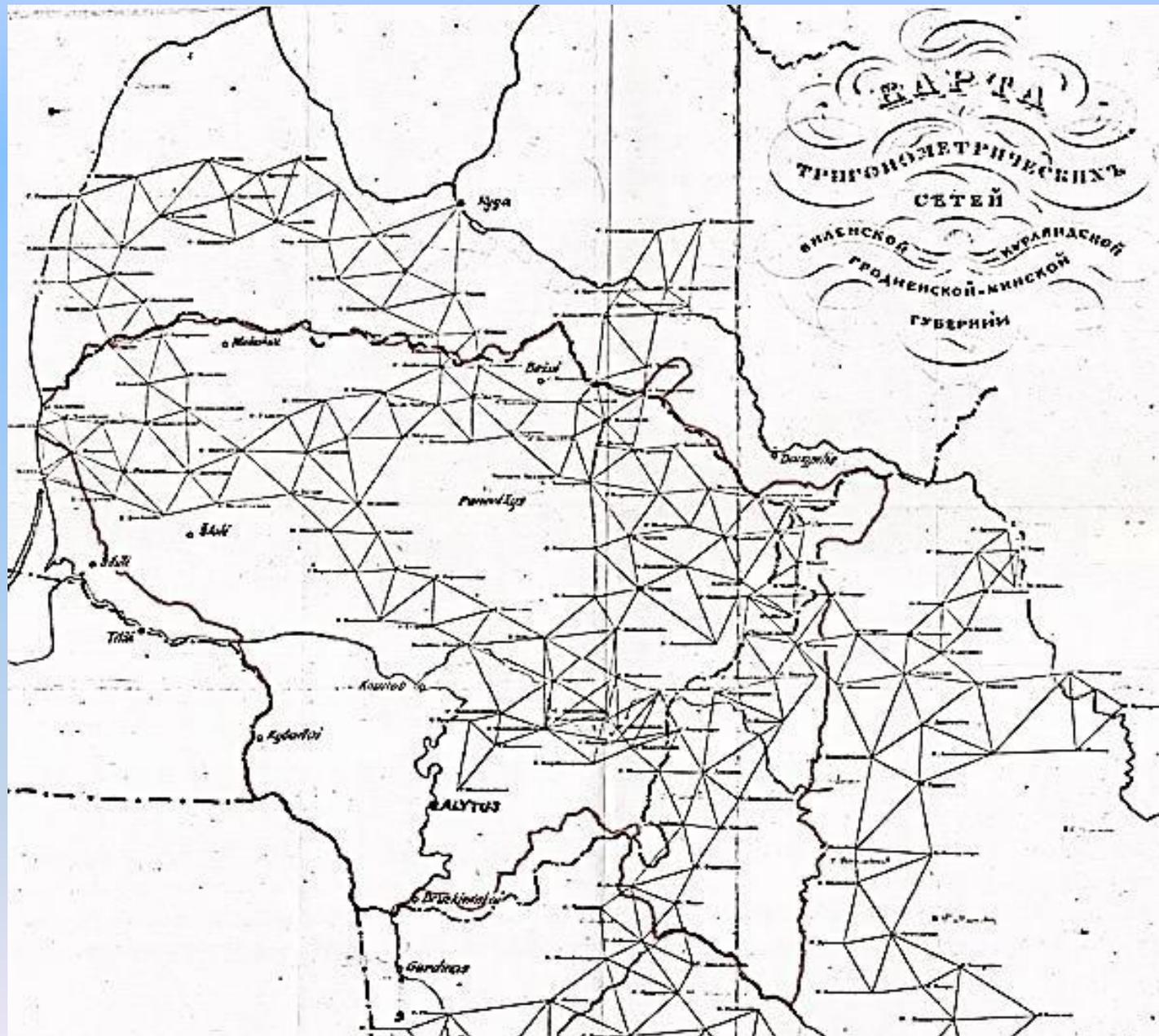
И.Я. Байер (1794 – 1885 гг.)

Триангуляционные работы в России в XIX-XX вв.

