

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных условий успешной деятельности судна в море является исключение навигационных происшествий. Степень исключения навигационных происшествий составляет понятие навигационной безопасности плавания, которая обеспечивается комплексом мер, выполняемых судоводительским персоналом при поддержке системы навигационно-гидрографического обеспечения.

Некоторые элементы навигационной безопасности плавания изучаются в дисциплине «Математические основы судовождения» (МОС), являющейся базовой математической дисциплиной для подготовки специалиста-судоводителя и изучения других дисциплин цикла «Судовождение». Изучению МОС предшествуют дисциплины «Математика», «Основы судовождения», «География водных путей». Поэтому обучаемые должны приступать к изучению МОС со знаниями и пониманием основ математики, координат точек на поверхности Земли и основных принципов решения задач на карте с помощью навигационных инструментов.

Поскольку решение любых задач навигации связано с измерением и вычислением, которые сопровождаются погрешностями, то важным является изучение основ экспериментального и теоретического анализа законов распределения случайных погрешностей.

Решение практически любых задач судовождения связано с определением географических координат и представлением их на навигационной карте, а главными практическими приложениями определения координат места судна являются методы решения сферических треугольников для модели Земли, принятой за сферу, и преобразование результатов решения для перехода к земному эллипсоиду.

Методы задания систем координат, определения формы и параметров Земли, взаимного расположения точек на ее поверхности являются предметом высшей геодезии. Форма и размеры Земли вычисляются методом градусных измерений, т. е. определением линейных и угловых размеров дуг географических меридианов и параллелей. Эти результаты используются в математической картографии в качестве исходной основы для составления карт.

Важными задачами навигационного обеспечения безопасности плавания являются вопросы, связанные с выбором и измерением навигационных параметров, расчетом соответствующих им элементов линий положения (ЛП). К главным практическим приложениям определения координат обсервованного места судна (ОМС) относят методы решения систем уравнений линий положения, аналитические и графоаналитические. Отсюда важно понимание принципов решения и графического построения ЛП на карте для получения ОМС при достаточном и избыточном количестве измерений. Для обеспечения безопасности плавания судна важен контроль точности, т. е. оценка влияния погрешностей навигационных параметров на координаты ОМС.

Теоретическим приложением определения координат ОМС по двум и избыточным измерениям навигационных параметров (НП) является метод ЛП, базой для которого служат градиенты изолиний НП. Для этих целей излагаются

метод наименьших квадратов и его приложения при определении координат ОМС, позволяющие компенсировать влияние систематических и случайных погрешностей измерений НП.

Контроль точности, т. е. оценка остаточного влияния погрешностей НП на полученные координаты ОМС, обосновывается с помощью среднего квадратического эллипса (СКЭ) погрешностей и радиальной средней квадратической (РСКП) погрешности. Излагаются выводы аналитических и графоаналитических методов расчета их элементов и построения на карте.

Целью настоящего учебника является рассмотрение отдельных теоретических и практических вопросов теории погрешностей, сферической тригонометрии, геометрии фигуры Земли и картографии, теории определения координат места судна. Основные определения, понятия и термины приводятся на основе требований ГОСТ и международных нормативных документов (на русском и английском языках) и для удобства чтения выделяются. Изложение материала сопровождается множеством иллюстраций, классификационных схем, графиков и таблиц, которые характеризуют изменения различных величин.

*В результате изучения материалов учебника обучаемые должны:*

1) *знать*:

- основы обработки навигационных измерений, экспериментального и теоретического анализа законов распределения и оценки случайных погрешностей;

- методы сферической тригонометрии, геометрии фигуры Земли, решения задачи на сфере и эллипсоиде, планирования плавания судна по ортодромии;

- основы математической картографии, принципы построения картографической сетки равноугольной цилиндрической проекции, гномонической проекции;

- методы определения и оценки точности координат ОМС по двум и избыточным НП;

2) *уметь*:

- осуществлять оценку точности навигационных измерений и расчетов;

- решать задачи судовождения на сфере и эллипсоиде, планировать плавание судна по дуге большого круга;

- определять элементы ЛП, координат ОМС, по двум и избыточным НП и оценки их точности;

3) *владеть*:

- методами обработки измерений НП и оценки их погрешностей;

- методами решения задач судовождения на сфере и эллипсоиде, преобразования координат между различными геодезическими системами;

- методами построения картографических проекций и их применения в судовождении;

- методами определения и оценки точности координат ОМС.

Этапы развития прикладных наук и методов мореплавания приводятся ниже в краткой исторической справке.

Финикийцы за 3000 лет до н. э. уже выходили в Атлантический океан, имея при себе, по имеющимся сведениям, какие-то пособия. Первые попытки представления фигуры Земли и изображения ее поверхности на плоскости засвидетельствованы за 1600 лет до н. э. в исторических памятниках Египта и Греции.

В глубокой древности пытались объяснить закономерности движения небесных светил их расположением на сфере, которая равномерно вращается вокруг центра земного шара, что в качестве методического примера сохраняется и в наше время. Древнегреческий математик и астроном Евдокс Книдский (408–355 гг. до н. э.) разложил наблюдаемые движения небесных светил с помощью 27 концентрических сфер, вращающихся вокруг центра Земли.

Из потребностей астрономии возникла и развивалась сферическая тригонометрия, частью которой она была первоначально. Дальнейшим стимулом ее развития являются запросы геодезии, картографии, мореплавания.