История создания в нашей стране единой системы координат начинается с 1808 г., когда профессор астрономии Московского университета Х.В. Гольдбах (1763 - 1811 гг.) и геодезист Депо карт Л. Панснер приступили к созданию триангуляции в Московской губернии. С 1816 по 1821 гг. генерал от инфантерии, почетный член Петербургской академии наук К.И. Теннер начинает триангуляционные работы в Виленской губернии с высокой точностью и последующей обработкой. Геодезические сигналы, заложенные геодезистами под руководством Теннера, оказались устойчивыми и долговечными в период всего XIX в. При смыкании в 1830 г. триангуляции Теннера с прусской триангуляцией Бесселя величина относительного расхождения для общих сторон не превышала 1:200000.



К.И. Теннер (1783-
1860 гг.)



Триангуляция Теннера в Виленской губернии в 1816-1821 гг.

С 1816 по 1831 гг. под руководством академика Петербургской академии наук, профессора Дерптского университета В.Я. Струве начались градусные измерения в Прибалтийских губерниях России. В 1830 г. триангуляции К.И. Теннера и В.Я. Струве были соединены, они представляли русское градусное измерение по дуге меридиана протяженностью в 8° . Позднее усилиями В.Я. Струве и К.И. Теннера, под их руководством был проложен триангуляционный ряд длиной $25^\circ 20'$. Эта дуга прошла по территории России, а также Финляндии, Швеции и Норвегии от побережья Северного Ледовитого океана до устья Дуная. Это знаменитое градусное построение вошло в историю одних из первых коллективных геодезических работ как дуга Струве-Теннера, как Русско-Скандинавское градусное измерение. Точность измерения углов при выполнении триангуляционных работ под руководством В.Я. Струве и при его непосредственном участии была очень высокой и составляла $0,6''$. В 1823 г. В.Я. Струве для измерения углов предложил способ круговых приемов.



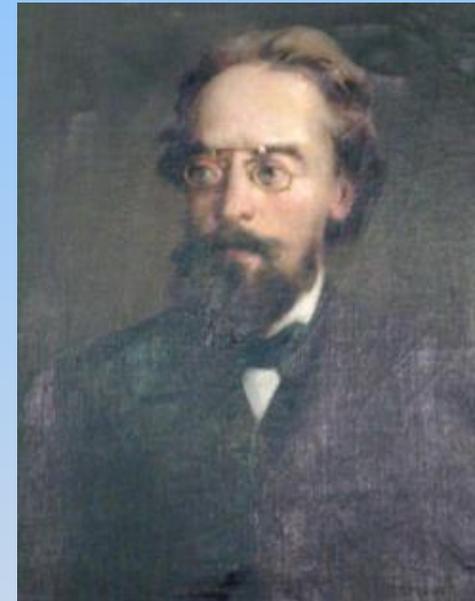
В.Я. Струве
(1793-1864 гг.)

Геодезическая дуга
Струве-Теннера –
мировое наследие
ЮНЕСКО



Применение плоских прямоугольных координат в России

Начиная с 1910 г., в России впервые находят широкое применение плоские прямоугольные координаты. Их введение особенно было актуальным в маркшейдерской практике. Инициатором обоснования общих систем координат для горнодобывающей промышленности был профессор Петербургского горного института В.И. Бауман. В 1897 г. он впервые в России в своей диссертационной работе «О выборе системы координат» изложил необходимость введения общих систем координат для территорий, на которых производится добыча полезных ископаемых. В 1910-1917 гг. В.И. Бауман свои идеи воплотил на практике при создании триангуляции Донбасса. Под его непосредственным участием и руководством была создана сеть триангуляции I, II класса и III класса. Эта сеть покрывала почти всю территорию Донбасса.



В.И. Бауман
(1867-1923 гг.)

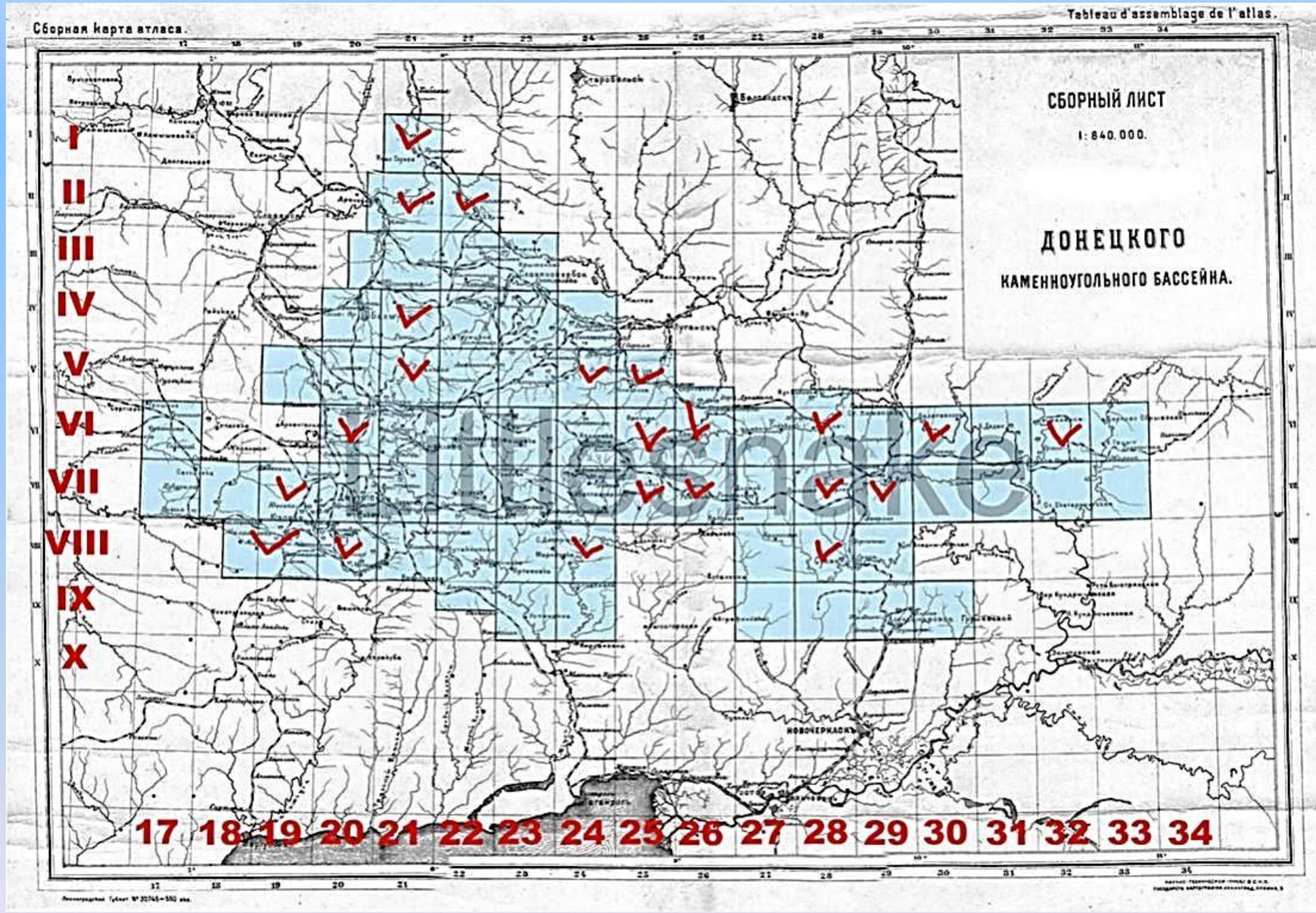
СБОРНЫЙ ЛИСТ

1: 640.000.

ДОНЕЦКОГО
КАМЕННОУГОЛЬНОГО БАСЕЙНА.

I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII
IX
X

17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34



Карта-верстовка Донецкого каменноугольного бассейна (1907-1926 гг.)