Шарообразность (сферообразность) Земли была открыта в VII–V в. до н. э. Честь этого открытия приписывается халдеям, а также знаменитому греческому математику и философу Пифагору Самосскому<sup>1)</sup> (570–500 гг. до н. э.). Некоторые считают это открытием Парменида из Элеи (570–500 гг. до н. э.), хотя имеются основания полагать, что еще юный Демокрит из г. Абдера (Фракия) (470–460 гг. до н. э.) не знал истинной формы Земли. В VI в. до н. э. Эвпалин построил на о. Самос водопровод для царя Поликрата, решив при этом сложную геодезическую задачу проходки тоннеля через гору Кастро с двух сторон с погрешностью 10 м по горизонтали и 3 м по вертикали на расстоянии 1 км.

Аристотель (384–322 гг. до н. э.) приводил доказательство шарообразности Земли по круглой тени, отбрасываемой Землей на поверхность Луны во время затмений. Аристарх Самосский (IV–III в. до н. э.), древнегреческий астроном, предшественник Н. Коперника по созданию гелиоцентрической системы мироздания, написал труд «Расстояния и размеры Солнца и Луны», в котором определяются отношения между радиусами и расстояниями этих тел. Хранитель знаменитой Александрийской библиотеки, древнегреческий ученый Эратосфен Киренский (276–194 гг. до н. э.) произвел измерения окружности Земли на основе геометрических принципов, получивших название градусных измерений, оставшиеся непревзойденными на протяжении двух тысячелетий.

Древнейшей картографической проекцией считается центральная, применение которой для звездного неба приписывается древнегреческому мыслителю Фалесу из Милета (625–547 гг. до н. э.). По преданию, Фалес предсказал солнечное затмение и умел измерять расстояние от судна, находящегося в море, до берега на основе геометрических построений. Анаксимандру (610–547 гг. до н. э.), ученику Фалеса, по свидетельству Страбона (64/63 г. до н. э. – 23/24 г. н. э.), древнегреческого историка и географа, мы обязаны составлением первой карты земной поверхности в прямоугольной проекции.

Древнегреческий астроном Гиппарх (около 190–125 гг. до н. э.) ввел неравномерность в движении небесных светил в своем трактате «Феномена». Одним

---

<sup>1)</sup> Полные имена здесь и далее приводятся по данным: Советский энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. – 4-е изд. – М. : Сов. энциклопедия, 1988. – 1600 с.

из первых он положил начало учению о сфере, рассмотрев замечательные точки и круги небесной сферы, а также составив таблицы синусов дуг и хорд, необходимых для расчетов на сфере.

Изобретателями картографических проекций считаются: простой цилиндрической — Эратосфен, ортографической — Аполлоний Пергский (260–170 гг. до н. э.), простой конической и стереографической — Гиппарх (180–125 гг. до н. э.).

Менелай Александрийский (I–II вв. н. э.) в своих книгах «О вычислении хорд» и «Сферика» рассмотрел предмет сферической тригонометрии и соотношения сторон и углов сферических треугольников. Затем знаменитый александрийский астроном Клавдий Птолемей (около 90–150 гг. н. э.), создатель геоцентрической системы мира, в своем сочинении, которое в переводе с древнегреческого языка на русский должно было называться «Большой трактат астрономии», получил важные формулы сферической тригонометрии. Это сочинение называли также «Великое построение», «Великая система», «Величайшая система». При переводе с греческого языка на арабский язык, а затем с арабского языка на латинский название было искажено и теперь известно как «Альмагест», не имеющее смысла.

Птолемеем был написан капитальный труд «География», включавший описание способов создания карт, глобусов и определения размеров Земли, а также построения картографических проекций. Он усовершенствовал простую коническую проекцию, изобрел проекцию, называемую теперь проекцией Бонне, и равнопромежуточную проекцию сферы. Им дано первое схематическое изображение на карте мира Уральских хребтов под названием Гиперборейских гор. Эти работы послужили основой при создании в VII в. «Армянской географии», включавшей ряд карт. Предполагается, что существовали морские карты, созданные Марином Тирским (II в.).

Тригонометрия хорд александрийских астрономов получила известность в Индии, а затем у ученых арабоязычных стран. Индийский ученый Варахамихра (V–VI вв. н. э.) заменил в сочинении «Пять сиддхانت» хорды полухордами, т. е. линиями синуса. Работавший в Багдаде математик Сабит ибн Корра (836–901 гг.) в «Книге о часовом инструменте, называемом солнечными часами» дал два правила решения задачи об определении высоты Солнца над горизонтом в зависимости от широты местности, склонения Солнца и его часового угла. В современных обозначениях это правило эквивалентно теореме косинусов сферической тригонометрии. В Средние века индийским математиком и астрономом Брахмагуптой (598–660 гг.) даются первые представления о сферичности Земли. Эти правила вслед за Ибн Коррой приводились багдадским математиком ал-Баттани (850–929 гг.) в трактате «О движении звезд», среднеазиатским ученым-энциклопедистом из Хорезма Абу Рейханом Мухаммедом ибн Ахмедом аль-Бируни (973–1050 гг.) — в «Каноне Мас'уда», описывающем Землю сферой с радиусом 6339,58 км, близким к современным представлениям, а также круговую (глоблярную) проекцию. К этой же теореме сводились правила определения расстояния между двумя пунктами на земной поверхности с данными географическими координатами (ортодромии). Эти ученые пользуются тригонометрическими функциями синуса, тангенса, у них также встречается правило, эквивалентное второй важной теореме — сферической теореме синусов.