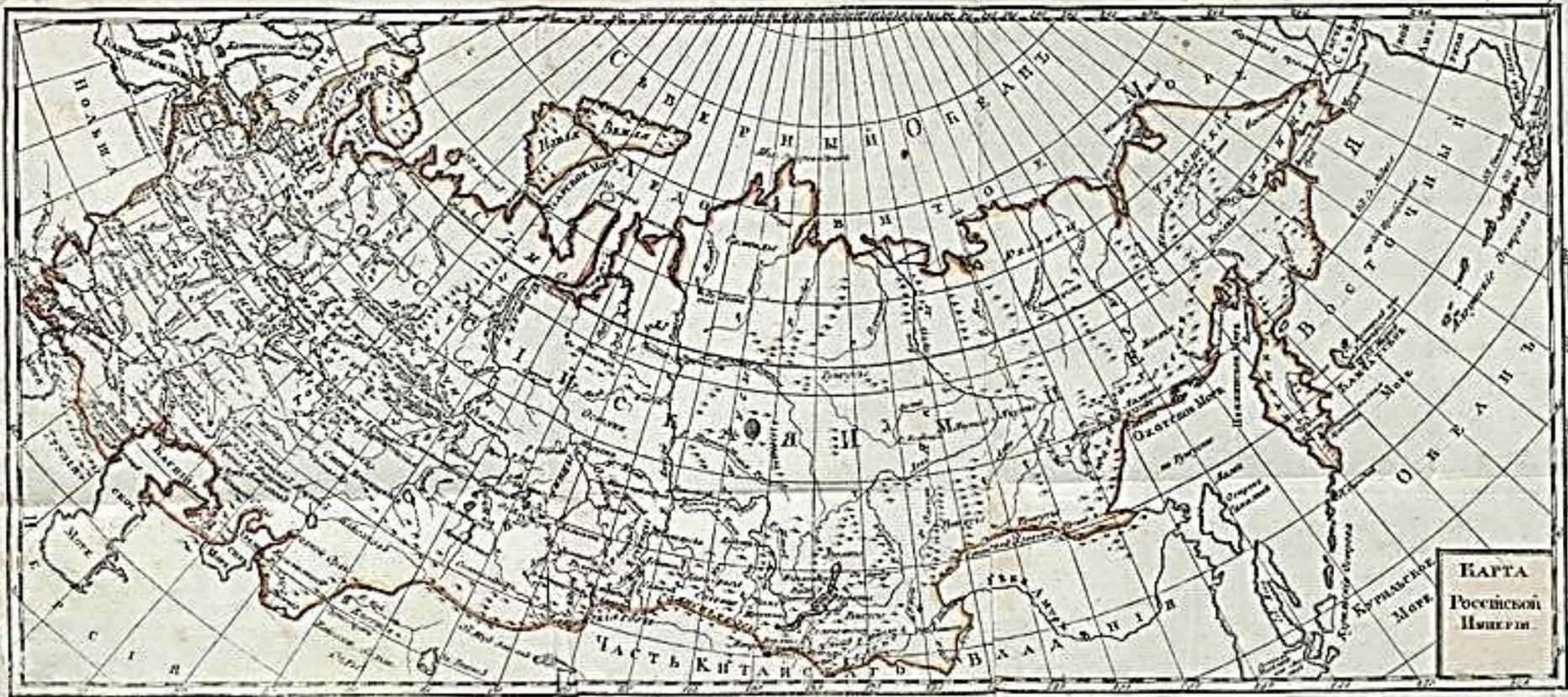
Геодезическое обеспечение России с середины XIX - начала XX вв.

В течение почти ста лет происходило совершенствование существующего геодезического обеспечения нашей страны. В XIX - начале XX вв. в России под руководством шефа Корпуса Военных топографов, генерала И.И. Померанцева была разработана первая программа построения единой государственной геодезической сети (ГГС) на всю территорию России. По этой программе планировалось построить в России систему замкнутых полигонов из звеньев триангуляции, расположенных вдоль меридианов и параллелей, периметром около 1,5 тыс. км. К 1910 г. была составлена первая инструкция по построению государственных геодезических сетей и к 1917 г. было построено только два полигона, измерено 4 базиса, построено 152 геодезических знака и выполнены измерения на 129 пунктах.

На территорию России была создана 100-верстовая топографическая карта (100 верст в одном дюйме), (1 верста = 1066,8 м, 1 дюйм = 25,4 мм). Эта карта в метрической системе единиц соответствовала масштабу 1: 4 200000.



И.И. Померанцев
(1847-1921 гг.)



Дореволюционные карты России, последняя версия

Системы координат, применяемые в России

Исторически сложилось так, что координаты точек на поверхности Земли вычислялись в определенной системе координат. В нашей стране до 1940 г. координаты пунктов получались в нескольких, не связанных между собой системах координат. В Пулковской системе координат 1932 г. вычислялись координаты точек на земной поверхности в Европейской части страны, в Западной Сибири и в Казахстане. Для определения координат пунктов Восточной Сибири и Дальнего Востока использовалась Свободненская система, в Средней Азии – Ташкентская, на Камчатке – Петропавловская СК 1936, в Калымо-Индибирском районе – Магаданская система координат 1932 г.

Во всех перечисленных системах координат был принят эллипсоид Бесселя (1841 г.), основные параметры которого $a = 6\,377\,397$ м, $\alpha = 1:299.15$.

Абсолютные высоты точек определялись от разных уровенных поверхностей, совпадающих с уровнем Балтийского, Черного, Каспийского, Охотского и Японского морей. В связи с этим возникали определенные проблемы при производстве всех видов геодезических работ.

Актуальной научной задачей геодезии в 30-х годах XX в. стала задача вывода размеров нового эллипсоида, поверхность которого наилучшим образом аппроксимировала территорию нашей страны, а также создание единой системы координат.

Система координат СК-32 (Пулковская)

В 1928 г. Главным геодезическим управлением СССР была утверждена единая схема и программа развития государственной триангуляции страны, предложенная Ф.Н. Красовским. По программе Красовского передача координат на большие расстояния должна была осуществляться построением вдоль меридианов и параллелей звеньев триангуляции 1 класса, образующих при взаимном пересечении полигоны 1 класса периметром порядка 800 – 1200 км. Длина сторон треугольников триангуляции 1 класса от 20 до 30 км. В качестве единой картографической проекции для редуцирования поверхности эллипсоида на плоскость и вычисления плоских прямоугольных координат была принята в 1928 г. по предложению профессора Н.Г. Келля и профессора В.В. Каврайского равноугольная картографическая проекция Гаусса-Крюгера. При уравнивании полигонов в 1930-1932 гг. был использован эллипсоид Бесселя, ориентированный относительно геоида по астрономическим данным в Пулкове и метод развертывания.

Сущность метода развертывания заключается в том, что результаты измерений, выполненные на земной поверхности и редуцированные к уровню моря, при дальнейшей обработке считались выполненными на поверхности референц-эллипсоида без каких либо поправок за несовпадение поверхности эллипсоида и уровенной поверхности нулевой высоты.

В 1932 г. уравнивание было завершено, новая система координат получила название системы 1932 года (СК-32). Таким образом, появилась так называемая Пулковская система координат 1932 г., которая довольно быстро распространилась на всю европейскую территорию СССР, Западную Сибирь (до Красноярска), Казахстан и Среднюю Азию. Начальным пунктом в СК-32 являлся центр круглого зала Пулковской обсерватории, астрономические координаты которого были приравнены геодезическим координатам:

$$\begin{aligned}\varphi_0 &= B_0 = 59^\circ 46' 18'',71, \\ \lambda_0 &= L_0 = 30^\circ 19' 38'',55.\end{aligned}$$

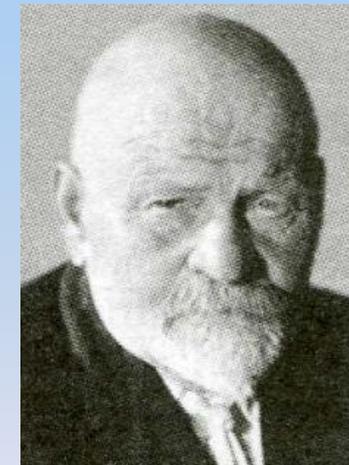
Исходным был принят астрономический азимут с пункта Саблино на пункт Бугры Саблинской базисной сети, приравненный геодезическому азимуту этой же стороны:

$$\alpha_0 = A_0 = 317^\circ 02' 50'',63.$$

Отступление геоида от поверхности референц-эллипсоида по высоте в Пулкове было принято равным нулю.



Ф.Н. Красовский
(1878-1948 гг.)



Н.Г. Келль
(1883-1965 гг.)



Начальный пункт СК-32 - центр круглого зала Пулковской обсерватории

Свободненская система геодезических координат

С 1934 г. на огромной территории восточно-сибирских и дальневосточных областей начались работы по созданию изолированной астрономо-геодезической сети. Для обработки этой сети была принята так называемая Свободненская система геодезических координат, в которой был также принят эллипсоид Бесселя. Начальным пунктом был выбран пункт Черниговский (близ г. Свободный), астрономические координаты которого были приравнены его геодезическим:

$$\begin{aligned}\varphi_0 &= B_0 = 51^\circ 25' 36'',55, \\ \lambda_0 &= L_0 = 128^\circ 11' 34'',77.\end{aligned}$$

В качестве начального был взят астрономический азимут с пункта Черниговский на пункт Гащенский, приравненный геодезическому азимуту этой же стороны:

$$\alpha_0 = A_0 = 34^\circ 21' 50'',56.$$

Высота геоида над референц-эллипсоидом в пункте Черниговском в Свободненской системе координат была принята равной нулю. Эта система координат дала возможность заменить применявшиеся ранее в Сибири и на Дальнем Востоке следующие системы координат: Манчжурскую, Хабаровскую, Алданскую и др.