Основываясь на теореме Птолемея из «Альмагеста», греческого ученого Теона Александрийского (вторая половина IV в.) — отца знаменитой женщины-математика Гипатии — «При постоянном приросте аргументов разности синусов убывают», арабский астроном Абу-л-Вафа ал-Бузджани (940–988 гг.) усовершенствовал приемы вычислений синусов и тангенсов с точностью до  $10^{-8}$ . Он дал доказательство теоремы тангенсов для прямоугольного сферического треугольника, а также одно из первых доказательств сферической теоремы синусов.

В это время появляются так называемые монастырские карты, отражающие религиозные представления об устройстве мира, астрономом Абу-Ар Рахман ас-Суфи (903–986 гг.) создаются глобусы звездного неба.

Славянские племена — русы — в начале VII в. совершили ряд походов в Средиземное море, на Крит (623 г.), и с десантом для осады Константинополя (626 г.). В VIII–IX вв. начал использоваться великий водный путь «из варяг в греки» — от берегов Скандинавии через Финский залив, Неву, Ладожское озеро, по Волхову на Новгород, по озеру Ильмень и Ловати, затем волоками на Западную Двину и Днепр с переходом через Днепровский порог, затем вдоль берега Черного моря до Константинополя. Началось освоение Студеного моря (Ледовитого океана), к нему спускались по Северной Двине и Оби.

Арабский путешественник и географ Идриси (1100–1165 гг.), по поручению сицилийского короля Рожера II, создал «Книгу Рожера», или сочинение «Развлечение тоскующего о странствии по областям», с приложением карт на 70 листах, среди них карты районов Урала и Зауралья.

Определенный вклад в тригонометрию был сделан испано-арабским математиком Джабиром ибн Афлахом (латинское имя Гебер), работавшим в Севилье в середине XII в. Он впервые в Европе получил решение сферического треугольника по данному катету и противолежащему углу. Сферические треугольники излагаются как самостоятельная научная дисциплина азербайджанским математиком Насиром ад-Дива ат-Туси (1201–1274 гг.) в «Снятии покрывала с тайн фигуры секущих», или «Трактате о полном четырехстороннике». Он решает задачу об определении сторон сферического треугольника по трем его углам, пользуясь построением полярного треугольника.

После появления магнитного компаса появились ценные пособия — портоланы, представляющие собой карты-лоции, точная дата их создания не установлена. К концу XI в. карты, полученные на основе наблюдений с помощью магнитной стрелки, достигли значительного развития. К концу XII в. появились морские карты, а к началу XIII в. совершается морская съемка побережья Средиземного моря. Таковы были «Пизанская карта» и портолан (1311–1320 гг.), приписываемые венецианскому ученому М. Сануте, но использовавшиеся генуэзцем Петром Висконти.

Для изображения морского побережья на портоланах применялась, как правило, квадратная цилиндрическая равнопромежуточная проекция, известная еще Эратосфену, но называвшаяся проекцией Генриха Мореплавателя в честь португальского принца Энрике (Генриха, 1394–1460 гг.), который не совершал долгих плаваний, но содействовал развитию мореплавания. Вероятно, русские чертежи портоланов использовал Фра Мауре для изображения Каспийского моря на своей карте (1459 г.).

Первыми из европейских математиков вопросами сферической тригонометрии занимались Георг Пурбах (1423–1461 гг.) и его ученик Иоганн Мюллер (Региомонтан) (1436–1476 гг.). Главные интересы Региомонтана и его учителя были сосредоточены на исправлении перевода «Альмагеста» с максимальным приближением его к греческому оригиналу и подготовке текста этого сочинения под названием «Эпитома», которое было впервые напечатано в 1496 г., через 20 лет после смерти Региомонтана. Пурбах вывел некоторые формулы для решения сферических треугольников и вычислил новую таблицу синусов через  $10'$  угла. В третьей и четвертой книгах «Пяти книг о различного рода треугольниках» Региомонтан излагает сферическую тригонометрию как самостоятельную науку, развивает теоремы синусов и косинусов, рассматривает различные случаи решения сферических треугольников. Им были вычислены таблицы синусов через  $1'$  и тангенсов в десятичном счислении.

Значительный вклад в развитие сферической тригонометрии внес Николай Коперник (1473–1543 гг.). В книге «Об обращении небесных сфер» он дает вывод теорем сферической тригонометрии на использовании трехгранной пирамиды со сферическим основанием и вершиной в центре сферы.

Эпоха Возрождения (XV–XVI вв.) ознаменована выдающимися морскими путешественниками и открытиями венецианского купца Марко Поло (1254–1324 гг.), генуэзца Христофора Колумба, открывшего американский материк (1492–1493 гг.), Васко да Гама (1497–1499 гг.), обогнувшего Африку и достигшего берегов Индии, и многих других. Итальянский врач, математик, астроном и географ П. Тосканелли (1397–1482 гг.) впервые после Птолемея делает попытку составить целую карту земного шара. Эта карта нанесена на самый древний из сохранившихся глобусов, созданный в 1492 г. немецким географом М. Бе-хаймом (1459–1507 гг.). В 1507 г. появилась первая большая самостоятельная карта земного шара с географическим описанием немецкого географа и картографа М. Вальдземюллера. Он почерпнул все свои сведения из описания Америго Веспуччи (1454–1512 гг.), итальянского мореплавателя и картографа.