Сравнение Пулковской и Свободненской систем геодезических координат

В 1936 г. вблизи Красноярска были соединены астрономо-геодезические сети Пулковской и Свободненской систем координат и выполнено сравнение координат одних и тех же пунктов, вычисленных в обеих системах. В положении пунктов были получены следующие невязки:

$$x_{\text{Пулковск.}} - x_{\text{Свободн.}} = - 270 \text{ м},$$

$$y_{\text{Пулковск.}} - y_{\text{Свободн.}} = + 790 \text{ м}.$$

Расхождения получились значительными. Их нельзя было объяснить лишь влиянием случайных ошибок при производстве астрономо-геодезических измерений. Были выдвинуты две причины появления больших значений невязок:

- 1) Несоответствие параметров эллипсоида Бесселя действительным размерам Земли. Как было показано позднее, размер его большой полуоси был ошибочен на 848 м по сравнению с размерами большой полуоси эллипсоида Красовского.
- 2) Ориентировка эллипсоида Бесселя относительно геоида по астрономическим данным была выполнена без учета абсолютных отклонений отвесной линии в Пулкове и пункте Черниговском.

Таким образом, был сделан вывод о том, что Пулковская система координат 1932 года не могла удовлетворить геодезические работы на обширной территории страны. Возникла необходимость вывода размеров нового референц-эллипсоида.

Система геодезических координат 1942 года

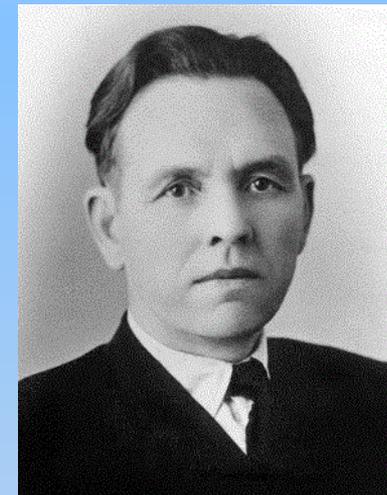
В ЦНИИГАиК в 1940 г. под руководством Ф.Н. Красовского и А.А. Изотова были выведены параметры референц-эллипсоида, наилучшим образом подходящего для территории СССР: большая полуось $a = 6378245,0$ м и экваториальное сжатие $\alpha = 1/298,3$. Эти параметры были приняты для производства всех видов астрономо-геодезических и картографических работ взамен эллипсоида Бесселя. Одновременно проводились работы под руководством М.С. Молоденского по определению высот квазигеоида по данным астрономо-гравиметрического нивелирования.

В результате переуравнивания астрономо-геодезической сети с референц-эллипсоидом Красовского была создана система геодезических координат 1942 года.

Начальным пунктом в системе координат 1942 г. был принят центр круглого зала Пулковской обсерватории, геодезические координаты которого имеют следующие значения:

$$B_0 = 59^{\circ}46'18'',55;$$

$$L_0 = 30^{\circ}19'42'',09.$$



А.А. Изотов
(1907-1988 гг.)



М.С. Молоденский
(1909-1991 гг.)

При установлении системы координат 1942 года в уравнивание вошли 87 полигонов астрономо-геодезической сети, расположенных на большей части Европейской территории СССР, и узкой полосой пунктов, распространяющих их координаты до Дальнего Востока. Обработка выполнялась на эллипсоиде Красовского с использованием метода проектирования. Метод проектирования отличается от метода развертывания тем, что редуцирование данных геодезических измерений с земной поверхности сначала происходит на поверхность уровня моря, а затем на поверхность референц-эллипсоида. **Постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г. № 760 на основе выполненного уравнивания была введена единая система координат и высот на территории СССР – система координат 1942 года (СК – 42).**

Систему координат 1942 года можно считать одним из главных достижений отечественной геодезии. Все последующие системы координат строились на её основании, путем поворотов и сдвигов. Создание классической астрономо-геодезической сети (АГС) на территорию СССР было завершено к началу 80-годов XX века.

В мае 1991 г. было завершено общее уравнивание АГС. Уравненная сеть включала в себя 164 306 пунктов триангуляции и полигонометрии 1-2 классов; 3,6 тысяч геодезических азимутов, 2.8 тысяч базисных сторон, расположенных через 170 – 200 км.

Точность уравнивания можно охарактеризовать величинами следующих ошибок:

- средняя квадратическая ошибка направления составила 0,7";
- средняя квадратическая ошибка измеренного азимута – 1,3";
- относительная ошибка базисных сторон – 1:260000;
- средняя квадратическая ошибка взаимного положения смежных пунктов – 2-4 см;
- средняя квадратическая ошибка передачи координат от исходного пункта на пункты на краях АГС по каждой координате (x, y) – 1 м.

Спутниковые геодезические сети

К началу 90-х годов на территории страны были созданы две спутниковые геодезические сети: космическая геодезическая сеть (КГС) ВТУ ГШ МО (Военно-топографическое управление Генерального Штаба Вооруженных Сил Министерства обороны Российской Федерации) и доплеровская геодезическая сеть (ДГС) ГУГК (Главное управление геодезии и картографии).

Система координат КГС являлась составной частью более широкого набора фундаментальных геодезических параметров, получивших название «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90). Этот шифр получила и сама система координат. **Постановлением Правительства Российской Федерации № 568 от 28 июля 2000 года** геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» установлена в качестве единой государственной системы координат для применения в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач. Спутниковая система ГЛОНАСС работает в системе координат ПЗ-90 и более уточненной версии ПЗ-90.02. Система ДГС строилась в системе координат WGS-84, не совпадающей с системой координат ПЗ-90. Система координат **ПЗ-90.02 принята Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 июня 2007 года № 797-р.** За отсчетную поверхность в системах геодезических параметров ПЗ-90 и уточненной версии ПЗ-90.02 принят общеземной эллипсоид с большой полуосью $a = 6378136$ м и сжатием $\alpha = 1/298,257839303$, полученными по спутниковым измерениям на суше и в Мировом океане.

Система координат 1995 года

В 90-х годов XX в. было выполнено совместное уравнивание АГС, ДГС и КГС. В уравнивании участвовали все пункты КГС, ДГС и общие с ними (совмещенные или близко расположенные и привязанные) пункты АГС с целью распространения государственной системы координат на всю территорию нашей страны.

В результате такого уравнивания была создана геодезическая сеть из 134 опорных пунктов ГГС, расположенных на всей территории страны при среднем расстоянии между смежными пунктами 400-500 км. Предварительно уравненные координаты 134 пунктов переведены в референцную систему, близкую к СК–42. Был выбран следующий вариант формирования референцной системы: направление осей и масштаб референцной системы совпадает с таковыми в упомянутой ранее реализации системы координат ПЗ–90, положение начала системы координат совпадает с координатами начального пункта Пулково, который был также начальным и в СК- 42. Новая референцная система получила название «Система координат 1995 года». В этой системе координат и были получены в заключительном уравнивании координаты всех пунктов АГС. Система координат 1995 года была установлена постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 года № 568. Она предназначалась для производства геодезических и картографических работ на территории России, начиная с 1 июля 2002 года.

Развитие ГГС с использованием спутниковых средств и технологий

В 1999 году Федеральная служба геодезии и картографии приступила к созданию новой ГГС на основе спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

Новая ГГС включает в себя геодезические построения различных классов точности :

- 1) ФАГС – фундаментальную астрономо-геодезическую сеть;
- 2) ВГС – высокоточную геодезическую сеть;
- 3) СГС-1 – спутниковую геодезическую сеть 1 класса;
- 4) астрономо-геодезическую сеть и сети сгущения.

Высшим уровнем в структуре новой ГГС России должна стать ФАГС. Эта сеть будет служить исходной основой для распространения с высокой точностью на территории России общеземной геоцентрической системы координат.

Положение 50 пунктов ФАГС, удаленных один от другого на 650 – 1000 км, определяются методами космической геодезии со среднеквадратической ошибкой не более 10-15 см.

ВГС содержит 300 пунктов, опирающуюся на пункты ФАГС и удаленных один от другого на 150- 300 км . Координаты пунктов ВГС относительно пунктов ФАГС определяются со среднеквадратическими ошибками, равными 1-2 см в плановом положении и 3 см по геодезической высоте.