Среди русских путешественников: «Хождение за три моря» Афанасия Никитина (1466–1472 гг.), тверского купца, посетившего Персию и Индию; «Хождение Трифона Коробейникова» (1602 г.), посетившего по поручению царя Ивана IV Египет; путешествие в Монголию; к берегам Северного Ледовитого океана. В 1553 г. путешествие в Испанию Василия Власова и Дмитрия Герасимова в Норвегию и Данию, огибая Скандинавию.

Художником и ученым Альбрехтом Дюрером (1471–1528 гг.) выполняется гравировка карт Земли и звездного неба, начинают выпускаться печатные карты (1477 г.), в 1483 г. появилось серьезное навигационное пособие французского гидрографа Гариа под названием «Большой путеводитель, лоцманское искусство и исследование морей».

В XVII в. шотландский математик Джон Непер (1550–1617 гг.) вывел свои знаменитые аналогии для определения полусумм и полуразностей углов и сторон. Позже голландский математик, геодезист Снеллиус Виллеброрд (1580–1626 гг.) заново обосновал понятие о полярных сферических треугольниках и доказал ряд теорем о них.

В начале XVI в. применяется стереографическая проекция не только в нормальном (Вальтер Луд, 1507 г.), но также в косом (Н. Вернер, 1514 г.) и поперечном (Гемма Фризиус, 1540 г.) положениях. В это время активно используется трапецевидная проекция, Петер Апиан (1540 г.) использовал квадрант ортографической поперечной сетки для решения сферических треугольников.

Линии румбов (локсодромии) на портоланах при удалении от экватора приобретали значительную кривизну, но, не зная свойств прямоугольной или квадратной проекции, локсодромию продолжали показывать прямой линией. Морские карты, оказавшиеся столь несовершенными, получили название плоских. Попытки исправить плоские карты или разобрать более совершенные проекции для навигационных карт предпринимали видные космографы (географы) и мореплаватели: Педро Нуньес (Нониус, 1537 г.), Педро де Медина (1545 г.), Мартин Кортес (1556 г.), Вильям Купингам (1559 г.). О создании большой карты Европы в 1554 г. Меркатор писал Антуану Перреро (позже известному под именем кардинала Гранвелла).

В 1533 г. врач, математик, астроном, космограф, профессор в Лувене (Люттихе) во Фландрии Р. Гемма Фризиус опубликовал работу по триангуляции — точному нанесению объектов на карту по расстояниям и углам. Непосредственный ученик Г. Фризиуса Г. Меркатор применил его метод в картографии.

По некоторым данным, равноугольная цилиндрическая проекция была известна Э. Эттнаубу, награвировавшему сетку меридианов и параллелей в этой проекции на крышке солнечных часов с компасом в 1511 г. Карта равноугольной цилиндрической проекции была впервые составлена Меркатором в 1569 г. Голландец Герард Кремер-Кауфман, или Меркатор (1512–1592 гг.), — крупнейший картограф того времени — с полной ясностью указал преимущества этой проекции для мореплавания в силу ее равноугольности и возможности изображения пути судна прямой линией. Следует также упомянуть о морских картах при создании атласов в 1584–1595 гг. голландским мореплавателем Лукой Вагнером.

Руководствуясь зависимостью между длинами параллелей и экватора на карте Меркатора, английский математик Э. Райт впервые рассчитал таблицу меридиональных частей, опубликованную в 1594 г. в «Трактате навигации», составленном Т. Блундевилем, другом Э. Райта. Однако более известна таблица Э. Райта, приложенная к его сочинению «Некоторые погрешности в навигации, обнаруженные и исправленные» в 1599 г.

В Голландии и Франции в XV в. проведены первые градусные измерения с применением и развитием метода триангуляции Г. Фризиуса, в 1616 г. — голландским геодезистом, астрономом и математиком Снеллиусом Виллебрордом (1580–1626 гг.). Им же в 1605 г. введены термины «локсодромия» и «ортодромия». Лаир и Паран предложили внешние перспективные проекции. Н. Сансоном получена синусоидальная псевдоцилиндрическая проекция для карт мира и равновеликая проекция, носящая его имя.

В России первая известная карта Московского государства под названием «Большой чертеж» была составлена в конце XVI в. (ок. 1570 г.) по велению царя Ивана IV. Крупнейшие географические открытия, начиная с XV по XVIII в., сделаны русскими на северо-востоке страны. В 1643 г. Василий Поярков прошел от

Байкала до Охотска, в 1641–1647 гг. казачий десятник Михаил Стадухин обследовал берега Охотского моря и некоторые острова в Северном Ледовитом океане. В 1648 г. Семен Дежнёв и Федот Попов прошли от Колымы до Анадыря. В 1649–1652 гг. сибирский купец и промышленник Ерофей Хабаров побывал на реке Амур. Владимир Атласов в 1667–1699 гг. открыл и дал географическое описание Камчатки. На основании этих данных в 1667 г. тобольский воевода Петр Годунов составил карту Сибири «Чертеж Сибирской земли». Следующая карта Сибири, «Чертеж всяя Сибири», более подробно была составлена по правительственному указу в 1697–1698 гг. географом, картографом и историком Семёном Ремезовым. В 1701 г. Ремезов составил атлас «Чертежная книга Сибири», насчитывающий 25 карт.

С момента открытия великим французским ученым Исааком Ньютоном (1643–1727 гг.) закона всемирного тяготения начинается новая эпоха в изучении фигуры Земли. Исходя из предположения первоначально огненно-жидкого состояния Земли, Ньютон теоретически доказал, что Земля имеет эллипсоидную форму, сжатую у полюсов, и выступил с этой гипотезой в 1687 г. Первые попытки подтвердить теорию Ньютона путем градусного измерения парижского меридиана проводились во Франции с 1700 по 1718 гг. под руководством астронома и геодезиста Жака Кассини (1677–1756 гг.). Вследствие погрешностей и методических недочетов измерения привели к противоположным результатам, т. е. форма Земли получилась вытянутой у полюсов. Чтобы разрешить возникшее противоречие, Парижская академия наук в 1736 г. организовала большие градусные измерения в разных широтах: во Франции, в Лапландии и в Перу под руководством астронома и геодезиста Пьера Луи Мопертюи (1698–1759 гг.) и математика, почетного члена Петербургской академии наук Алексиса Клода Клеро (1713–1765 гг.). Клеро в 10 лет без затруднений читал книги по математическому анализу, в 13 лет представил в Парижскую академию наук свое математическое исследование, а в 16 лет стал академиком. Результаты обработки материалов полностью подтвердили теорию Ньютона о форме Земли и дали повод французскому писателю Франсуа-Мари Аруэ Вольтеру (1694–1778 гг.) сказать злую шутку: «Мопертюи приплюснул Землю и Кассини».

Замечательным историческим памятником допетровской Руси является «Древняя российская гидрография», написанная безымянным автором в 1627 г. и впервые опубликованная Н. И. Новиковым в 1773 г.

Царствование Петра I ознаменовалось всесторонним развитием русского мореплавания. Он проводит широкие мероприятия по подготовке геодезистов, картографов, навигаторов, учреждает школу «математических и навигационных наук» (1701 г.), посылает офицеров обучаться за границу, лично участвует в гидрографических работах на Дону и организует их на Азовском, Черном, Каспийском, Балтийском, Белом морях. На основании этих работ составляются атласы и карты (1703–1720 гг.). В 1703 г. по указанию Петра I начались эпизодические наблюдения за уровнем моря в военно-морской крепости Кронштадт, регулярные — с 1806 г. Сначала футшток в виде двухсаженной рейки был укреплен на гранитном устое моста через Обводный канал; с 1731 г. — в Средней гавани; с 1800 г. и по настоящее время — у Синего моста через Адмиралтейский



(Обводный канал). Этот уровень получил название «нуля Кронштадского футштока» и, по предложению Главного штаба, с 1872 г. стал использоваться для отсчета всех высот Российской империи. Подробная историческая справка и методика измерений и обработки результатов приведены в работах.

В 1711–1713 гг. Иван Козыревский обследует Курильские острова, а в 1719 г. в России организационно оформлены гидрографические исследования учреждением Адмиралтейств — Коллегии, во Франции — в 1720 г., в Англии и Голландии — в 1737 г., в США — в 1830 г. С 1717 г. начинается первая государственная геодезическая съемка на территории России. В 1729 г. Петр I поручил русскому ученому, историку и географу В. Н. Татищеву возглавить работу по «землемерию всего государства и сочинению состоятельной географии с ландкартами». В 1725 г. была учреждена Российская академия наук, в ведение которой перешла государственная картография России. На ее первом заседании обсуждался вопрос эллипсоидальности Земли.

В 1725–1730 гг. Первая Камчатская экспедиция под руководством датчанина на русской службе Витуса Беринга и его помощника Алексея Чирикова обследует пространства между Камчаткой и Америкой. В 1732 г. подштурман Иван Фёдоров и геодезист Михаил Гвоздев впервые нанесли на карту Берингов пролив. В 1724–1734 гг. руководителем картографических работ, обер-секретарем Сената, картографом и географом Н. К. Кирилловым издается труд «Атлас Всероссийской империи», состоящий из одной генеральной и 14 специальных карт. В 1733–1743 гг. работает Вторая Камчатская экспедиция, включавшая отряды, побывавшие в Северном Ледовитом океане, названные Великой Северной экспедицией. В ней принимали участие известные исследователи: В. Беринг, А. И. Чириков, С. В. Муравьев, С. Г. Малыгин, Д. Л. Овцын, Д. Я. и Х. П. Лаптевы и др. В это же время ведутся гидрографические исследования на Балтийском море под руководством А. И. Нагаева, Г. А. Сарычева, на Каспийском море — Ф. И. Соимонова, К. П. Вак-Вердена. В 1739 г. в Петербургской академии наук утвержден Географический департамент, в ведение которого вошли съемочные и картографические работы на территории России. Географическим департаментом Академии в 1745 г. был выпущен в свет «Атлас Российский», который включал генеральную карту России, 13 карт европейской части страны и 6 карт — азиатской. Этот атлас считался одним из лучших атласов того времени; все входящие в него карты были составлены в псевдоцилиндрических и равнопромежуточных конических проекциях. В составлении атласа принимал участие французский астроном Делиль Жозеф Никола (Олег Николаевич) (1688–1768 гг.), бывший на русской службе в 1725–1747 гг. директором астрономической обсерватории Петербургской академии наук. Ученый разработал картографическую проекцию Делиля, положил начало систематическим астрономическим наблюдениям и точным геодезическим работам в России.

В этот же период в России создаются оригинальные труды по судовождению: С. Г. Малыгин «Сокращенная навигация по карте дередукцион», 1738 г.; Ф. И. Самойлов «Экстрат штурманского искусства из наук, принадлежащих к мореплаванию, сочиненный в вопросах и ответах для пользы и безопасности

мореплавания», 1739 г.; и первый полный курс судовождения С. И. Мордвинова «Книги полного собрания о навигации», 1748 г.

С 1758 по 1765 гг. географическим департаментом руководил великий русский ученый, коллежский советник М. В. Ломоносов (1711–1765 гг.), который придавал большое значение математической основе карт, точности и необходимости геодезических измерений. Он изобрел несколько навигационных приборов, разработал компасную картушку, курсограф, механический лаг, прибор для измерения гравитационного поля Земли, подготовил замечательное сочинение по морскому делу «Рассуждение о большой точности морского пути, читанное в публичном собрании Императорской академии наук 8 дня 1759 г.». Под его руководством были созданы карты всего мира и России с включением акватории Северного Ледовитого океана, при составлении которых были использованы равноугольная цилиндрическая, косая стереографическая и нормальная азимутальная равнопромежуточная проекции.

В это время была начата строгая научная разработка теории картографических проекций в трудах Ламберта, Эйлера, Лангранжа. Иоганн Генрих Ламберт (1728–1777 гг.), немецкий ученый, математически обосновал свойства меркаторской и стереографической проекций. Он предложил равновеликие азимутальную и изоцилиндрическую проекции, положил основание математической теории равноугольного изображения земной поверхности на плоскости, показал, как учитывать сжатие земного эллипсоида.

Математик, физик и астроном Леонард Эйлер (1707–1783 гг.) — в 1727–1741 гг. работал, а с 1766 г. до конца жизни был академиком Петербургской академии наук — пошел дальше Ламберта в смысле обобщения теории проекций и совершенствования аналитического аппарата. Он приложил теорию функций к определению выгоднейших проекций, нашел возможные равновеликие проекции с ортогональным изображением меридианов и параллелей, дал дальнейшее развитие теории фигуры Земли и ее вращения, в 1755 г. высказал соображение об асимметрии Северного и Южного полушарий, сжатии Земли, приливных явлениях. Леонард Эйлер придал современный вид сферической тригонометрии. Установленное им «ограничение», состоящее в рассмотрении лишь таких сферических треугольников, стороны и углы которых меньше  $180^\circ$ , упорядочивает основания сферической тригонометрии и упрощает ее формулы.

Французский астроном и геодезист Жан-Батист Жозеф Деламбр (1749–1822 гг.) получил четыре формулы для синусов и косинусов полусумм и полуразностей двух углов сферического треугольника. Формулы эти, независимо выведенные также Карлом Фридрихом Гауссом, служат вместе с аналогиями Непера рабочими формулами для решения сферических треугольников. В практических приложениях сферической тригонометрии важную роль играет теорема Адриена Мари Лежандра (1752–1833 гг.), в соответствии с которой решение малых сферических треугольников без потери точности можно производить по формулам плоской тригонометрии. Французский математик Модюи (1731–1815 гг.) сформулировал простые и удобные правила для решения прямоугольных сферических треугольников. Люилье (1750–1840 гг.) и Каньоли (1743–1816 гг.) разработали одночленные формулы для вычисления сферического избытка.

Жозеф Луи Лангранж (1736–1823 гг.) обобщил теорию равноугольного изображения, распространив ее на произвольные поверхности вращения, разработал круговые и равноугольные проекции.

Гениальный немецкий ученый, «король математиков» Карл Фридрих Гаусс (1777–1850 гг.) в картографии оставил такой же глубокий след, как во многих других областях науки (почти все его фундаментальные открытия были сделаны в возрасте от 14 до 17 лет). В 1822 г. Гаусс представляет для премии Копенгагенскому научному обществу сочинение по картографическим проекциям: равноугольной конической, стереографической, поперечной цилиндрической — к обработке результатов геодезических измерений. Отправляясь от практических геодезических работ, Гаусс пришел к идее общего исследования поверхностей. В знаменитой работе «Общие исследования о кривых поверхностях» (1828 г.) он впервые точно сформулировал понятие кривизны поверхности — «гауссова кривизна», установил ее связь с кривизной линий, лежащих на поверхности, и доказал очень важную теорему — «превосходную теорему», им разработаны различные методы решения геодезических задач, изображения эллипсоида на сфере.

Во второй половине XVIII в. подробный картографический материал генерального межевания послужил основой при создании Депо карт (позже Военно-топографическое депо). В 1797 г. вышла «Подробная карта Российской империи», известная под названием «столистовой», которая была составлена в равнопромежуточной конической проекции в масштабе 20 верст в дюйме (1:840 000).

В 1792–1797 гг. проводятся большие градусные измерения французского меридиана от Дюнкерка до Барселоны под руководством астронома, геодезиста Жана-Батиста Жозефа Деламбра. На их основе установлены элементы земного эллипсоида Генеральной ассамблеи мер и весов, принятого в 1799 г. в Париже, эллипсоида Деламбра в 1800 г. Это один и тот же эллипсоид. Но в первом случае его элементы измерены в легальных (фиктивных) метрах, существовавших лишь в намерениях авторов и несовместимых с геометрией Земли, во втором — элементы эллипсоида измерены в архивных (международных) метрах, Эталон метра хранится в государственном архиве Франции.

XIX в. характерен обширными геодезическими исследованиями, результаты которых позволили установить ряд референц-эллипсоидов (см. табл. 1.2 и МТ-2000) и совершенствовать картографические работы. Начало XIX в. знаменуется большим вкладом русских мореплавателей в изучение морей и океанов: в первой половине XIX в. Россия организовала 17 больших плаваний, в том числе кругосветных, а все остальные государства, вместе взятые, — всего лишь 19. Эти плавания осуществились под командованием адмиралов и офицеров русского флота: П. Ф. Крузенштерна, Ю. Ф. Лисянского, В. М. Головина, О. Е. Коцебу, Ф. Ф. Беллинсгаузена, М. П. Лазарева, Ф. П. Литке.

К этому периоду относится труд по гидрографическим исследованиям вице-адмирала Г. А. Сарычева «Правила, принадлежащие к морской геодезии», 1804 г., в котором впервые вводится термин «морская геодезия», позднее этот термин был утрачен и возрожден в 1965 г. Он же начал применять метод триангуляции, ввел в русскую гидрографию задачу Потенота.

В 1816 г. Корпус военных топографов приступил к выполнению триангуляционных работ, непосредственное руководство ими поручено генералу от инфантерии Карлу Ивановичу Теннеру (1783–1860 гг.), русскому геодезисту и астроному. Эти работы проводились в бывшей Виленской губернии. В это же время профессор Дерптского университета Василий Яковлевич Струве (1793–1804 гг.) — русский астроном и геодезист, академик Петербургской академии наук (1832 г.), основатель и первый директор Пулковской обсерватории (1839–1862 гг.) — совместно с К. И. Теннером начал градусные измерения меридиана в прибалтийских губерниях от Дуная до Северного Ледовитого океана, которые соединились в ряд триангуляции, при этом ими были разработаны правила и методы геодезических работ.

В 1827 г. обеспечение безопасности кораблевождения было поручено Управлению генерал-гидрографа и Гидрографическому депо, которое в СССР называлось Главным управлением навигации и океанографии Министерства обороны (ГУНИО МО), в настоящее время — Управлением навигации и океанографии Министерства обороны РФ (УНИО МО). Оно ведал гидрографическим, геодезическим, картографическим обеспечением мореплавания. В этот период гидрографические исследования были проведены на Балтийском море под руководством Ф. Ф. Шуберта, на Белом море — М. Ф. Рейнеке, у берегов Новой Земли — П. К. Пахтусова, на Черном море — Е. П. Мангадари, на Дальнем Востоке — Ф. П. Литке, Ф. П. Врангеля, Г. И. Невельского и др.

Немецкий математик, астроном, геодезист Фридрих Вильгельм Бессель (1784–1846 гг.) публикует ряд фундаментальных работ «Основы астрономии» (1828 г.), «О влиянии неправильностей фигуры Земли на геодезические работы» (1837 г.). В них излагаются методы решения геодезических задач фигуры Земли, отличной от эллипсоида вращения, характеризующейся невозмущенной поверхностью Мирового океана, мысленно продолженной под материками, т. е. обосновывается идея о геоиде. С использованием методов триангуляции проводится градусное измерение меридиана не вдоль меридианов, а под углом  $40^\circ$ , из всего материала получается земной эллипсоид, который применялся в качестве референц-эллипсоида в дореволюционной России и СССР, до 1946 г.

Теория картографических проекций была подробно изложена в курсе геодезии, написанном А. П. Болотовым. Им впервые в России была дана теория равноугольного изображения одной поверхности на другой по Гауссу и рекомендована для карт России равноугольная коническая проекция, а для карт иностранных государств применялись косые стереографические, псевдоконические, равнопромежуточные азимутальные и равноугольные цилиндрические проекции. После учреждения в 1839 г. Пулковской обсерватории счет долгот на картах стали вести от меридиана Пулково.

В 1849 г. была опубликована работа английского математика Джорджа Габриеля Стокса (1819–1903 гг.), который вслед за Клеро сделал крупное обобщение о фигуре Земли. В основе теории Стокса лежит теорема, в которой утверждается, что потенциал и составляющие силы тяжести во внешнем пространстве могут быть определены, если известны: общая масса планеты, ее угловая скорость вращения и уровенная поверхность силы тяжести, внутри которой заключены

все притягивающие массы. Эта задача решена для эллипсоида вращения и трехосного эллипсоида. Стоксом решена также обратная задача по значениям силы тяжести на уровне поверхности определения формы поверхности, т. е. задача гравиметрии.

В 1873 г. немецкий геодезист Листинг предложил рассматривать в качестве фигуры Земли уровенную поверхность, совпадающую с невозмущенной поверхностью Мирового океана и продолженную под континентами по закону образования уровенных поверхностей. Такую поверхность называли геоидом, «подобным Земле».

В 1896 г. впервые введена система фундаментальных геодезических и астрономических постоянных. Она создана трудами американского астронома Саймона Ньюкома (1835–1909 гг.), включает экваториальный радиус, полярное сжатие и гравитационные характеристики.

Новый этап в развитии отечественной математической картографии связан с именем знаменитого русского математика, академика Пафнутия Львовича Чебышева (1821–1894 гг.), которым была сформулирована теорема о наилучшей равноугольной картографической проекции для заданной территории. Академик Дмитрий Александрович Граве (1863–1939 гг.) доказал теорему Чебышева, нашел все равновеликие круговые проекции сферы на плоскость и попутно решил ряд задач картографии и дифференциальной геометрии. Русские математики Александр Николаевич Коркин (1837–1908 гг.) и Андрей Андреевич Марков (1856–1922 гг.) также проводили изыскания наилучших картографических проекций.

На основании следующих крупных градусных измерений в России в 1848–1870 гг. по параллелям  $47,5^{\circ}$  и  $52^{\circ}$  профессор Жданов в 1893 г. вывел размеры эллипсоида, подходящего для средней и южной частей России. Недостатком триангуляционных работ XIX в. в России были применение по различным территориям различных референц-эллипсоидов (Вальбека, Кларка, Бесселя) и ориентировка триангуляций по различным астрономическим пунктам. Несмотря на недочеты в постановке основных геодезических работ Корпусом военных топографов совместно с Пулковской обсерваторией, их деятельность свидетельствует о крупном вкладе в развитие отечественной и мировой геодезической науки. К наиболее известным ученым, геодезистам и астрономам этого периода можно отнести: Дмитрия Даниловича Геденова (1854–1908 гг.), разработавшего способ точного нивелирования; Михаила Васильевича Певцова (1843–1902 гг.) — автора способа определения географической широты по звездам; Иллиодора Ивановича Померанцева (1847–1921 гг.) — руководителя астрономо-геодезическими работами, исследователя фигуры Земли; Николая Яковлевича Цингера (1842–1918 гг.); Ф. А. Слудского и других ученых.

В XX в. применение сферической тригонометрии значительно расширилось благодаря развитию вычислительной техники. Дальнейшее развитие сферическая тригонометрия получила в работах М. К. Вентцеля, Б. А. Волынского, Г. В. Вульфа, О. Г. Дитца, Н. Ю. Рыбалтовского, Н. Н. Степанова и других ученых.

Исследованиями в области теории картографических проекций в начале XX в. занимались известные ученые. Дмитрий Иванович Менделеев (1834–1907 гг.) создал в 1896 г. равнопромежуточную коническую проекцию для карты России. Василий Васильевич Витковский (1856–1924 гг.), генерал-лейтенант,

профессор геодезического отделения Академии Генштаба с 1897 г. — автор руководств по топографии, геодезии и картографии, в частности «Картографии» 1907 г. издания. Александр Александрович Михайлов (1888–1983 гг.), академик, директор Пулковской обсерватории (1947–1964 гг.), создал труды по теории фигуры Земли, нивелированию.

Охватывая все стороны знаний о Земле, выдающийся естествоиспытатель, академик Владимир Иванович Вернадский (1803–1945 гг.) уделял большое внимание картографированию поверхности Земли, организации топографической службы в России.

После Великой Октябрьской социалистической революции для развития картографической и геодезической деятельности 2 июня 1918 г. реорганизована Военно-топографическая служба и 18 июля 1918 г. Гидрографическая служба; создано 15 марта 1919 г. Высшее геодезическое управление (ВГУ). Большое значение в выполнении геодезических работ имела организаторская деятельность Феодосия Николаевича Красовского (1878–1948 гг.) — астронома-геодезиста, профессора, члена-корреспондента АН СССР (1939 г.), дважды лауреата Государственной премии. В 1918 г. Ф. Н. Красовский организует Государственный институт геодезии и картографии (ЦНИИГАиК), создает научную школу, среди его первых учеников А. И. Дурнев, П. С. Закатов, А. А. Изотов, М. С. Молоденский и др., впоследствии известные ученые.

В 1932 г. Геолого-геодезической конференцией, созванной Госпланом СССР, а затем Советом труда и обороны СССР принято постановление о производстве общей гравиметрической съемки. Научное руководство работами возглавил Ф. Н. Красовский и выдвинул идею о совместном использовании астрономо-геодезических и гравиметрических данных для определения фигуры геоида (эллипсоида). На морях нашей страны развернуты гидрографические работы: на Севере под руководством Николая Николаевича Матусевича (1879–1950 гг.) — гидрографа, геодезиста, доктора физико-математических наук, инженер-вице-адмирала, профессора Военно-морской академии — с участием И. Д. Жонгловича; в Финском заливе — под руководством Г. А. Мигалкина, затем Н. Ю. Рыбалтовского и Г. С. Галанина; на Черном и Азовском морях — под руководством А. П. Белоброва; на Тихом океане — под руководством Л. А. Дёмина.

Издаются первые советские труды по морской картографии: Владимира Владимировича Каврайского (1884–1954 гг.) — геодезиста, картографа, астронома, доктора физико-математических наук, инженер-контр-адмирала, профессора Военно-морской академии, лауреата Государственной премии СССР (1952 г.), члена научных советов Пулковской обсерватории, ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова и других научных и учебных заведений; Артемия Павловича Ющенко (1894–1972 гг.) — доктора военно-морских наук, заслуженного деятеля науки РСФСР, профессора, начальника кафедры судовождения ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова; П. В. Мессера и др. Профессора Ф. Н. Красовский, М. А. Урлаев, М. Д. Соловьев, В. В. Каврайский, Н. Г. Келль, Ю. М. Шокальский, целая плеяда более молодых ученых подняли теорию и практику геодезических и картографических работ на самый высокий уровень в мире. В развитие картографии как науки в целом значительный вклад внесен ученым-географом и картографом К. А. Салищевым с его школой.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)