Третий уровень в структуре новой ГГС занимает спутниковая геодезическая сеть 1 класса. Исходной основой для построения СГС-1 являются ближайшие пункты ФАГС и ВГС. СГС-1 создается по мере необходимости геодезического обеспечения регионов. Расстояния между пунктами СГС-1 составляют 25-35 км. Средние квадратические ошибки определения положения пунктов СГС-1 не должны превышать 1 см по каждой плановой координате и 2 см по геодезической высоте. Спутниковая геодезическая сеть 1 класса содержит в настоящее время около 4500 пунктов.

Основу новой ГСК-2011 составляют перечисленные три уровня геодезических сетей. Одним из главных направлений внедрения ГСК-2011 в систему геодезического обеспечения РФ является развитие ФАГС, ВГС и СГС-1 в целях дальнейшего уточнения ГСК-2011.

В настоящее время широкое применение получили местные системы координат. Местная система координат представляет собой условную систему координат, устанавливаемую в отношении ограниченной территории, не превышающей территорию субъекта Российской Федерации (**постановление Правительства РФ от 3 марта 2007 г. № 139 «Об утверждении правил установления местных систем координат»**).

Местные системы координат устанавливаются для проведения геодезических и топографических работ при инженерных изысканиях, строительстве, межевании земель, ведении кадастра и других специальных работах .

При установлении местных систем координат применяется система плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса-Крюгера, но с произвольным осевым меридианом, проходящим через центральную часть участка или вблизи его с таким расчетом, чтобы можно было пренебречь поправками за редуцирование линий и углов на плоскость этой проекции.

Обязательным требованием при установлении местных систем координат является обеспечение возможности перехода от местной системы координат к государственной системе координат, который осуществляется с использованием параметров перехода (ключей).

Перспективы развития геодезических сетей

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат» утверждены системы координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11. Этим же постановлением ограничивается период применения действующих в настоящее время государственных систем координат СК-42 и СК-95 до 1 января 2017 года.

ГСК-2011 и ПЗ-90.11 являются геоцентрическими экваториальными пространственными системами координат. Они определяют положение точки относительно центра масс Земли, главной отсчетной плоскостью является плоскость экватора.

Геодезическая система координат 2011 года (ГСК-2011) предназначена для использования при осуществлении геодезических и картографических работ и заменит системы координат 1942 г. (СК-42) и 1995 г. (СК-95), в которых созданы и создаются топографические карты в настоящее время. Переход к ГСК-2011 приведет к необходимости пересоздания всех топографических карт, что обусловлено различиями в параметрах применяемых эллипсоидов и их ориентировке.

При этом координаты объектов в СК-42 (СК-95) и новой ГСК -2011 будут отличаться до 100 и более метров. Такие погрешности существенно превышают графическую точность любой топографической карты от масштаба 1 : 200 000 и крупнее. Это и определяет необходимость их переделки.

Основной целью оптимизации государственных карт масштабов 1 : 10 000-1 : 1 000 000 является создание единой унифицированной системы карт двойного применения : для военных и гражданских пользователей. Экономическая целесообразность решения этой задачи не вызывает сомнений и согласуется с Концепцией развития отрасли геодезии и картографии до 2020 г., утвержденную Правительством РФ 10.12.2010 г. № 2378-р, и соответствует основным направлениям проекта Стратегии топографо-геодезического обеспечения Российской Федерации до 2030 года.

Единую систему государственных карт Российской Федерации (ЕСГК РФ) целесообразно рассматривать в виде двух подсистем : подсистема топографических карт масштабов от 1 : 10 000 до 1 : 200 000 и подсистема обзорных карт от 1 : 500 000 до 1 : 4 000 000. Карты масштабов 1 : 500 000 и 1 : 1 000 000 предлагается исключить из состава топографических карт и отнести их к обзорным картам.

В плане реализации идеи создания ЕСГК РФ планируется провести в период 2016 -2017 гг. НИОКР по уточнению всех научно-технических вопросов, связанных с разработкой и созданием ЕГСК РФ, а также с подготовкой проекта программы перехода к этой системе карт, которую необходимо представить в Правительство Российской Федерации.

Общеземная геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) является рабочей системой координат ГЛОНАСС и будет использоваться в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач.

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ !

